

SEP SEV DGEST DITD



INSTITUTO TECNOLÓGICO SUPERIOR DE TANTOYUCA

TITULACIÓN INTEGRAL TESIS PROFESIONAL

**“SIMULADOR DE TÉCNICAS DE DETECCIÓN, DE MONITOREO DE
PARÁMETROS DE FORMACIÓN Y CONTROL DE BROTES EN POZOS
PETROLEROS”**

Que para obtener el título de:

Ingeniero en Electrónica

Presenta:

ERIKA ROMERO MARTINEZ

No. de control. 113S0224

ASESOR

M.C RAÚL HERNÁNDEZ RIVERA

TANTOYUCA, VERACRUZ

JULIO DE 2019.

Agradecimientos

Agradezco principalmente a Dios por acompañarme, guiarme y permitirme llegar hasta este momento.

A mi hijo Edgar Alexander por hacerme feliz, porque hasta en los momentos más difíciles siempre me hace reír; por ser mi mayor tesoro y por motivarme cada día a ser una mejor persona.

Doy gracias a mis papás Florentino y María Del Carmen por su amor y su apoyo incondicional, por confiar en mí, acompañarme siempre y por ser mis amigos.

A mis hermanas Adriana y Lorena por quererme y animarme, por las conversaciones en las que siempre reímos. Gracias por cuidarme y por soportarme, aunque sea su obligación.

A mis amigas Gris, Karla, Loida, Norma y Raquel por quererme, escucharme y aconsejarme.

Agradezco a mi asesor de Tesis el M.C Raúl Hernández Rivera por su apoyo, su tiempo y paciencia.

A los revisores Ing. Pablo Iván Romero De La Rosa e Ing. Juan Francisco López García.

Al Ing. Rosalino Del Ángel Avilés por su apoyo y aportaciones en los temas de ingeniería petrolera.

Resumen

Actualmente el trabajo de perforación de pozos es más demandante y se requiere que los trabajadores estén preparados para enfrentar los nuevos desafíos.

El presente proyecto trata del diseño y elaboración de un equipo electrónico que ayude a los estudiantes del ITSTA a desarrollar conocimientos prácticos en el tema de perforación de pozos petroleros.

El equipo electrónico consta de una balanza para medir la densidad del lodo de perforación, esta se fabricó con una celda de carga y la tarjeta Arduino Uno para la lectura y procesamiento de los datos; y un simulador que está desarrollado en el entorno grafico de LabVIEW 2017. A partir de los datos obtenidos con la balanza es posible monitorear y controlar los parámetros de formación para prevenir brotes.

Se monitorea la profundidad de perforación, presión hidrostática, volumen de presas y revoluciones por minuto de la barrena.

Con la ayuda de este equipo los estudiantes pueden entender mejor los problemas que se presentan en la perforación de pozos, generar experiencia, controlar situaciones y evitar accidentes.

Palabras clave: Perforación, Arduino, LabVIEW, Lodo, Simulador, Brotes, Barrena

Abstract

Currently, well drilling work is easier and workers are also required to be prepared to face new challenges.

This project deals with the issue of oil well drilling.

The electronic equipment consists of a balance to measure the density of the drilling mud, this was made with a load cell and the Arduino Uno card for the reading and processing of the data; and a simulator that is developed in the graphic environment of LabVIEW 2017. It is possible to monitor and control training parameters to prevent outbreaks.

The drilling depth, hydrostatic pressure, volume of pressure and revolutions per minute of the drill are monitored.

With the help of this team, students can better understand the problems that arise in the drilling of wells, generate experience, control situations and avoid accidents.

Key words: Drilling, Arduino, LabVIEW, Mud, Simulator, Sprouts, Auger.

Introducción

El petróleo se encuentra a gran profundidad. Conforme con la profundidad proyectada del pozo, las formaciones que se marchan a atravesar y las condiciones propias del subsuelo, se escoge los equipos de perforación más indicados.

La perforación, así como la exploración, son un tipo de actividad que demanda mucho tiempo y también recursos financieros. De ahí que, un equipo de perforación solo se instala y empieza a perforar solo cuando geofísicos y geólogos han acordado la ubicación más capaz para buscar hidrocarburos ubicados en el subsuelo.

Para esto se requiere de personal calificado que conozca los procedimientos que deban llevarse a cabo para evitar que ocurra un brote, mantener bajo control la excavación de pozos, para así evitar tanto pérdidas económicas como humanas.

Es por ello que se desarrollara un equipo electrónico que mida la densidad del lodo y simule el monitoreo de parámetros de formación y control de brotes en pozos petroleros; en el entorno de programación de Arduino Uno y LabVIEW 2017.

El capítulo I pertenece al Marco Referencial en el cual se presentan los antecedentes del proyecto y como a lo largo del tiempo se ha ido desarrollando técnicas y aplicando distintos simuladores de perforación de pozos petroleros, a esto llamamos estado del arte. También se explica el planteamiento del problema a resolver. Se exponen los objetivos y la justificación para la realización del proyecto, así como los alcances y limitaciones del mismo.

El capítulo II corresponde al Marco Teórico en el cual se describe los temas de importancia que se deben tomar en cuenta para el mejor entendimiento del problema a resolver, así como los materiales necesarios para la realización del aparato electrónico y desarrollo del software de simulación.

En el capítulo III que es el Marco Metodológico se exponen los métodos de investigación utilizados para llevar a cabo el proyecto.

El capítulo IV perteneciente al Marco Operativo, se explica el procedimiento que se siguió para elaborar el simulador de técnicas de detección, de monitoreo de parámetros de formación y control de brotes en pozos petroleros, se muestran los diagramas de conexión, el código Arduino y se describe el funcionamiento del programa en LabVIEW.

En el capítulo V se presentan los resultados obtenidos al poner en práctica el equipo electrónico elaborado (balanza y simulador). Se exponen las conclusiones y se hacen algunas recomendaciones acerca de cómo utilizar y mejorar el proyecto.

INDICE

Resumen	i
Abstract	ii
Introducción.....	iii

CAPITULO I. MARCO REFERENCIAL

1.1. Antecedentes	14
1.1.1. Estado del arte	14
1.2. Planteamiento del problema.....	16
1.3. Objetivo General y Específicos	17
1.3.1. Objetivo general	17
1.3.2. Objetivos específicos	17
1.4. Justificación.....	18
1.5. Alcances y Limitaciones	19
1.5.1. Alcances.....	19
1.5.2. Limitaciones	19

CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO

2.1. Perforación de pozos petroleros.....	21
2.1.1. Control del pozo	22
2.1.2. Parámetros importantes en el control de pozos.	22
2.2. Fluidos de control de perforación	23
2.2.1. Características de los fluidos de perforación.....	24
2.2.1.1. Densidad.....	24
2.2.1.2. Viscosidad.....	24
2.3. Objetivos de los fluidos de perforación.....	24

2.3.1. Refrigerar y lubricar la broca y la sarta de perforación.....	24
2.3.2. Limpieza del fondo del pozo.....	25
2.3.3. Control de presiones de fondo.	25
2.3.4. Revestir la pared del pozo con torta de lodo.....	26
2.3.5. Ayuda a soportar el peso de la sarta.....	26
2.3.6. Transportar y remover los cortes de perforación.....	27
2.3.7. Transmitir energía hidráulica a la broca.	27
2.3.8. Estabilidad del Pozo.....	28
2.3.9. Protección y Evaluación de las formaciones.	28
2.4. Fluidos de perforación más comunes.....	29
2.4.1. Aire gas.....	29
2.4.2. Espuma o fluidos aireados.	30
2.4.3. Lodos en Base agua.	31
2.4.4. Lodos en Emulsión de Aceite.....	32
2.4.5. Lodos en Base Aceite	32
2.5. Reología básica del lodo	33
2.5.1. Densidad del lodo	33
2.5.2. Viscosidad del Lodo	34
2.5.3. Filtrado y pérdida de fluido	36
2.5.4. Geles.....	36
2.5.5. Viscosidad Alta contra Viscosidad Baja y valores de geles.....	36
2.5.6. Filtrado y pérdida de fluido	37
2.5.7. Torta de Lodo.....	37
2.5.8. Nivel de pH del lodo	38
2.5.9. Salinidad del Lodo.....	38
2.6. Causas de los brotes.....	39
2.6.1. Presión hidrostática.....	39
2.6.2. Aire o gas en el lodo	39
2.6.3. Densidad insuficiente del lodo.....	41
2.7. Medidas de la densidad del lodo en el campo.....	42
2.8. CONTROL DE LA DENSIDAD	43

2.8.1. Peso del lodo para matar	45
2.9. Simulación de control de pozos.....	46
2.10. LabVIEW	47
2.10.1. Entorno.....	47
2.10.2. Estructuras	49
2.10.2.1. SEQUENCE.....	49
2.10.2.2. CASE	50
2.10.2.3. WHILE	51
2.10.2.4. FOR	52
2.10.2.5. EVENT	53
2.11. Arduino uno	55
2.11.1. Entradas y salidas.....	56
2.11.2. Pines especiales de entrada y salida	56
2.11.3. Alimentación de un Arduino:	57
2.12. Celda de carga	57
2.12.1. Galga extensiométrica.....	59
2.12.2. Puente de Wheatstone.....	60
2.12.2.1. Funcionamiento	61
2.12.2.2. Medición	61
2.13. Módulo HX711.....	61
2.13.1. Conexiones entre la Celda de carga, módulo HX711 y Arduino.	62

CAPÍTULO III. MARCO METODOLÓGICO

3.1. Metodología del proyecto	64
-------------------------------------	----

CAPÍTULO IV. MARCO OPERATIVO

4.1. Elaboración de la balanza con la celda de carga	67
4.2. Conexión de la celda de carga a al módulo HX711.....	67
4.3. Conexión de la balanza a la tarjeta Arduino Uno	68

4.4. Código Arduino.....	68
4.5. Programa en LabVIEW 2017.....	70

CAPÍTULO V. RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Resultados	74
5.2. Conclusiones.....	77
5.3. Recomendaciones.....	78
6. Referencias bibliográficas	79

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Perforación de un pozo petrolero.	21
Figura 2. Proceso de perforación.	22
Figura 3. Lodos de perforación. (All petrol).....	29
Figura 4. Medición de la densidad del lodo (Datalog, 2001).....	34
Figura 5. Embudo para medir la viscosidad del lodo (Datalog, 2001).	35
Figura 6. Expansión de gas en la boca del pozo (Benítez, 1979).....	40
Figura 7. Balanza para medir a densidad del lodo (Fluidos de control, tomo 3). ..	42
Figura 8. Limpiador de lodo (Benítez, 1979).....	45
Figura 9. Centrifuga decantadora (Benítez, 1979).....	45
Figura 10. Panel Frontal (NI)	48
Figura 11. Diagrama de Bloques. (NI)	48
Figura 12. estructuras de tipo SEQUENCE (Lajara, Pelegri, 2007).....	49
Figura 13. Estructura CASE (Lajara, Pelegri, 2007)	50
Figura 14. Tipos de datos que son válidos en un CASE (Lajara, Pelegri, 2007) ..	51
Figura 15. Estructura WHILE (Lajara, Pelegri, 2007)	52
Figura 16. Estructura FOR (Lajara, Pelegri, 2007)	53
Figura 17. Estructura EVENT (Lajara, Pelegri, 2007)	54
Figura 18. Placa Arduino Uno (Tecnología Robótica).	55
Figura 19. Características técnicas de Arduino Uno (Características – Arduino, 2013).	56
Figura 20. Celda de carga (Naylamp).....	58
Figura 21. Balanza con celda de carga. (Naylamp)	58
Figura 22. Galga extensiométrica.....	59
Figura 23. Diagrama de un puente de Wheatstone	60
Figura 24. Módulo HX711. (Naylamp)	62
Figura 25. Balanza con celda de carga. (Naylamp)	67
Figura 26. Conexión de la celda de carga al módulo HX711 (Naylamp)	67
Figura 27. Diagrama de conexión. (Naylamp)	68
Figura 28. Programa Arduino para leer densidad del lodo. (Fuente propia)	69

Figura 29. Programa en LabVIEW para determinar la densidad del lodo (Fuente propia)	70
Figura 30. Programa en LabVIEW para determinar la densidad del lodo mediante su peso (Fuente propia)	71
Figura 31. Comparación correcta de densidad de lodo (Fuente propia)	72
Figura 32. Comparación de densidad de prueba incorrecta (Fuente propia)	72
Figura 33. Calibración de la balanza (Fuente propia)	74
Figura 34. Captura de datos (Fuente propia)	74
Figura 35. Comparación de datos obtenidos (Fuente propia)	75
Figura 36. Gráfica de los datos obtenidos en tiempo real (Fuente propia)	75
Figura 37. Demostración de pesos de lodos (Fuente propia)	75
Figura 38. Simulador en LabVIEW. Pestaña docente (Fuente propia)	76
Figura 39. Simulador en LabVIEW. (Fuente propia)	76

INDICE DE TABLAS

Tabla. 1. Conexión entre la Celda de carga y módulo HX711 (Naylamp)	62
Tabla. 2. Conexión entre HX711 y Arduino (Naylamp)	62
Tabla. 3. Parámetros para determinar densidad del lodo (Fuente propia)	70
Tabla. 4. Valores de peso y densidad del lodo (Fuente propia)	71

CAPITULO I.

MARCO

REFERENCIAL

1.1. Antecedentes

1.1.1. Estado del arte

La creciente necesidad del mundo moderno ha obligado al hombre a desarrollar nuevas tecnologías para la búsqueda y obtención de mayores cantidades de hidrocarburos, debido a que los nuevos yacimientos son más difíciles de descubrir y explotar. Con el transcurso del tiempo, se han desarrollado varios métodos para la obtención de hidrocarburos y la perforación de pozos; el más común es el método rotatorio el cual implica la rotación de una barrena por medio de un tubo llamado tubería de perforación, en el cual se hace necesario la circulación de un fluido que circula por su interior, pasa a través de la barrena, y regresa a la superficie por el espacio anular (espacio entre el exterior de la tubería de perforación y el interior de la tubería de revestimiento).

Los primeros lodos (fluidos) de perforación, datan de 1914, cuando se definió como lodo: “A una mezcla de cualquier arcilla, la cual queda suspendida en el agua por cierto tiempo”. El objetivo principal de estos fluidos es mejorar las condiciones de perforación. *(Benítez, 1979)*

Un dispositivo para medir la densidad (el peso) de lodo, cemento u otro líquido o lechada. La balanza para lodo se compone de un vaso para el lodo de volumen fijo con una tapa en un extremo de una barra graduada y un contrapeso en el otro extremo. Una pesa deslizante puede ser movida a lo largo de la barra y una burbuja indica cuando la barra está a nivel. La lectura de la densidad se toma en el punto donde la pesa deslizante está posicionada en la barra cuando está a nivel. La precisión del peso del lodo debería ser de $\pm 0,1$ lbm/gal ($\pm 0,01$ g/cm³). La balanza para lodo puede calibrarse con agua u otro líquido de densidad conocida ajustando el contrapeso. La mayoría de las balanzas no están presurizadas, pero la balanza para lodo presurizada opera de la misma manera. *(Schlumberger, 2019)*

Los medidores de densidad y viscosidad se basan en el principio del elemento vibrador, por el cual la frecuencia de vibración es inversamente proporcional a la

densidad del líquido. Los medidores de viscosidad trabajan según este principio operativo, pero también miden las características adicionales de frecuencia para determinar la viscosidad del líquido. Todos los medidores de densidad y viscosidad usan una medición de temperatura interna para explicar los cambios en la rigidez del metal que resultan de los cambios de temperatura. *(Emerson, 2019)*

La simulación numérica de yacimientos es una disciplina moderna en ingeniería de yacimientos petroleros. Su potencial es enorme como herramienta de trabajo, para predecir el comportamiento de yacimientos bajo diferentes esquemas de explotación siempre y cuando se entiendan las bases sobre las que está desarrollada. *(Cerón G. 2016)*

El sistema de entrenamiento simulado de perforación y control de pozos es un equipo de entrenamiento basado en escenarios, con el objetivo de mejorar la capacidad de los trabajadores de la industria de la perforación para identificar y mitigar los eventos de control de pozo de manera segura y efectiva. Los simuladores comparten el compromiso de la asociación internacional de productores de petróleo y gas (OGP), de mejora de la capacitación, evaluación y certificación en control de pozos (Well Control), alcanzando los estándares de la IADC / IWCF. *(LE Tech Smulation, 2017)*

El grupo de Dinámica y Control de Yacimientos del Centro de Investigación de Schlumberger-Doll con sede en Ridefield, Connecticut, diseñó un experimento de laboratorio para determinar el impacto de la recolección de datos en tiempo real y del control de flujo sobre la recuperación de pozos petroleros. El aparato experimental simula un pozo desviado en un yacimiento de petróleo cercano a un contacto agua- petróleo. En el experimento, el yacimiento de arenisca Berea fue saturado con agua dulce para representar el petróleo de un yacimiento real. “El petróleo” fue desplazado por el agua salada, que representa el agua de formación del yacimiento real. *(Algeroy, J., Auzeais, F., Bryant, I., Crabtree, M., Davies, J., Eslinger, D., Fletcher, P., Gai, M., Johannessen, O., Johnson, A., & King, G. (1999))*

1.2. Planteamiento del problema

Actualmente en la industria petrolera, es de suma importancia que el personal que labora en las plataformas se encuentre capacitado y que sepa actuar ante los diferentes y posibles problemas que puedan surgir en la práctica de extracción de crudo.

Existen equipos y software para capacitar al personal, pero solamente lo pueden adquirir las grandes empresas petroleras debido a que tienen un elevado costo y no permiten el uso a personal inexperto.

El ITSTA no cuenta con un equipo que permita medir la densidad del lodo de perforación. Siendo este una parte importante en la práctica de perforación, detección y control de brotes se requiere que los estudiantes apliquen los conocimientos por lo cual es necesario elaborar un equipo de simulación para que los estudiantes puedan llevar a cabo prácticas de perforación de pozos.

1.3. Objetivo General y Específicos

1.3.1. Objetivo general

Diseñar y elaborar un equipo electrónico que mida la densidad del lodo de perforación, y simule el control y monitoreo los parámetros de formación presentes en la perforación de pozos petroleros como la profundidad de perforación, revoluciones por minuto de la barrena y presión hidrostática; así como el control de cierre de un pozo petrolero.

1.3.2. Objetivos específicos

- Investigar acerca de la perforación de pozos petroleros.
- Conocer las características de los fluidos de perforación de pozos.
- Conocer la importancia de la densidad del lodo de perforación.
- Conocer la importancia del control de pozos petroleros.
- Saber acerca de las causas que generan un brote.
- Implementar una balanza con una celda de carga para pesar el lodo de perforación.
- Elaborar código en Arduino Uno para calibrar la balanza.
- Determinar peso del lodo con la balanza Arduino.
- Diseñar un software de simulación en el entorno de programación de LabVIEW 2017 para el monitoreo de diferentes parámetros.

1.4. Justificación

Debido a que las instituciones educativas no pueden adquirir los costosos equipos para capacitar a los estudiantes en la práctica de perforación de pozos petroleros, se necesita desarrollar un software de simulación que permita aplicar los conocimientos teóricos adquiridos a lo largo de la formación académica.

Es importante que los estudiantes puedan experimentar los procedimientos de perforación, puedan identificar fallas y sean capaces de resolver los problemas comunes que se presentan al perforar pozos.

Por lo cual se diseña un equipo, el cual consta de un dispositivo electrónico para medir la densidad del lodo y un simulador para monitorear y controlar la perforación de pozos petroleros, con el fin de que los estudiantes desarrollen habilidades para que puedan integrarse sin inconvenientes al mercado laboral.

1.5. Alcances y Limitaciones

1.5.1. Alcances

- Poner en práctica conocimientos teóricos.
- Llevar a cabo prácticas simuladas de monitoreo y control de pozos petroleros.
- Aprender a determinar la densidad del lodo.
- Llevar a cabo el proceso simulado de perforación de pozos.
- Generar conocimientos sobre cómo actuar en caso descontrol de pozo y posibles brotes.

1.5.2. Limitaciones

- No se trabaja en un entorno real.
- No se puede comparar el resultado obtenido de la balanza implementada con una balanza especial para medir la densidad del lodo.
- No es posible monitorear todas las variables del lodo de perforación.

CAPÍTULO II.

MARCO TEÓRICO

2.1. Perforación de pozos petroleros

El término pozo petrolífero alude a cualquier perforación del suelo diseñada con el objetivo de hallar y extraer fluido combustible, ya sea petróleo o hidrocarburos gaseosos.

Los pozos petrolíferos más antiguos que se conocen fueron perforados en China en el año 347 D.C tenían una profundidad de aproximadamente 250 m y funcionaban mediante brocas fijadas a cañas de bambú. El petróleo se quemaba para evaporar salmuera a fin de producir sal. Largos conductos de bambú conectaban los pozos con las salinas. Numerosos registros de la antigua China y Japón incluyen varias alusiones al uso del gas natural para iluminar y cocinar. El petróleo fue conocido como «agua de quemar» en Japón en el Siglo VII.

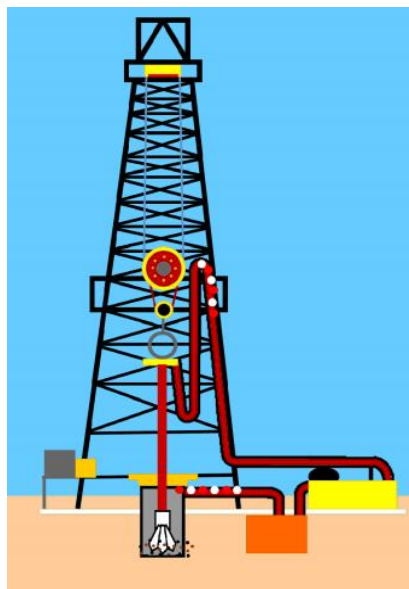


Figura 1. Perforación de un pozo petrolero.

El proceso de perforación consiste en hacer un agujero mediante la rotación de la sarta de perforación y la aplicación de una fuerza de empuje en el fondo, utilizando una barrena.

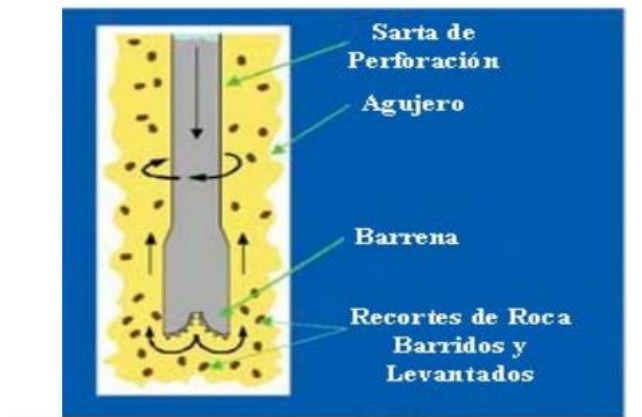


Figura 2. Proceso de perforación.

Hay dos fuerzas principales que trabajan en forma opuesta en un pozo. Estas son la presión de la columna hidrostática de fluido y la presión de formación. Si una de las presiones supera a la otra entonces puede ocurrir un brote o una pérdida de circulación. Debido a que la presión hidrostática es función de la densidad del fluido de trabajo en el pozo, su valor debe ser muy controlado. Realizando cálculos pequeños y con cuidado, y manipulando las ecuaciones para la presión hidrostática, es posible probar trabajos de cementación, estimar la presión de integridad de la formación, proyectar las densidades máximas del fluido de perforación y controlar el brote en los pozos. (González, 2018)

2.1.1. Control del pozo

Antes de efectuar cualquier operación dentro del pozo es necesario que se encuentre totalmente bajo control. Para lograrlo, se bombea fluido contra formación de una densidad tal que su columna hidrostática genere una presión mayor del yacimiento. (Terminación y mantenimiento de pozos. Pag.124)

2.1.2. Parámetros importantes en el control de pozos.

El control de pozos puede describirse en pocas palabras como una de las bases para la seguridad del personal que se encuentra en la instalación.

Esta labor incluye gran variedad de elementos y procesos que se utilizan para prevenir un brote no deseado de fluidos de la formación. La instalación debe de ser

funcional para cumplir su propósito. Estos elementos y procesos son instalados, controlados y realizados por el personal, es por esto que es de vital importancia que los trabajadores conozcan las operaciones que deben de realizar, así como detectar los problemas para que se pueda actuar de forma correcta y lo más pronto posible. También es importante que el personal conozca los diferentes escenarios que se pueden presentar si ocurre algún brote.

Las diferentes técnicas de control de pozos son utilizadas en diversas situaciones dependiendo de una gran variedad de factores. Estos pueden ser la profundidad a la que surgió el problema, la posición de la sarta de perforación, la habilidad del personal y la capacidad del equipo, por mencionar algunos.

En primer lugar, el control de pozos radica en tener la presión del fondo del pozo constante, durante la entrada de los fluidos hasta su desalojo. Para que esto ocurra, debemos identificar la entrada de ellos visualmente y enseguida cerrar el pozo utilizando el equipo de control superficial.

Cuando tenemos cerrado el pozo, se puede tomar el control sobre el pozo, así será más sencillo tener la presión del fondo del pozo constante. *(González, 2018)*

2.2. Fluidos de control de perforación

Definición API: “Fluido circulante, usado en la perforación rotatoria, para ejecutar alguna o todas las funciones requeridas”. *(Benítez, 1979)*

El fluido de control es el fluido circulatorio que se utiliza en un equipo de perforación o terminación de pozo, formando una mezcla de aditivos químicos que proporcionan propiedades físico-químicas idóneas a las condiciones operativas y a las características de la formación litológica a perforar. La estabilización de sus parámetros físico-químicos, así como la variación de los mismos al contacto con los contaminantes liberados en la formación perforada son controlados mediante análisis continuos. *(Fluidos de control, pág. 4)*

2.2.1. Características de los fluidos de perforación

2.2.1.1. Densidad

La densidad de un fluido es una de las propiedades más importantes, ya que gracias a su correcto manejo se logra el control de un pozo; manteniendo la presión hidrostática igual o ligeramente mayor que la presión de la formación.

La densidad o peso específico es la densidad de un material en relación a la densidad del agua.

2.2.1.2. Viscosidad

La viscosidad: es la medida de la resistencia interna al flujo, que tiene un líquido. La viscosidad se mide en segundos marsh, que es el tiempo que un litro de sustancia tarda en fluir. *(Terminación y mantenimiento de pozos. Pag.31)*

2.3. Objetivos de los fluidos de perforación

Los fluidos de formación tienen la obvia función de remover los cortes de la perforación fuera del pozo, y de lubricar y refrigerar la broca y la sarta de perforación. De hecho, el lodo tiene muchas otras funciones y es la columna vertebral de virtualmente todas las operaciones de perforación de un pozo. Es muy importante que el fluido de perforación pueda llevar a cabo todas estas funciones eficientemente.

2.3.1. Refrigerar y lubricar la broca y la sarta de perforación.

La acción de la perforación y la rotación de la sarta de perforación genera considerable cantidad de calor en la broca y en toda la sarta debido a la fricción. Este calor es absorbido por el fluido de perforación y liberado, hasta cierto punto en la superficie. El fluido de perforación reduce aún más el calor lubricando la broca y la sarta reduciendo la fricción. Los tipos de lodo en base de agua proveen una moderada lubricación, pero el sistema en base aceite y emulsificados, incrementan

la lubricación al tiempo que reducen torque, aumentan la vida de la broca y de la sarta de perforación y reducen la presión al haber reducido la fricción.

2.3.2. Limpieza del fondo del pozo

El fluido de perforación pasa a través de las boquillas o jets para expulsar los cortes de la perforación de debajo de la broca y arrastrarlos a través del anular a la superficie. Esto sirve para mantener el fondo del pozo limpio de cortes y prevenir el empacamiento de la broca (Acumulación de los cortes y embalamiento de la broca), aumentando así la vida de la broca e incrementando la eficiencia de la perforación. La efectividad del fluido de perforación en el proceso depende de factores como la velocidad de impacto al pasar por las boquillas, y la densidad y la viscosidad del lodo.

2.3.3. Control de presiones de fondo.

El peso de lodo mínimo es el óptimo para obtener ratas de perforación más rápidas y para minimizar el riesgo de dañar formaciones y perder circulación. Sin embargo, en la perforación convencional, el lodo debe tener la densidad suficiente para proteger el pozo contra las presiones de formación y para mantener la estabilidad de las paredes del pozo.

La presión ejercida en el fondo del pozo, debida al peso acumulado de la columna vertical de fluido de perforación, es conocida como la presión hidrostática del lodo. Si dicha presión hidrostática es igual a la presión de formación se dice que el pozo está en balance, si las presiones no son iguales, entonces los fluidos (Sean de formación o de perforación) se moverán hacia donde la presión sea menor.

Si la presión hidrostática es menor que la presión de formación, el pozo está en bajo balance, y por lo tanto sujeto a influjos de formación que pueden resultar en patadas y en último caso, en reventones.

Si la presión hidrostática, es mayor que la presión de formación, el pozo estará sobre

balanceado, y protegido contra influjos de fluido de formación dentro del pozo. Sin embargo, un sobre-balance muy grande, aunque controle la presión de formación, puede resultar en la invasión de lodo a la formación y hasta fracturar formaciones frágiles, perdiendo así circulación.

2.3.4. Revestir la pared del pozo con torta de lodo

A medida que el pozo va siendo perforado, el filtrado (la fracción líquida del lodo) va invadiendo las formaciones permeables. Cuando esto ocurre, las partículas de sólidos en el lodo quedan en la pared del pozo. Estas partículas se acumulan cubriendo la pared con una delgada capa impermeable de torta de lodo que se consolida con la formación e impide que se siga perdiendo fluido.

La habilidad del lodo de depositar esta capa puede ser mejorada con la adición de bentonita (y así incrementando los sólidos reactivos en el lodo) y disolventes químicos (para mejorar la distribución de los sólidos). La adición de cascarillas u otros aditivos para control de pérdidas puede ser necesaria para reducir la pérdida de la fracción líquida del fluido de perforación. Es de notar que una pérdida de filtrado excesiva tendrá como resultado una capa de torta de lodo excesivamente gruesa, reduciendo el diámetro efectivo del pozo, incrementando la posibilidad de una pega de tubería o del suaveo (swabbing) del pozo al mover hacia arriba la tubería y arrancar la torta, exponiendo nuevamente la pared del pozo. También resulta en que se invade la formación muy profundamente, y así se pierden las muestras iniciales de gas y dificulta la interpretación de los registros eléctricos.

2.3.5. Ayuda a soportar el peso de la sarta

A medida que el pozo se hace más profundo, la sarta de perforación se hace más pesada y este peso cada vez mayor debe ser soportado por el taladro. Debido al desplazamiento en el fluido de perforación, la sarta experimenta un efecto de boyancia o flotación, lo cual implica una reducción del peso que ha de soportar el equipo de perforación. Entonces al subir la densidad del lodo se puede reducir la carga en superficie en grandes profundidades.

2.3.6. Transportar y remover los cortes de perforación.

Los cortes de perforación deben ser removidos del pozo para evitar rellenar el anular y permitir el libre movimiento y rotación de la sarta de perforación. También deben llevarse hasta la superficie para el análisis geológico de la litología del pozo.

La caída de los cortes (cutting slip) ocurre porque la densidad de los cortes es superior a la del lodo. Entonces para asegurarse que los cortes sean levantados por el anular durante la circulación y aún que se mantengan suspendidos cuando se pare la circulación, el fluido de perforación debe ser tixotrópico, es decir con las propiedades de un gel.

Cuando hay circulación, los fluidos tixotrópicos son líquidos, pero capaces de arrastrar los cortes hasta superficie. Cuando no haya circulación, los fluidos tixotrópicos se gelifican para que los cortes queden suspendidos para evitar que se deslicen otra vez hasta la broca.

La fuerza del gel debe ser lo suficientemente baja para permitir la separación de los cortes y gas del lodo, además para minimizar el suaveo cuando se mueve hacia arriba la tubería, y para poder reiniciar la circulación sin elevar demasiado la presión en las bombas.

2.3.7. Transmitir energía hidráulica a la broca.

El fluido de perforación transmite la potencia hidráulica generada en la bomba en superficie a la broca. La rata de circulación debe ser tal que la potencia óptima sea usada para limpiar la superficie que está siendo perforada. La hidráulica está considerablemente influenciada por las propiedades de flujo del fluido de perforación, como la densidad, viscosidad, rata de flujo, y velocidad de flujo. La cantidad de energía gastada en la broca determina el grado al cual la hidráulica puede ser optimizada, sea para la limpieza del hueco o bien para la optimización del flujo a estado laminar.

2.3.8. Estabilidad del Pozo

Los fluidos de perforación sirven para prevenir la erosión y el colapso de la pared del pozo. Cuando se perforan formaciones porosas y permeables, la presión hidrostática evita que las formaciones inconsolidadas (como arenas) caigan dentro del pozo. Cuando se perforan shales con tendencia al hinchamiento se prefieren lodos en base aceite, pues el aceite a diferencia del agua no es absorbido por las arcillas. El lodo en base agua puede ser usado si se trata con compuestos de Ca/K/Asfalto. Para evitar la disolución de secciones saladas, se pueden utilizar lodos saturados de sal o en base aceite.

2.3.9. Protección y Evaluación de las formaciones.

Para lograr la máxima protección a las formaciones es necesario lograr los valores óptimos de todas las propiedades del fluido de perforación. Aunque algunas veces es necesario sacrificar los valores de algunas propiedades con el fin de poder analizar más profundamente las formaciones perforadas.

Los fluidos en base aceite pueden ser efectivos en mantener el agua fuera de una formación productora. Sin embargo, en formaciones con gas, puede ser más dañino que un fluido salino. Hasta cierto punto, lodos salinos y alto contenido de calcio han sido usados efectivamente para minimizar el daño a la formación.

El tipo de patrón de flujo presente en el anular puede facilitar o minimizar el daño y la erosión a los cortes durante el transporte. Son preferibles los flujos laminares suaves a los flujos turbulentos. No sólo se protege así a los cortes, sino que también se protege la pared del pozo y se reduce la presión de circulación. En forma similar la rata de penetración puede ser sacrificada con el fin de obtener valiosa información del reservorio. A esto se le llama perforación controlada, donde los parámetros de perforación se controlan con el fin de determinar aquellos cambios que son debidos a cambios de formación. (*Hawker, D., Vogt, K., & Robinson, A., 2001. Págs. 56-58*)

2.4. Fluidos de perforación más comunes

Los fluidos de perforación más comunes, son medios de circulación que llevan los cortes perforados fuera de debajo de la broca, hasta el espacio anular y de allí a la superficie. Los diversos fluidos que son usados en la perforación rotaria son:

- Aire-gas
- Espuma /fluidos aireados
- Lodos en base agua
- Lodos en emulsión de aceite
- Lodos en base aceite.



Figura 3. Lodos de perforación. (All petrol).

2.4.1. Aire gas

Tiene ventajas económicas usar aire comprimido, gas natural, gas inerte o mezclas de aire y agua en áreas de rocas duras cuando hay pocas posibilidades de encontrar grandes cantidades de agua.

Ventajas:

- Rata de perforación más alta que con cualquier otro fluido de perforación.
- Más pies por broca.

- Hueco de diámetro más exacto y menos desviado.
- Continuas pruebas de formación (excluyendo formaciones a alta presión)
- Corazonamientos sin contaminación.
- Mejores trabajos de cementación.
- Mejores trabajos de completamiento.
- Sin peligro de pérdidas de circulación.
- Sin afectar los shales.

No hay propiedades estructurales que transporten los cortes de perforación.

- La mezcla puede ser explosiva con otros gases. (Posibilidad de explosiones en fondo e incendio)
- Corrosión de la tubería.
- Cortes muy finamente pulverizados y separados irregularmente del fluido.
- Sin control de la presión.
- Sin Torta de lodo.
- Influjo de Fluidos de formación (Creando anillos de lodo y ocasionando pegas)
- No hay efecto de boyancia (incrementando el peso en el gancho)
- No hay enfriamiento ni lubricación.

2.4.2. Espuma o fluidos aireados.

Los fluidos en espuma se hacen inyectando agua y agentes espumantes en el aire o en una corriente de gas para crear una espuma viscosa y estable. También puede hacerse inyectando aire en un lodo con base en gel que contenga un agente espumante. La capacidad de transporte de las espumas viscosas depende más de la viscosidad que de la velocidad anular.

Los fluidos aireados se hacen inyectando aire o gas en un lodo con base gel. Se usan para reducir la presión hidrostática (y así evitando la pérdida de circulación en presiones con baja presión) y para incrementar la rata de penetración.

2.4.3. Lodos en Base agua.

Los lodos en base agua consisten en una fase continua de agua en la cual están suspendidos arcilla y otros sólidos (reactivos e inertes). Lo más usual es agua dulce, se consigue normalmente, es barata y fácil de controlar, aunque esté con sólidos, y es el mejor líquido para evaluar formaciones. El agua salada se usa en perforación marina dada su fácil accesibilidad.

También se usa agua salina saturada para perforar secciones de domos salinos con el fin de estabilizar la formación y reducir la erosión de las paredes del hueco.

Los sólidos reactivos son arcillas comerciales que incorporan arcillas hidratables y shales de las formaciones perforadas, las cuales están suspendidas en la fase agua. Estos sólidos pueden ser enriquecidos añadiéndoles arcillas, mejorados a través de tratamientos químicos o dañados por contaminación.

Los Sólidos inertes son sólidos químicamente inactivos, los cuales están suspendidos en la fase agua. Estos sólidos incluyen sólidos inertes provenientes de la perforación (como caliza, dolomita y arena) y sólidos para controlar la densidad del lodo como barita y galena.

Algunos lodos en base agua pueden ser clasificados como lodos inhibidos. Se le añaden productos químicos para evitar que shales sensibles se hinchen en reacción al filtrado, lo cual a la vez perjudica la permeabilidad de una zona productiva con excesivos depósitos de arcilla.

También se usan para arcillas que se derrumben, en hueco estrecho y en situación de pega de tubería. La sal es un inhibidor de lodo que puede ser usado efectivamente para reducir la reactividad de los shales. Estos lodos son particularmente efectivos en evitar problemas de perforación asociados a shales hinchables.

Lodo nativo es una combinación de sólidos perforados en agua. A medida que continua la perforación, el lodo es tratado químicamente para que adquiera propiedades especiales.

Ventajas:

- Mayor facilidad de perforación cuando se usa agua dulce (La perforabilidad se incrementa con la pérdida de agua y con la disminución de densidad y viscosidad)
- Menos caro que los lodos base aceite.

Desventajas:

- Daño potencial a la formación.
- Sujeto a la contaminación.
- Afectado adversamente por las altas temperaturas.

2.4.4. Lodos en Emulsión de Aceite

Estos lodos son lodos en base agua que contienen aceite emulsificado disperso o suspendido en una fase continua de agua. Los lodos en emulsión son menos costosos que los lodos en base aceite, y poseen muchos de los beneficios de estos.

2.4.5. Lodos en Base Aceite

Los lodos en base aceite consisten en una fase continua de aceite en la cual están suspendidos arcilla y otros sólidos. En los lodos de emulsión inversa el agua está suspendida en una fase continua de aceite.

Los lodos base aceite son usados en operaciones especiales de perforación, como perforando en temperaturas extremadamente altas, en formaciones muy sensibles al agua donde no se pueden usar lodos en base agua, y en la penetración de zonas productivas que podrían ser dañadas por lodos base agua.

Ventajas:

Minimiza el daño a la formación

- Evita la hidratación de las arcillas.
- Provee mejor lubricación (Reduce el torque, el arrastre y la pega de tubería)
- Minimiza la corrosión de la tubería
- Estabilidad en altas temperaturas.

Desventajas:

- Susceptible a contaminación con agua, aireamiento y espumamiento.
- Inflamable.
- Significativamente más caro que los lodos en base agua.
- Ensuciador y peligroso.
- No amistoso ambientalmente (En caso de derrame y cuando se descarta)

En años recientes, los aceites minerales han ido reemplazando al petróleo como la base para estos lodos. Aunque proveen muchas de las mismas propiedades y ventajas para la perforación, son amistosos con el medio ambiente y con el personal del taladro que tiene que manejarlo. (*Hawker, D., Vogt, K., & Robinson, A., 2001. Págs. 59-62*)

2.5. Reología básica del lodo

2.5.1. Densidad del lodo

La densidad del lodo es el factor, considerado independientemente, más importante para controlar las presiones de formación a lo largo de toda la profundidad del pozo.

Para un pozo balanceado, la presión de formación no debe exceder la presión hidrostática ejercida por la columna de lodo.

En Unidades SI

Presión Hidrostática [Kpa] = Prof pozo [m] x Dens Lodo o [kg /m] x 0.00981 3

En Unidades Inglesas.

Presión Hidrostática [p si] = Prof. Pozo [ft] x Dens Lod o [lb / Gal] x 0.05 2

La barita es el sólido más comúnmente usado para incrementar la densidad del lodo. Para un optima disolución o reducción de densidad, los lodos densificados se tratan químicamente. Cuando los productos químicos no funcionan, se puede ser añadir agua para reducir el peso del lodo y para recuperar el agua que se haya perdido. Las centrífugas pueden ser utilizadas para remover del lodo las partículas sólidas que estén en exceso.

La densidad del lodo se mide en una balanza, donde se pesa un volumen exacto de lodo, sin sólidos ni burbujas.



Figura 4. Medición de la densidad del lodo (Datalog, 2001).

2.5.2. Viscosidad del Lodo

La viscosidad del lodo mide la resistencia al flujo del lodo de perforación (dicho de otra manera, la resistencia interna debida a la atracción de las moléculas de líquido); entre mayor

sea la resistencia, mayor será la viscosidad. La viscosidad entonces es la resistencia del fluido al movimiento, y debe ser suficientemente alta para que el lodo pueda mantener limpio el pozo y arrastre los cortes hasta la superficie.

Es importante hacer notar de todas maneras, que las viscosidades más bajas permiten mayor velocidad de penetración. Igualmente, lodos de perforación de baja viscosidad implican menores densidades equivalentes de circulación (es decir, el incremento en la presión de fondo debido a las pérdidas por fricción que ocurren cuando circula el lodo).

Una medida simple de viscosidad es la viscosidad de embudo (funnel viscosity), la hace el encuellador usando un embudo de Marsh. La medida es sencillamente el tiempo (en segundos) requerido para que el fluido ($\frac{1}{4}$ de galón) fluya a través de un orificio calibrado. Los viscosímetros rotacionales, como los que se muestran abajo, se usan para determinar más exactamente la reología, midiendo los esfuerzos de corte que resultan de aplicar varias ratas de corte.



Figura 5. Embudo para medir la viscosidad del lodo (Datalog, 2001).

2.5.3. Filtrado y pérdida de fluido

La pérdida de fluido se mide para determinar el volumen de filtrado (la fracción líquida del lodo de perforación que invade la formación cercana a la pared del pozo). Una excesiva pérdida de fluido puede deshidratar al lodo, en tal caso, el lodo debe ser tratado para restaurar su debido balance. Dependiendo de la composición química del filtrado y de las formaciones, una pérdida alta de fluido puede ocasionar problemas de hueco (pega de tubería o derrumbes) y dañar una formación productora bloqueando los poros y sus conductos de interconexión. Para reducir la pérdida de fluido se pueden usar disolventes químicos y otros productos como bentonita.

2.5.4. Geles

La medida de los geles implica las fuerzas de atracción de las partículas suspendidas cuando el fluido está estático. Entonces así se determina la facilidad del fluido para desarrollar la estructura de un gel en el momento en que cesa de moverse. Su propósito es soportar los cortes y los sólidos en suspensión en el lodo cuando pare la circulación, de forma que no se hundan nuevamente en el pozo y se depositen alrededor del BHA y de la broca, o se produzca una distribución desigual del lodo, lo cual resultaría en una mala hidráulica y en una presión errática.

Pero el valor del Gel debe ser lo suficientemente bajo para permitir que el gas disuelto y los cortes de perforación puedan ser separados en la superficie, para minimizar el efecto de suaveo (swabbing) cuando se sube la tubería (evitando una condición bajo balance) y pueda reanudarse la circulación sin una presión alta de bombas (la cual podría fracturar una formación frágil). El valor de los geles puede reducirse reduciendo el contenido de sólidos o añadiendo un defloculante adecuado.

2.5.5. Viscosidad Alta contra Viscosidad Baja y valores de geles

Cuando los valores de viscosidad y geles son altos, sucede que:

- Se necesita mayor presión para romper circulación.

- Hay mayores presiones de suaveo (Swab) y de surgencia (Surge).
- Hay mayores pérdidas de presión en el anular.
- Hay mejor transporte de gases y cortes de perforación.

Cuando los valores de viscosidad y geles son bajos, sucede que:

- Hay muy mala limpieza de pozo y mala remoción de los cortes de perforación.
- Mala suspensión de cortes y sólidos cuando se detiene la circulación.

2.5.6. Filtrado y pérdida de fluido

La pérdida de fluido se mide para determinar el volumen de filtrado (la fracción líquida del lodo de perforación que invade la formación cercana a la pared del pozo). Una excesiva pérdida de fluido puede deshidratar al lodo, en tal caso, el lodo debe ser tratado para restaurar su debido balance. Dependiendo de la composición química del filtrado y de las formaciones, una pérdida alta de fluido puede ocasionar problemas de hueco (pega de tubería o derrumbes) y dañar una formación productora bloqueando los poros y sus conductos de interconexión. Para reducir la pérdida de fluido se pueden usar disolventes químicos y otros productos como bentonita.

2.5.7. Torta de Lodo

La torta de lodo es una capa de sólidos del lodo depositada en las paredes del hueco a medida que el filtrado ha entrado en formaciones permeables en un pozo sobre balanceado. Al revestir las secciones permeables de la pared del hueco, la torta de lodo ayuda a consolidar la formación, evitando mayor invasión de fluido y minimizado la pérdida de fluido.

En formaciones extremadamente permeables, los sólidos del lodo pueden no ser suficientes para revestir la pared del pozo. En estos casos excepcionales, los sólidos del lodo pueden entrar a la formación y bloquear los conductos interporales, por lo tanto, dañando la permeabilidad de la formación.

Es preferible una torta delgada y dura a una gruesa y blanda. Una torta excesivamente gruesa reduce el diámetro efectivo del pozo e incrementa la

posibilidad de una pega de tubería, o de suaveo (Swabbing) del pozo cuando se mueve tubería. En general, entre más alta sea la pérdida de fluido, más gruesa será la torta resultante.

2.5.8. Nivel de pH del lodo

El nivel de pH del lodo debe ser constantemente vigilado con el fin de mantener suficiente alcalinidad y reducir la corrosión en la tubería. Para incrementar o mantener el pH, frecuentemente se usa adicionar soda cáustica. Un beneficio adicional de vigilar el pH del lodo es la detección de sulfuro de hidrógeno(H_2S), o al menos que hubo presencia.

Con el fin de capturar el H_2S en el caso que se introduzca en el pozo, se añaden al lodo limpiadores como carbonato de cobre, compuestos de zinc y derivados de hierro. Esto tiene como consecuencia la formación de sulfuros y sulfatos y la liberación de iones de hidrógeno.

Los iones de hidrógeno suben la acidez del lodo lo cual implica una caída en el pH. Entonces al monitorear el pH del lodo se puede saber que ha entrado H_2S al pozo pero que los limpiadores lo han eliminado exitosamente antes que el lodo llegue a superficie.

2.5.9. Salinidad del Lodo

Un cambio significativo en la salinidad del lodo, cuando no se han usado aditivos salinos para tratar el lodo, indica que se ha penetrado una formación salina. El contenido salino del lodo puede incrementarse para estabilizar la formación salina y reducir el lavado de las paredes del pozo como resultado de que la formación se esté disolviendo en el lodo. Los lodos en agua salada deben estar preferiblemente saturados, con el mismo tipo de sal de la formación. (Hawker, D., Vogt, K., & Robinson, A., 2001. Págs. 63-66)

2.6. Causas de los brotes

Brote: es la entrada de fluidos provenientes de la formación al pozo, tales como aceite gas o agua (Mezcla gas/aceite). Al ocurrir un brote, se desaloja una cantidad de lodo de perforación si dicho brote no es detectado, ni corregido a tiempo, se podrá producir un reventón o descontrol.

Descontrol: es un brote de fluidos, el cual no se puede manejar a voluntad. Los brotes ocurren como resultado de la presión de formación es mayor que la ejercida por presiones hidrostáticas del lodo, lo cual causa que los fluidos del yacimiento fluyan hacia el interior de un pozo.

2.6.1. Presión hidrostática

Es la presión ejercida por una columna de fluido, a una profundidad vertical dada, que actúa en todas direcciones. Para una densidad dada se puede calcular la presión hidrostática con las siguientes ecuaciones:

$$P_H \left(\frac{lb}{pg^2} \right) = \text{Gradiente del lodo} \left(lb / \frac{pg^2}{pie} \right) \times \text{profundidad vertical}$$

$$P_H \left(\frac{lb}{pg^2} \right) = 0.052 \times \text{Densidad} (lb/gal) \times \text{profundidad vertical}$$

$$P_H \left(\frac{kg}{cm^2} \right) = \frac{\text{Profundidad vertical (m)} \times \text{densidad (gr/cm}^3\text{)}}{10}$$

La definición matemática de esta ecuación esta expresada como: “La presión Hidrostática es igual al gradiente de presión por la profundidad vertical del punto de interés”

2.6.2. Aire o gas en el lodo

En equipo, cuando la línea de flujo aparece el lodo cortado por aire o gas, se debe tener en cuenta la posibilidad de un inminente brote. Es muy importante conocer las

diferentes causas de la presencia del gas o el aire en el lodo y tener un juicio correcto para controlar la situación.

Debido al decremento de la presión hidrostática que se encuentra actuando al entrar gas al lodo de perforación, cada burbuja de gas se expande desde su volumen original a condiciones de fondo, a un volumen dependerá de su posición en el espacio anular.

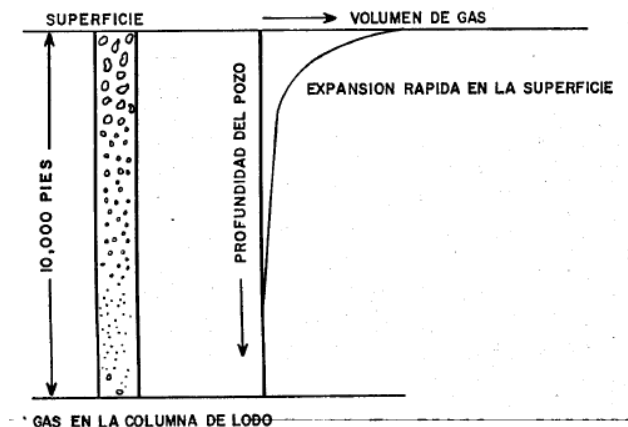


Figura 6. Expansión de gas en la boca del pozo (Benítez, 1979).

A medida que transcurre el tiempo, el gas se expande cientos de veces conforme las burbujas suben a la superficie en su volumen y reducirá su densidad en la línea de flujo y el espacio anular de manera considerable. Sin embargo, este efecto en la densidad estará limitado a la longitud de la columna del lodo por lo cual el efecto reducido de la presión hidrostática a la profundidad será mínimo.

Las tres causas por la que se manifiesta un lodo cortado con gas o aire en la línea de flujo son: durante la circulación se forma una gran cantidad de espuma en el lodo; gas liberado de los cortes; o flujo de gas de la formación.

Si el lodo cortado por aire está circulando, el aire atrapado será compresionado a volúmenes despreciables a la presión de fondo y solamente se expandirá su volumen original cuando se circule a la superficie.

La reducción en la densidad debido a esta causa tendrá efectos mínimos sobre la presión hidrostática y el aumento de volumen de lodo en las presas será mínimo a consecuencia de circular aire en el lodo, disminuyendo la eficiencia del bombeo. En esta situación puede corregirse reduciendo el punto de cedencia y la gelatinosidad, la adición de un reactivo apropiado, o por eliminación mecánica del aire.

Si la reducción en la densidad del lodo en la línea de flujo es debida a la liberación de gas en los cortes provienen de una formación porosa saturada de gas, la presión hidrostática decrecerá. Este fenómeno no se puede evitar, pero no presenta peligro si los cortes son pequeños. Sin embargo, si la formación se perfora rápidamente, el desprendimiento de gas puede ser apreciable, tanto que puede ocasionar un brote imprevisto. *(Benítez, 1979)*

2.6.3. Densidad insuficiente del lodo

Es una de las causas predominantes por las que se origina los brotes. En los últimos años se ha hecho énfasis en perforación con densidades de lodo mínimas con el objeto de optimizar las velocidades de penetración.

Sin embargo, cuando se perfora una zona permeable mientras se usan densidades mínimas de lodo, los fluidos de la formación pueden fluir hacia un pozo y puede producirse un brote.

Los brotes causados por densidades insuficientes de lodo pudieran padecer tener la solución obvia de perforación con densidades de lodo altas; sin embargo, no es lo más variable por varias razones:

- Se puede exceder el gradiente de fractura de la formación e inducir una pérdida de circulación.
- Se incrementa el riesgo de tener pegaduras por presión diferencial.

Se reduce significativamente la velocidad de penetración. Por lo tanto, la mejor solución sería mantener la presión hidrostática ejercida por el lodo ligeramente mayor que la presión de formación. *(González, 2018)*

2.7. Medidas de la densidad del lodo en el campo

En el campo, la densidad del fluido se determina por medio de una balanza convencional. La balanza, que debe ser un instrumento permanente en cada pozo.



Figura 7. Balanza para medir a densidad del lodo (Fluidos de control, tomo 3).

La mayoría de las balanzas tienen una regla graduada de tal manera que se puede leer la densidad directamente, en diferentes unidades, lb/gal, lb/pie³, gr/cm³, o sea la densidad específica del fluido, así como el gradiente de presión correspondiente. Recientemente se ha desarrollado una nueva balanza presurizada (tru-watecup) que ha sido aprobada por el A.P.I. para medir la densidad de los fluidos de perforación. Esta balanza se utiliza primero para determinar la densidad de lechadas de cemento que contenían aire o espuma. Es efectiva, pues elimina el efecto de las burbujas de gas atrapadas y determina la densidad real.

La práctica de verificar la densidad del lodo en el campo puede dar datos erróneos.

Los errores en el reporte del lodo pueden causar: pérdida de circulación y altos costos en la perforación.

Las causas comunes de estos errores son:

a) La balanza descalibrada

- Debido a partes de cemento o lodo seco en la copa.
- Debido a pérdida de metal en la copa.

b) Aire o gas en el lodo

- Debido a flujo de gas o gas en los cortes.
- Debido a espuma
- Debido a alto valor de cedencia y gelatinosidad.
- Por aereacion en el equipo superficial.

c) ERRORES DE PROCEDIMIENTO

- La copa no fue llenada apropiadamente.
- El bulbo no fue centrado correctamente
- Lectura apresurada de la densidad. (*Benítez, 1979*)

2.8. CONTROL DE LA DENSIDAD

Uno de los principales problemas es mantener la densidad del lodo dentro de determinado rango.

Los sólidos perforados que no sean separados en la primera circulación, en la superficie, proseguirán y causarán efectos adversos en la densidad del lodo y en otras propiedades.

El primer paso para la eliminación de sólidos en el fluido de perforación es hacerlo pasar por vibradores que eliminan los recortes grandes. Las mallas de 80 - 100, eliminan las partículas finas. Se puede mejorar la separación utilizando floculantes químicos, desarenadores y limpiadores para lodos ligeros, o centrifugas para lodos pesados. Para tener un buen control de los sólidos en el lodo, el equipo utilizado debe estar apropiadamente instalado, tener suficiente capacidad y ser operado continuamente. La instalación correcta de la succión y la descarga de cada equipo, por compartimientos separados es preferible a que estén en serie.

Para obtener mejores resultados se recomienda instalar en paralelo, dos o más juegos de los dispositivos mencionados.

Por regla general se debe instalar un equipo para procesar del 120 al 150% del valor máximo de lodo esperado. La única excepción a esta regla es que la capacidad efectiva de las centrifugas debe ser de 8 a 15% mayor del valor del flujo esperado.

Además del equipo para remover sólidos se debe contar con dispositivos para la adición de sustancias flocculantes que auxilien a remover las partículas micrométricas y a controlar la densidad del lodo. Los flocculantes comúnmente usados para lodos de bajo contenido de sólidos no dispersos, también son compatibles y aplicables a los lodos dispersos y a los salados.

Otra manera de controlar la densidad del lodo es mediante la adición de agua. Únicamente hay que tener cuidado de que un exceso de agua puede causar una excesiva dilución, que resulta en un elevado costo de tratamiento.

Una práctica recomendada es remover periódicamente los sólidos asentados del fondo de las presas. La medida de la densidad del lodo, en la línea de flujo, es reflejo de la presión hidrostática en el espacio anular y depende en gran parte de la velocidad de perforación.

La medida de la densidad del lodo en las presas de succión es el reflejo de la efectividad del sistema de separación de sólidos y debe conservar las especificaciones del lodo. Resumiendo, los requerimientos en el campo para el control de la densidad del lodo son:

1.- Equipo efectivo para remover sólidos.

- Vibradores de alta velocidad, con mallas finas.
- Desarenadores con suficiente capacidad.
- Limpiadores de lodo.
- Centrifugas.

2.- Flocculantes químicos en el flujo.

- Experimentar el mejor flocculante para el área y continuar su aplicación.

3.- Controlar el valor de la velocidad de perforación.

4.- Dilución por agua y nueva mezcla de lodos.

- Agregar agua, en volúmenes mínimos, solo en la línea de flujo.

- Mezclar lodos nuevos en tanques de reserva, con la mínima concentración de aditivos. (Benítez, 1979)

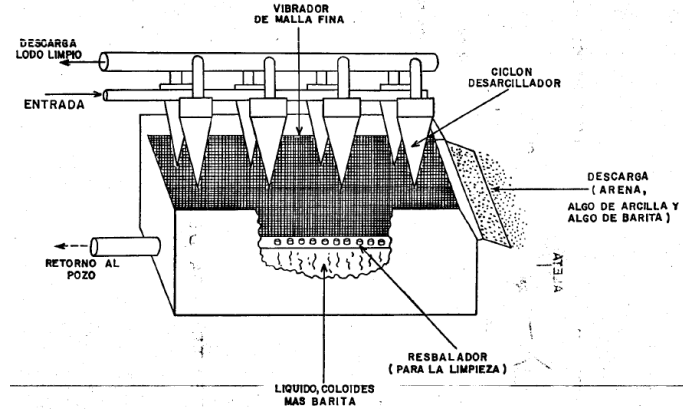


Figura 8. Limpiador de lodo (Benítez, 1979).

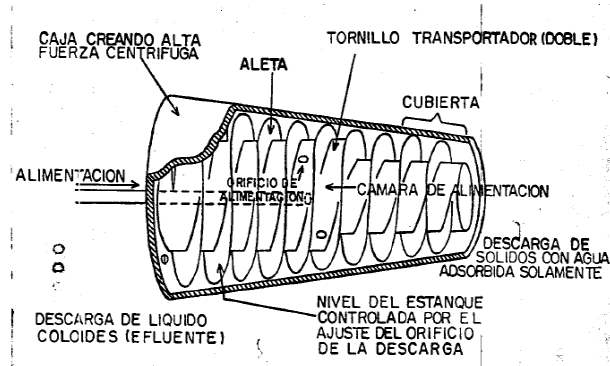


Figura 9. Centrifuga decantadora (Benítez, 1979).

2.8.1. Peso del lodo para matar

El peso del lodo para matar debe ser exacto para lograr un equilibrio con la presión de la formación (sin margen de sobre balance o factor de seguridad). El peso para del lodo para matar se calcula usando la presión de cierre de la tubería de perforación.

$$KMW = [SIDP * (0.052) * D] / (SG - 1)$$

Dónde:

- KMW = Peso del lodo para matar [ppg]
- SIDP = Presión de cierre de la TP [psi]

- TVD = Profundidad vertical verdadera [ft]
- OMW = Peso del lodo original [ppg]

2.9. Simulación de control de pozos

Existe un importante soporte documentado para la eficacia del uso de la simulación en el entrenamiento del equipo de trabajo de perforación. Los ejercicios de simulación son efectivos en el entrenamiento para las operaciones de perforación por varias razones. Cuando se encuentran en un trabajo de alta exigencia los trabajadores tienen un alto nivel de estrés por tal motivo la presión del tiempo es un factor importante que debe estar integrado en la simulación. La presión del tiempo es un factor clave en situaciones de perforación y un componente crítico que afecta la toma de decisiones. Por el contrario, los informes obtenidos en una sala de conferencias no transmiten ninguna sensación de tiempo o urgencia, aunque puede ser una buena forma de presentar ciertos tipos de información o de conducir una discusión.

Con la simulación es posible crear escenarios alrededor de un problema específico, de esta manera se puede interactuar con incidentes y problemas que se han presentado en el pasado, para generar buenas prácticas en las operaciones de control a partir de las lecciones aprendidas de los accidentes del pasado. Esto genera que a través del estudio de casos la simulación es probable que sea preferible para las personas de práctica orientadas a la acción porque reproduce las muchas acciones, reacciones e interacciones simultáneas que ocurren tanto en operaciones normales como de crisis, presenta una mejor reproducción de las operaciones la reunión informativa, brinda un paso atrás para que los participantes revisen las acciones y decisiones y determinen el mejor camino a seguir en situaciones futuras, para abordar cuestiones de equipo y de comportamiento para rediseñar los protocolos de comunicación y plantear cuestiones de procedimiento.

Hasta hoy existen muchos softwares para la simulación de control de pozos que tiene un costo elevado debido a sus características. Uno de los mayores atributos del software avanzado es la capacidad de entrenamiento proveedores a medida de

ejercicios sobre la base del mundo real eventos para enfatizar las lecciones aprendidas en el campo. El contenido de un curso de control de pozos es flexible, pero se enfoca en ejercicios progresivamente difíciles para lo cual los participantes deben desarrollar soluciones de equipo. En una desviación de la instrucción tradicional de software básico, no se requiere examen de salida y los participantes son juzgados por su participación y trabajo en equipo. Los softwares avanzados no están destinados a reemplazar la capacitación específica del sitio, el objetivo para todos los interesados se fomenta cuando el previenen las características y desafíos de un particular bien, esto genera una pre planificación adicional para tomar medidas y mitigar los errores los procedimientos al momento de presentarse una situación. Existen varios softwares en el mercado que ofrecen ambientes de simulación muy cercanos a la realidad cada uno tiene diferentes características que van en función de lo que el usuario desee saber. (*Golding, 2016*).

2.10. LabVIEW

LabVIEW es el acrónimo de Laboratory Virtual Instruments Engineering Workbench. Es un lenguaje y a la vez un entorno de programación grafica en el que se pueden crear aplicaciones de una forma rápida y sencilla.

National Instruments es la empresa desarrolladora y propietaria de LabVIEW, comenzó en 1976 en Austin, Texas y sus primeros productos eran dispositivos para el bus de instrumentación GPIB.

2.10.1. Entorno

LabVIEW es una herramienta de programación gráfica. Originalmente este programa estaba orientado a aplicaciones de control de instrumentos electrónicos usados en el desarrollo de sistemas de instrumentación, lo que se conoce como instrumentación virtual. Por este motivo los programas creados en LabVIEW se guardarán en ficheros llamados VI y con la misma extensión, que significa instrumento virtual (Virtual Instruments). También relacionado con este concepto se da nombre a sus dos ventanas principales: un instrumento real tendrá un Panel

Frontal donde estarán sus botones, pantallas, etc., y una circuitería interna. En LabVIEW estas partes reciben el nombre de Panel Frontal y Diagrama de Bloques respectivamente.

- **Panel Frontal**, es la parte que vera el usuario, suele tener fondo gris.

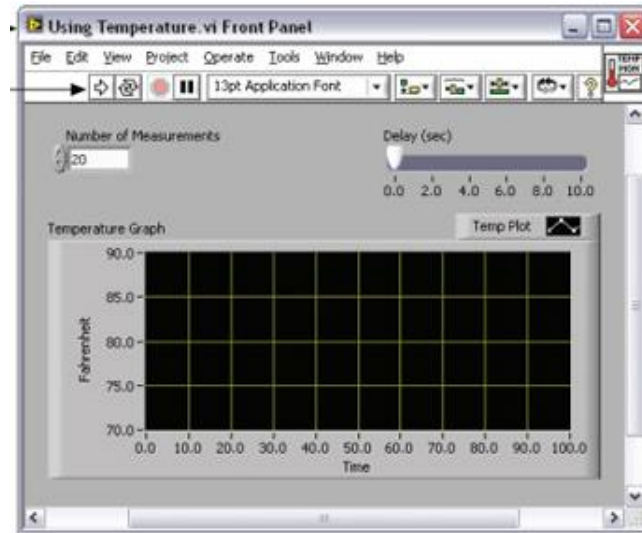


Figura 10. Panel Frontal (NI)

- **Diagrama de Bloques**, es donde se realizará la programación y suele tener fondo blanco.

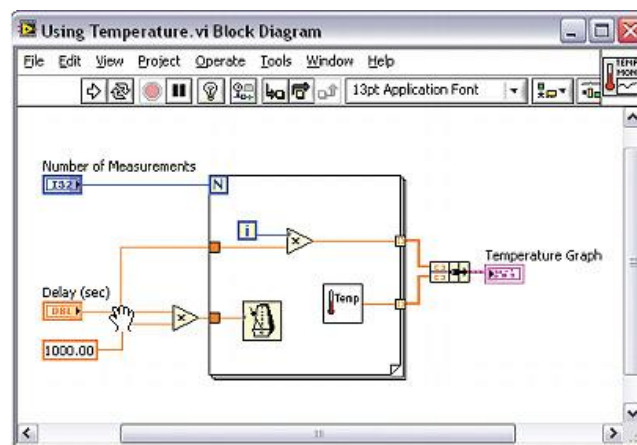


Figura 11. Diagrama de Bloques. (NI)

El panel frontal y diagrama de bloques están conectados a través de los terminales (elementos que sirven como entradas o salidas de datos).

2.10.2. Estructuras

Las instrucciones de control permiten a un programa ejecutar un código de forma condicional o repetirlo cierto número de veces.

En LabVIEW estas instrucciones son estructuras que encierran en su interior el código al que afectan. Se encuentran en el menú Programming > Structures.

2.10.2.1. SEQUENCE

En los lenguajes tradicionales basados en texto, el orden de ejecución se corresponde con el orden en que las instrucciones están escritas. Ya se ha visto que el sistema de ejecución de LabVIEW sigue el modelo de flujo de datos (dataflow), un nodo necesita tener disponibles los datos en todas sus entradas para ejecutarse, pero si hay dos nodos en condición de ejecutarse no se podrá determinar, en principio, el orden de ejecución; esto en la mayoría de los casos no será un problema, es más, será incluso beneficioso. No obstante, puede haber ocasiones en que haya nodos independientes, ambos en situación de ejecutarse, pero se necesita fijar el orden de los mismos.

Las estructuras de tipo SEQUENCE sirven precisamente para esto: ordenan el orden de ejecución del código que está en su interior.

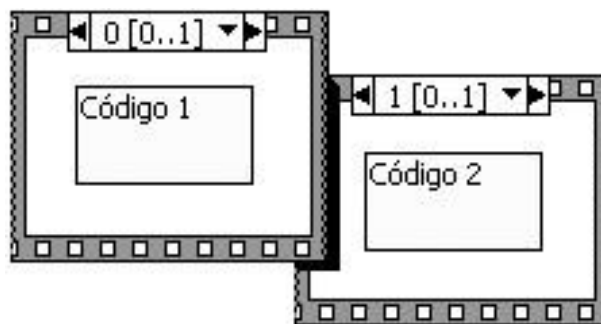


Figura 12. estructuras de tipo SEQUENCE (Lajara, Pelegri, 2007)

El menú contextual puede desplegarse presionando con el botón secundario del ratón en el borde de la estructura, este menú permite crear frames antes y después del mostrado, además de otras opciones. La opción Sequence Local crea unos

‘túneles’ entre un frame y los demás para compartir datos, en uno de ellos se escribirá un valor (simbolizado con una flecha hacia el exterior del frame) y en los posteriores podrá leerse (con una flecha hacia el interior), no se podrá leer en frames anteriores al de escritura.

2.10.2.2. CASE

La estructura CASE es el equivalente a varias de los lenguajes basados en texto: IF, SWITCH y TRY. Su utilidad es ejecutar un código u otro dependiendo de una condición.

Al igual que una estructura SEQUENCE, en este caso también se tiene un menú en la parte superior donde se puede elegir el subdiagrama que se muestra. En este menú se puede ver la condición para ejecutar el código del subdiagrama correspondiente. En la Figura 13 se muestra un CASE con dos subdiagramas, uno se ejecutará cuando la condición que se evalúa sea FALSE y otro cuando sea TRUE.

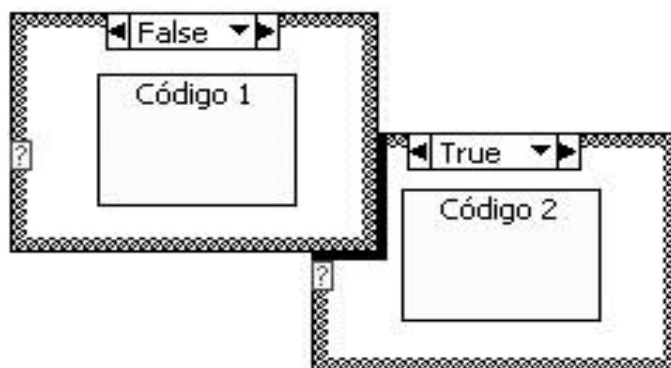


Figura 13. Estructura CASE (Lajara, Pelegri, 2007)

El terminal que aparece en el lado izquierdo marcado con el símbolo «?» es llamado selector. El valor que llega a este selector es la condición que se evalúa para seleccionar el subdiagrama a ejecutar. Si el tipo de datos que se conecta al selector del CASE es booleano, éste actuará como una sentencia IF...THEN...ELSE de un lenguaje de texto tradicional. También pueden conectarse otros tipos de datos, en este caso actuará como un SWITCH...CASE. Pueden conectarse al selector datos booleanos, numéricos (incluidos enum y ring), strings y clusters de error.

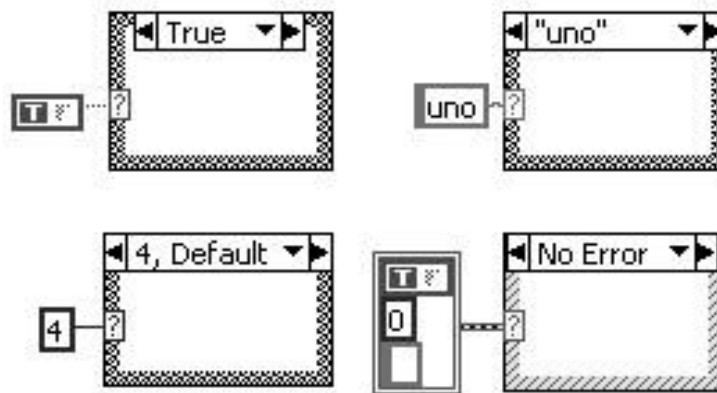


Figura 14. Tipos de datos que son válidos en un CASE (Lajara, Pelegri, 2007)

Para un selector booleano sólo se tendrán dos casos: verdadero o falso. Para numéricos la condición será que el dato del selector sea igual al mostrado en el menú del CASE, para datos enumo ringse puede escribir el nombre del ítem en lugar del valor numérico. Con los strings sucede lo mismo que con los numéricos enumo ring, el valor mostrado en el menú aparecerá como un texto encerrado en comillas dobles. En el caso de conectar al selector un cluster de error cambiará el color del borde de la estructura, los subdiagramas se ejecutarán dependiendo de si el selector marca un error o no.

2.10.2.3. WHILE

El bucle WHILE repetirá el código de su interior hasta que se cumpla una condición, la cual es evaluada en cada iteración.

En él se aprecian dos terminales:

El terminal de iteración es el cuadrado azul con el símbolo «i». El valor de este terminal es un número entero que irá aumentando en una unidad por cada iteración del bucle, empezando a contar desde cero.

La condición de stop es el terminal verde de la esquina inferior derecha de la imagen. A este terminal se podrá conectar bien un valor booleano, bien un clusterde error. A través del menú contextual podrá elegirse para los booleanos que el bucle se detenga cuando el valor sea True(Stop if True) o False(Continue if True), en el

caso de los cluster de error sucede algo parecido con Stop on Error y Continue while Error.



Figura 15. Estructura WHILE (Lajara, Pelegri, 2007)

2.10.2.4. FOR

El bucle FOR es muy parecido al WHILE, también repite el código de su interior un número de veces, pero a diferencia del anterior este número es fijado a priori y no puede cambiarse una vez empieza a ejecutarse.

Consta de dos terminales numéricos:

El terminal de iteración se sitúa igual que en el bucle WHILE, está en el interior de la estructura y se va incrementando en una unidad por cada iteración empezando desde cero.

El terminal de cuenta está colocado en la esquina superior izquierda de la estructura simbolizado con una «N». En él se conectará un valor numérico que será el que fije el número de repeticiones del bucle.

Todo lo dicho en la explicación del bucle WHILE respecto a los shift register, los

Feedback Nodesy la salida indexada también es válido para el FOR. Tanto en el menú contextual del WHILE como del FOR se tiene la opción de sustituir uno por el otro.

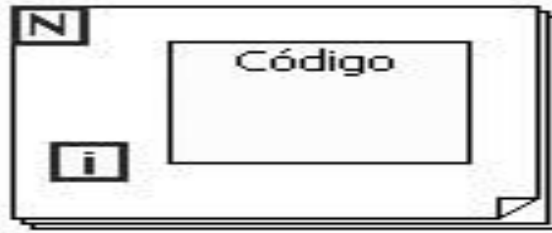


Figura 16. Estructura FOR (Lajara, Pelegri, 2007)

Los túneles indexados son la opción por defecto en los bucles FOR. Cuando se cablea un array de forma indexada como entrada puede obviarse el terminal de cuenta porque se toma el tamaño del array como el número de veces que se ha de repetir el bucle.

2.10.2.5. EVENT

La estructura EVENT es una estructura muy útil en VIs con los que interactúa el usuario porque mejora la eficiencia del programa.

Al igual que la estructura CASE tienen varios subdiagramas y un menú en la parte superior para cambiar el que se muestra. En este menú también se tiene una condición que hace que el código del subdiagrama correspondiente se ejecute. La diferencia con CASE es que EVENT detiene la ejecución del hilo del programa hasta que se da esa condición, es decir, congela el programa hasta que ocurre un evento.

En la esquina superior izquierda tiene un terminal llamado Event Timeout que se usa en el evento por defecto: el Timeout. El código del diagrama para el evento timeout se ejecutará cuando pase el número de milisegundos indicados en el terminal Event Timeout.



Figura 17. Estructura EVENT (Lajara, Pelegri, 2007)

Para añadir más subdiagramas hay que proceder de igual manera que con CASE, es decir, a través del menú contextual. Cada diagrama debe tener asociados uno o varios eventos, éstos se configuran desde la ventana Edit Events.

En esta ventana primero se muestra el número del diagrama (Events Handled for Case) y a continuación la lista de los eventos que pueden dar lugar a la ejecución del diagrama (Event Specifiers), para añadir o eliminar eventos se usan los botones de la izquierda. Para definir un evento primero hay que especificar su fuente en Event Sources, los eventos de las secciones Applicationy This Vle están predefinidos y son acciones típicas, como cerrar la ventana, presionar una tecla, etc. La fuente de eventos Dynamicsólo está disponible cuando se activa Show Dynamic Event Terminalsy se cablean convenientemente, para más información se puede consultar el tema dedicado a programación multihilo; Panes se activa cuando el Panel Frontal se divide en varias partes, Splitterssólo se activa cuando hay uno de estos elementos en el Panel Frontal y finalmente Controls muestra una lista de todos los controles que hay en el VI. En Eventsse podrá elegir el evento concreto asociado a la fuente seleccionada. (Lajara, Pelegri, 2007)

2.11. Arduino uno

Arduino es una placa con un microcontrolador ATmega328P y con toda la circuitería de soporte, que incluye, reguladores de tensión, un puerto USB (En los últimos modelos, aunque el original utilizaba un puerto serie) conectado a un módulo adaptador USB-Serie que permite programar el microcontrolador desde cualquier PC de manera cómoda y también hacer pruebas de comunicación con el propio chip.

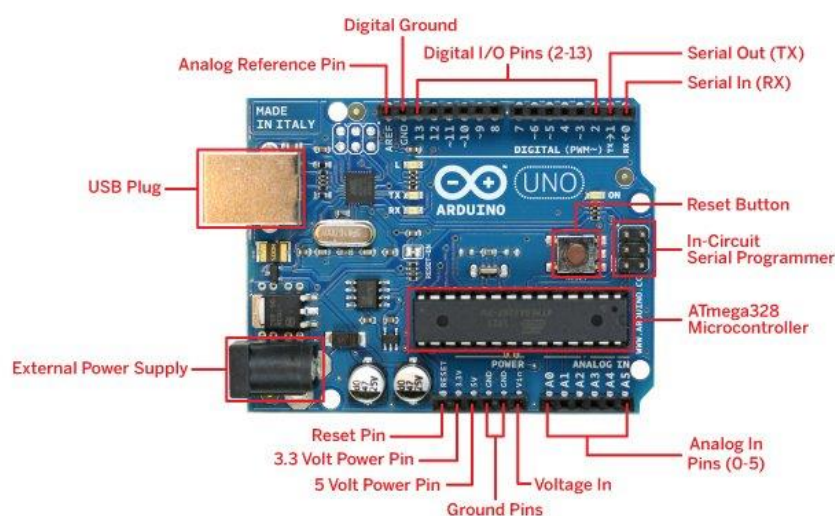


Figura 18. Placa Arduino Uno (Tecnología Robótica).

Un Arduino dispone de 14 pines que pueden configurarse como entrada o salida y a los que puede conectarse cualquier dispositivo que sea capaz de transmitir o recibir señales digitales de 0 y 5 V.

También dispone de entradas y salidas analógicas. Mediante las entradas analógicas podemos obtener datos de sensores en forma de variaciones continuas de un voltaje. Las salidas analógicas suelen utilizarse para enviar señales de control en forma de señales PWM.

Microcontrolador	Atmega328
Voltaje de operación	5V
Voltaje de entrada (Recomendado)	7 – 12V
Voltaje de entrada (Límite)	6 – 20V
Pines para entrada- salida digital.	14 (6 pueden usarse como salida de PWM)
Pines de entrada analógica.	6
Corriente continua por pin IO	40 mA
Corriente continua en el pin 3.3V	50 mA
Memoria Flash	32 KB (0,5 KB ocupados por el bootloader)
SRAM	2 KB
EEPROM	1 KB
Frecuencia de reloj	16 MHz

Figura 19. Características técnicas de Arduino Uno (*Características – Arduino, 2013*).

2.11.1. Entradas y salidas

Cada uno de los 14 pines digitales se puede usar como entrada o como salida. Funcionan a 5V, cada pin puede suministrar hasta 40 mA. La intensidad máxima de entrada también es de 40 mA.

Cada uno de los pines digitales dispone de una resistencia de pull-up interna de entre 20K Ω y 50 K Ω que está desconectada, salvo que se indique lo contrario.

Arduino también dispone de 6 pines de entrada analógicos que trasladan las señales a un convertor analógico/digital de 10 bits.

2.11.2. Pines especiales de entrada y salida

- RX y TX: Se usan para transmisiones serie de señales TTL.
- Interrupciones externas: Los pines 2 y 3 están configurados para generar una interrupción en el ATmega. Las interrupciones pueden dispararse cuando se encuentra un valor bajo en estas entradas y con flancos de subida o bajada de la entrada.
- PWM: Arduino dispone de 6 salidas destinadas a la generación de señales PWM de hasta 8 bits.

- SPI: Los pines 10, 11, 12 y 13 pueden utilizarse para llevar a cabo comunicaciones SPI, que permiten trasladar información full dúplex en un entorno Maestro/Esclavo.
- I²C: Permite establecer comunicaciones a través de un bus I²C. El bus I²C es un producto de Phillips para interconexión de sistemas embebidos. Actualmente se puede encontrar una gran diversidad de dispositivos que utilizan esta interfaz, desde pantallas LCD, memorias EEPROM, sensores.

2.11.3. Alimentación de un Arduino:

Puede alimentarse directamente a través del propio cable USB o mediante una fuente de alimentación externa, como puede ser un pequeño transformador o, por ejemplo una pila de 9V. Los límites están entre los 6 y los 12 V. Como única restricción hay que saber que si la placa se alimenta con menos de 7V, la salida del regulador de tensión a 5V puede dar menos que este voltaje y si sobrepasamos los 12V, probablemente dañaremos la placa.

La alimentación puede conectarse mediante un conector de 2,1mm con el positivo en el centro o directamente a los pines Vin y GND marcados sobre la placa.

Hay que tener en cuenta que podemos medir el voltaje presente en el jack directamente desde Vin. En el caso de que el Arduino esté siendo alimentado mediante el cable USB, ese voltaje no podrá monitorizarse desde aquí. (*Características – Arduino, 2013*).

2.12. Celda de carga

Una celda de carga es un transductor utilizado para convertir una fuerza en una señal eléctrica. Esta conversión empieza a partir de un dispositivo mecánico, es decir, la fuerza que se desea medir, deforma la galga extensiométrica y por medio de medidores de deformación, que son pequeños patrones de resistencias utilizados como indicadores de tensión, obtenemos una señal eléctrica con la cual podemos obtener el valor de la fuerza.



Figura 20. Celda de carga (Naylamp)

Los medidores están unidos a la viga que se deforma cuando se aplica peso, a su vez, deformando el indicador de tensión. Cuando se deforma el medidor de deformación la resistencia eléctrica cambia en proporción a la carga. Esto se logra por medio de un puente de Wheastone, el cual se utiliza para medir resistencias desconocidas mediante el equilibrio de “brazos” del puente. Estos están contruidos por cuatro resistencias que forman un circuito cerrado. En el caso de las celdas de carga las resistencias son los medidores de deformación. La celda de carga es ideal para poder medir variaciones sobre presión en una superficie o como simple transductor para medir un peso de algún elemento en contacto con el dispositivo. (Mi Arduino tiene un blog. 2016).

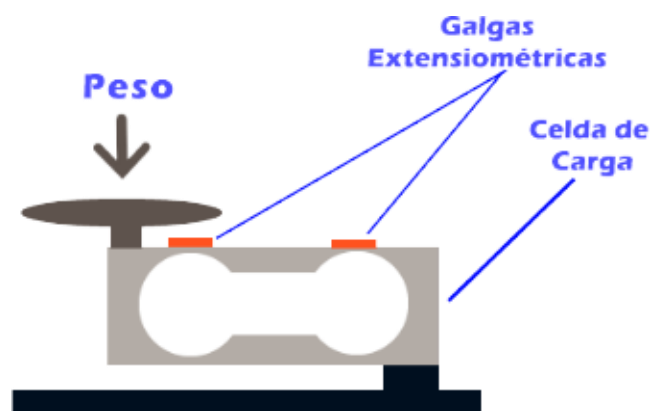


Figura 21. Balanza con celda de carga. (Naylamp)

2.12.1. Galga extensiométrica

Una galga extensiométrica o extensómetro es un sensor, que mide la deformación, presión, carga, par, posición, etc. y se basa en el efecto piezorresistivo, que es la propiedad que tienen los materiales de cambiar el valor nominal de su resistencia cuando se les somete a esfuerzos y se deforman en dirección de los ejes mecánicos.



Figura 22. Galga extensiométrica

Un esfuerzo que deforma la galga extensiométrica generará una variación en su resistencia eléctrica.

En su forma más común, consiste en un estampado de una lámina metálica fijada a una base flexible y aislante. La galga se adhiere al objeto cuya deformación se quiere estudiar mediante un adhesivo, como el cianoacrilato. Según se deforma el objeto, también lo hace la lámina, provocando así una variación en su resistencia eléctrica. Habitualmente una galga extensiométrica consiste en un alambre muy fino, o más comúnmente un papel metálico, dispuesto en forma de rejilla, que se puede unir por medio de soldadura a un dispositivo que pueda leer la resistencia generada por la galga. Esta forma de rejilla permite aprovechar la máxima cantidad de material de la galga sujeto a la tensión a lo largo de su eje principal. Las galgas extensiométricas también pueden combinarse con muelles o piezas deformables, para detectar de forma indirecta los esfuerzos.

Idealmente, las galgas deberían ser puntuales, para así poder medir esfuerzos en puntos concretos. En la práctica las dimensiones de la galga son apreciables, por lo

tanto, se supone que el punto de medida es el centro geométrico de la galga. Si se pretenden medir vibraciones, es necesario que las longitudes de las ondas de esas vibraciones sean bastante mayores que la longitud de la galga. Las galgas pueden estar adheridas en una placa pequeña o dos elementos que presionan el alambre que transporta la electricidad.

Las galgas tienen ciertas características, unas físicas y otras relativas a su funcionamiento. Entre las físicas se encuentra su tamaño, peso y materiales con los que sea fabricada; es pequeña y dura, lo que facilita la velocidad con que genera las respuestas. Estas son muy importantes, puesto que el resultado correcto depende de estos aspectos. Existen también características que dependen de la fabricación de la galga, por ejemplo, la temperatura del funcionamiento y el factor de la galga, que indica la sensibilidad que tiene el sensor. También la resistencia de la galga, el coeficiente de temperatura, la prueba de fatiga y el coeficiente de expansión lineal, son características necesarias para conocer bajo qué circunstancias la galga arrojaría resultados adecuados.

Los materiales que suelen utilizarse para fabricar galgas son aleaciones metálicas, como por ejemplo constantán, nicrom o elementos semiconductores como por ejemplo el silicio y el germanio.

2.12.2. Puente de Wheatstone

Un puente de Wheatstone es un circuito eléctrico que se utiliza para medir resistencias desconocidas mediante el equilibrio de los brazos del puente. Estos están constituidos por cuatro resistencias que forman un circuito cerrado, siendo una de ellas la resistencia bajo medida.

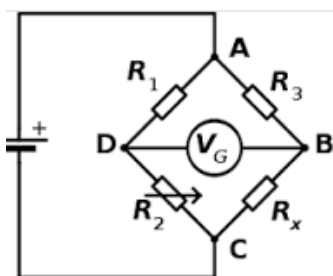


Figura 23. Diagrama de un puente de Wheatstone

El puente de Wheatstone es un circuito inicialmente descrito en 1833 por Samuel Hunter Christie (1784-1865), Pero fue el Sr. Charles Wheatestone quien le dio muchos usos cuando lo descubrió en 1843. Como resultado este circuito lleva su nombre.

2.12.2.1. Funcionamiento

Para determinar el valor de una resistencia eléctrica bastaría con colocar entre sus extremos una diferencia de potencial (V) y medir la intensidad que pasa por ella (I), pues de acuerdo con la ley de Ohm, $R=V/I$. Sin embargo, a menudo la resistencia de un conductor no se mantiene constante -variando, por ejemplo, con la temperatura y su medida precisa no es tan fácil. Evidentemente, la sensibilidad del puente de Wheatstone depende de los elementos que lo componen, pero es fácil que permita apreciar valores de resistencias con décimas de ohmio.

2.12.2.2. Medición

Cuando el puente se encuentra en equilibrio: $R1 = R2$ y $R_x = R3$ de donde $R1 / R_x = R2 / R3$. En este caso la diferencia de potencial (la tensión) es de cero "0" voltios entre los puntos A y B, donde se ha colocado un amperímetro, que muestra que no pasa corriente entre los puntos A y B (0 amperios). Cuando $R_x = R3$, $V_{AB} = 0$ voltios y la corriente = 0 amperios. Si no se conoce el valor de R_x , se debe equilibrar el puente variando el valor de $R3$. Cuando se haya conseguido el equilibrio, R_x será igual a $R3$ ($R_x = R3$). $R3$ debe ser una resistencia variable con una carátula o medio para obtener valores muy precisos.

2.13. Módulo HX711

Este módulo es una interface entre las celdas de carga y el microcontrolador, permitiendo poder leer el peso de manera sencilla. Internamente se encarga de la lectura del puente wheatstone formado por la celda de carga, convirtiendo la lectura analógica a digital con su conversor A/D interno de 24 bits.

Es muy utilizado en procesos industriales, sistemas de medición automatizada e industria médica.

Se comunica con el microcontrolador mediante 2 pines (Clock y Data) de forma serial. (Naylamp Mechatronics.2015)



Figura 24. Módulo HX711. (Naylamp)

2.13.1. Conexiones entre la Celda de carga, módulo HX711 y Arduino.

Tabla. 1. Conexión entre la Celda de carga y módulo HX711 (Naylamp)

CELDA DE CARGA	MÓDULO HX711
Cable Rojo	Pin E+
Cable Negro	Pin E-
Cable Verde	Pin A-
Cable Blanco	Pin A+

Tabla. 2. Conexión entre HX711 y Arduino (Naylamp)

Módulo HX711	Arduino UNO, MEGA, NANO
Pin GND	Pin GND
Pin DT	Pin A1
Pin SCK	Pin A0
Pin VCC	Pin 5V

CAPÍTULO III.

MARCO

METODOLÓGICO

3.1. Metodología del proyecto

El método de la investigación describe a detalle la forma en que se ha llevado a cabo la investigación. Este permite explicar la propiedad de los métodos utilizados y la validez de los resultados, incluyendo la información pertinente para entender y demostrar la capacidad de replicación de los resultados de la investigación.

El método deductivo se basa en el estudio de la realidad y la búsqueda de verificación o falsificación de unas premisas básicas a comprobar. A partir de la ley general (generalización) se considera que ocurrida en una situación particular. (Abreu, 2014).

El proceso para derivar las conclusiones del proyecto se llevó a cabo con el método deductivo ya que el simulador se apega al estudio de la realidad de las experiencias vivenciales en el mercado laboral petrolero.

Se estudian datos generales de la perforación de pozos petroleros para determinar un hecho en particular que es el control y monitoreo de los mismos.

A si mismo por la naturaleza de los datos y la información el estudio es de tipo cuantitativo ya que el análisis de la realidad es a través de procedimientos sustentados en la medición. Se realiza la medición del peso del lodo de perforación y a partir del resultado se hacen comparaciones y se determina si los valores son correctos o se tienen que corregir para controlar el pozo y evitar posibles brotes de crudo. De la misma manera se miden otras variables como las revoluciones por minuto de la barrena, la profundidad de perforación, presión hidrostática y volumen de presas; todas estas se pueden visualizar en la pantalla principal del simulador.

Por los medios para obtener los datos es un estudio de laboratorio ya que es de carácter experimental y comprende la observación minuciosa y detallada de la perforación y el control de pozos, esta tarea debe llevarse a cabo en un lugar especial y previsto.

Debido a que se trata de un simulador los conocimientos y experiencias no se aplican en una realidad como tal, entonces, por la manipulación de sus variables la aplicación del proyecto es de tipo cuasi-experimental ya que los hechos solo se asemejan a la realidad.

CAPITULO IV.

MARCO

OPERATIVO

4.1. Elaboración de la balanza con la celda de carga

Se elaboró la balanza colocando un extremo de la celda de carga a la base y el otro extremo la tara de carga, de esta manera se deja libre el centro ya que es donde se ubican las galgas extensiométricas que medirán la deformación de la celda cuando se aplique un peso. Es importante tomar en cuenta la dirección de la flecha ya que esta indica la dirección de la fuerza o peso que se va aplicar.

En la siguiente figura se muestra la manera en que debe quedar instalada la balanza.



Figura 25. Balanza con celda de carga. (Naylamp)

4.2. Conexión de la celda de carga a al módulo HX711

Una vez armada la balanza se conecta el modulo transmisor HX711 a la celda de carga. El modulo convierte de los datos analógicos medidos por la celda a digitales.

La conexión se hace de acuerdo a la tabla 1 del capítulo II.

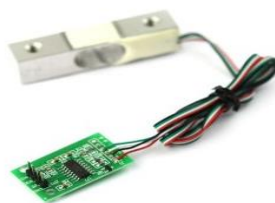


Figura 26. Conexión de la celda de carga al módulo HX711 (Naylamp)

4.3. Conexión de la balanza a la tarjeta Arduino Uno

El módulo transmisor es una interfaz entre la celda de carga y la tarjeta Arduino Uno. Se conecta como lo indica la tabla 2 del capítulo II. El diagrama es el siguiente:

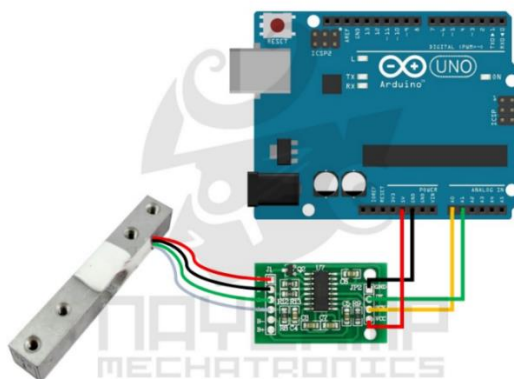


Figura 27. Diagrama de conexión. (Naylamp)

La tarjeta Arduino Uno se encarga de leer los datos medidos por la celda de carga.

4.4. Código Arduino

Se utilizó la librería del módulo HX711 para Arduino

Una vez descargado hay que importarla a nuestro IDE de Arduino.

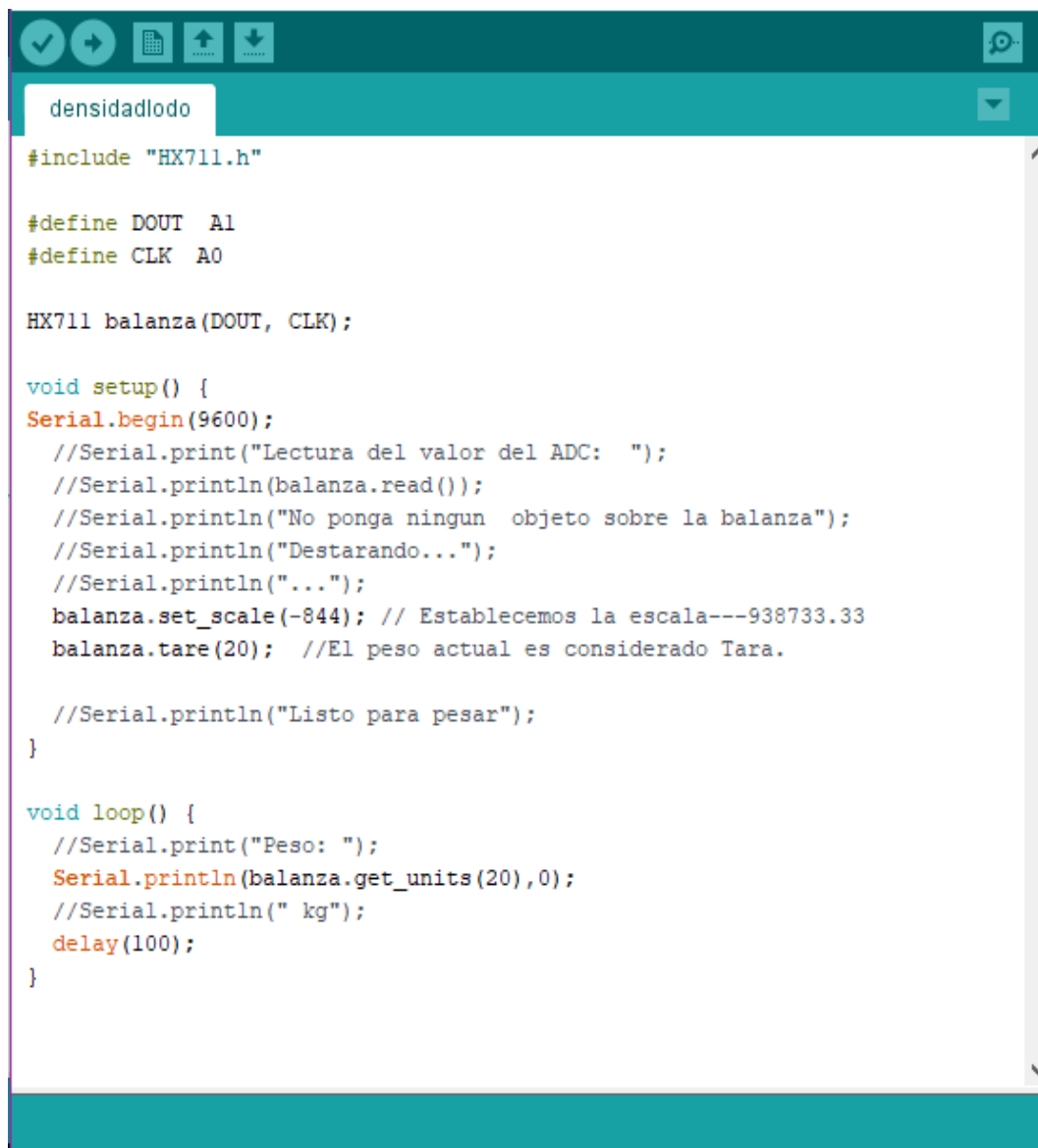
Explicaremos las funciones principales de esta librería.

- Con la función **Balanza.Set_Scale(-844)**; Se establece el valor de la escala, que es el factor de conversión para convertir valor de lectura en un valor con unidades de peso.
- **Balanza.tare(20)**; Establece el peso actual como el peso de tara, **n** indica el número de lecturas que se realizan para obtener la tara, en este caso son 20
- **Balanza.get_units(byte n)**; Devuelve el valor actual restado del peso de tara y dividido por la escala. Es equivalente a $(\text{get_value()}/\text{SCALE})$. Si se

especifica un valor de n , devuelve el promedio de n lecturas. (Naylamp Mechatronics.2015).

Entonces se definen los pines de entrada A1 y A0. Se inicializa el puerto serial y se establece la escala con la que va a trabajar la balanza, se establece el valor de tara. Y en el monitor serial se imprime el peso en kilogramos.

En la siguiente figura se muestra el programa de Arduino para determinar el peso del lodo puesto en la balanza.

The image shows a screenshot of the Arduino IDE interface. The top toolbar contains icons for checking, running, uploading, and downloading. Below the toolbar is a tab labeled 'densidadlodo'. The main text area displays the following C++ code:

```
#include "HX711.h"

#define DOUT A1
#define CLK A0

HX711 balanza(DOUT, CLK);

void setup() {
  Serial.begin(9600);
  //Serial.print("Lectura del valor del ADC: ");
  //Serial.println(balanza.read());
  //Serial.println("No ponga ningun objeto sobre la balanza");
  //Serial.println("Destarando...");
  //Serial.println("...");
  balanza.set_scale(-844); // Establecemos la escala---938733.33
  balanza.tare(20); //El peso actual es considerado Tara.

  //Serial.println("Listo para pesar");
}

void loop() {
  //Serial.print("Peso: ");
  Serial.println(balanza.get_units(20), 0);
  //Serial.println(" kg");
  delay(100);
}
```

Figura 28. Programa Arduino para leer densidad del lodo. (Fuente propia)

4.5. Programa en LabVIEW 2017

Posteriormente se realizó el programa en LabVIEW 2017, en el cual se establece que dependiendo de la profundidad de perforación del pozo se deben cumplir las condiciones de la tabla 3. Es decir, conforme los rangos de profundidad de la perforación se determina la densidad del lodo y las revoluciones por minuto de la barrena, esto para mantener bajo control los posibles brotes de crudo y trabajar de manera segura en la perforación.

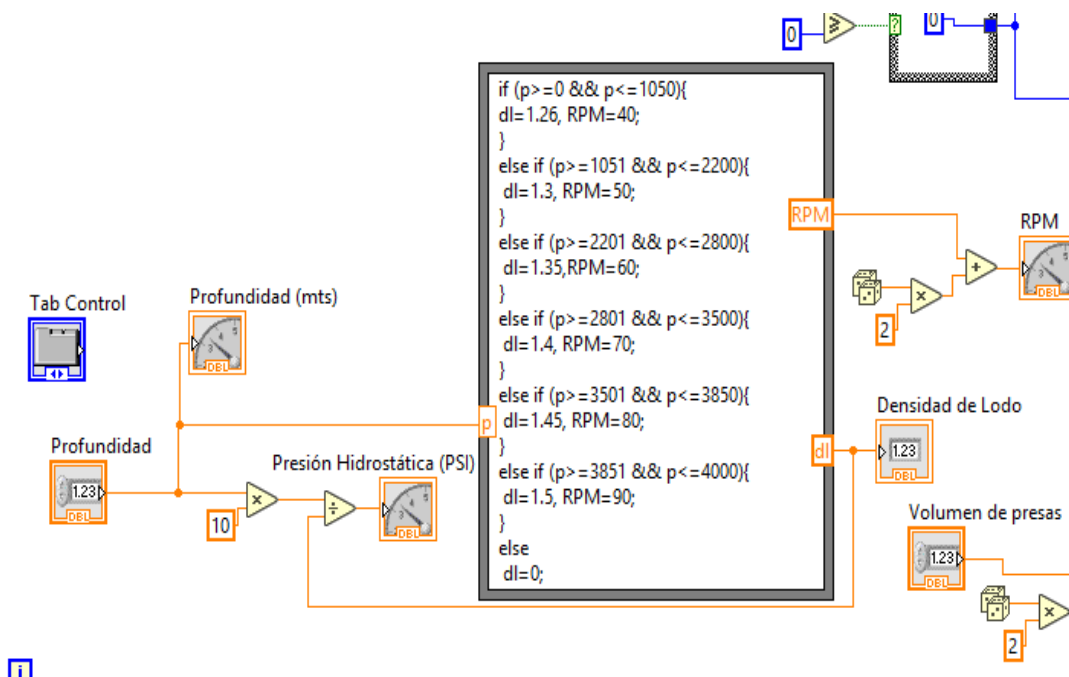


Figura 29. Programa en LabVIEW para determinar la densidad del lodo (Fuente propia)

Tabla. 3. Parámetros para determinar densidad del lodo (Fuente propia)

PROFUNDIDAD EN MTS	DENSIDAD DEL LODO	RPM
De 0 a 1050	1.26	40
De 1051 a 2200	1.3	50
De 2201 a 2800	1.35	60
De 2801 a 3500	1.4	70
De 3501 a 3850	1.45	80
De 3851 a 4000	1.5	90

Se leen los valores de la balanza medidos por Arduino y se compara si son mayores de cero, si es verdadero y el valor del peso del lodo se encuentra en los rangos establecidos en la tabla 4 se puede determinar el valor de la densidad del lodo.

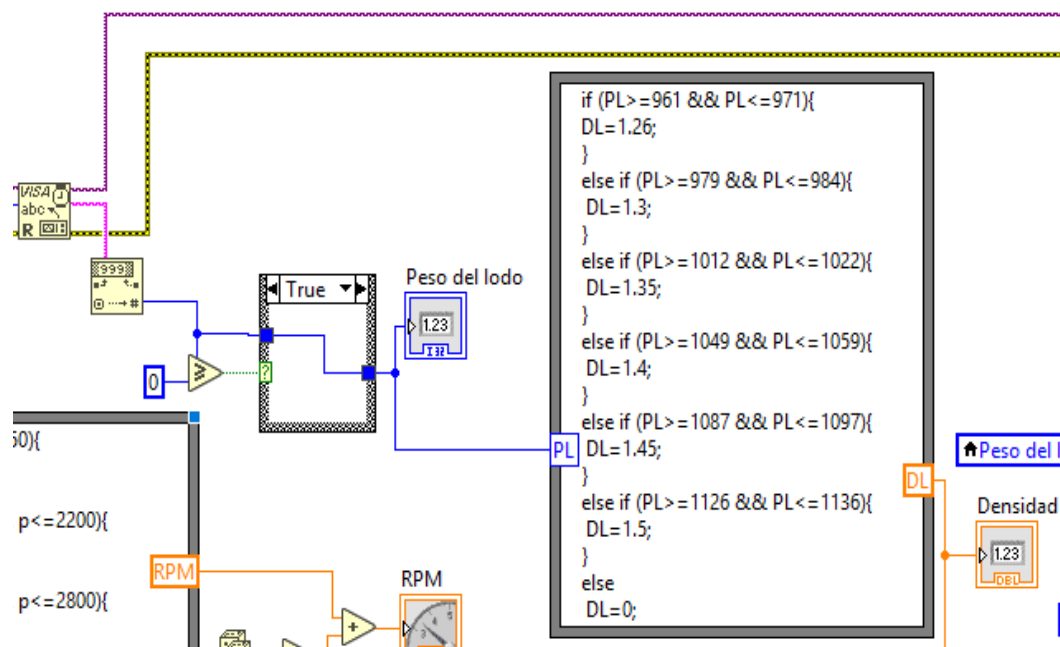


Figura 30. Programa en LabVIEW para determinar la densidad del lodo mediante su peso (Fuente propia)

Tabla. 4. Valores de peso y densidad del lodo (Fuente propia)

PESO DEL LODO (gr)	DENSIDAD DEL LODO
De 961 a 971	1.26
De 979 a 984	1.3
De 1012 a 1022	1.35
De 1049 a 1059	1.4
De 1087 a 1097	1.45
De 1126 a 1136	1.5

Seguido de esto se compara la densidad del lodo de prueba con los valores de la tabla 3. Si el valor de las densidades comparadas es correcto el programa se mantiene funcionando de manera normal.

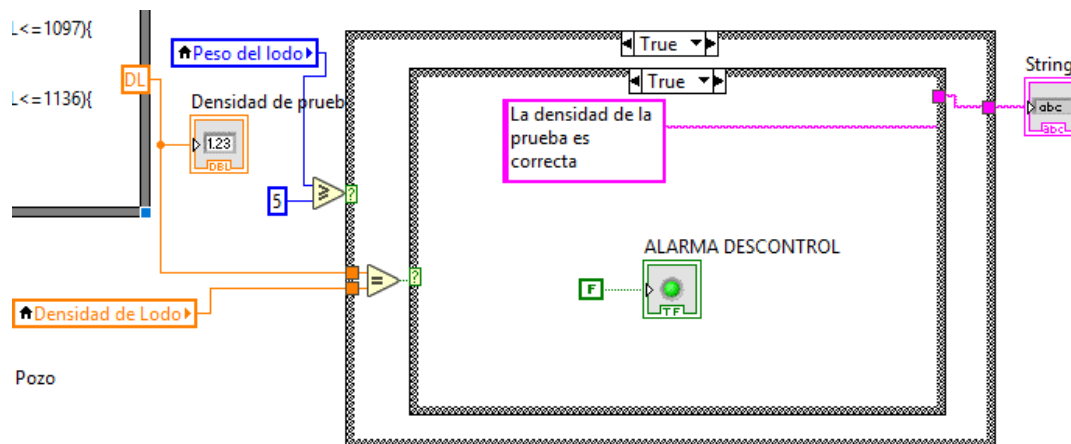


Figura 31. Comparación correcta de densidad de lodo (Fuente propia)

Si las densidades comparadas son distintas a los valores de la tabla 3, se enciende una alarma de descontrol que alerta del error para que el usuario pueda corregir la falla.

En el caso de que no sea posible conseguir la densidad del lodo adecuada, el programa permite el cierre del pozo para evitar que ocurra un brote.

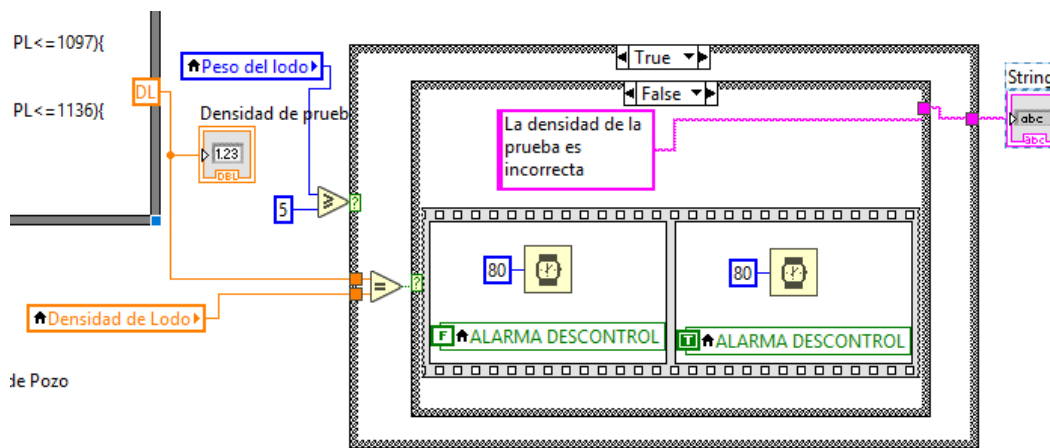


Figura 32. Comparación de densidad de prueba incorrecta (Fuente propia)

CAPÍTULO V. RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Resultados

Para empezar la toma de muestras lo primero que se tiene que hacer es calibrar la balanza, para la obtención de datos correctos.



Figura 33. Calibración de la balanza (Fuente propia)

Una vez que se calibra la balanza se procede capturar los datos obtenidos al pesar el lodo de perforación.



Figura 34. Captura de datos (Fuente propia)

Se muestra los datos obtenidos en el monitor serial.

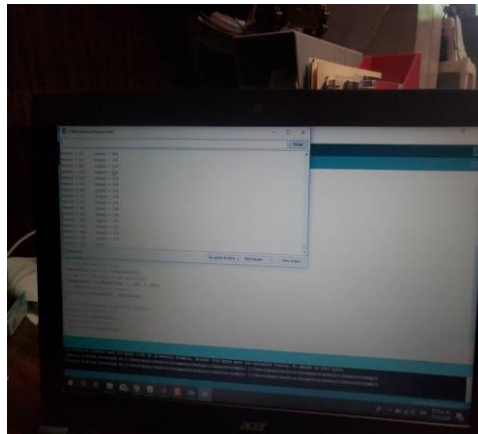


Figura 35. Comparación de datos obtenidos (Fuente propia)

se visualiza en el serial plotter la gráfica de los datos obtenidos en tiempo real.

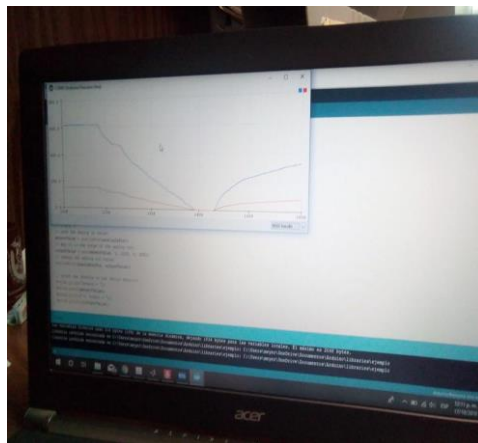


Figura 36. Grafica de los datos obtenidos en tiempo real (Fuente propia)

El lodo es pesado en la balanza y la tarjeta Arduino Uno obtiene los valores para ser comparados en el programa de LabVIEW.



Figura 37. Demostración de pesos de lodos (Fuente propia)

Para empezar con la simulación el docente debe introducir el valor del volumen de presas del lodo y la profundidad de perforación. Estos datos se utilizan como referencia para determinar el valor correcto de la densidad del lodo de perforación.



Figura 38. Simulador en LabVIEW. Pestaña docente (Fuente propia)

Es posible visualizar los parámetros importantes en la perforación de pozos como las revoluciones por minuto de la barrena, la profundidad de perforación en metros, la presión hidrostática y los valores de la densidad del lodo. Si hay alguna variación en el peso de la densidad del lodo que pueda provocar un brote se enciende una alarma para corregir los valores de peso. En caso de que no se pueda controlar de la descompensación se prosigue a cerrar el pozo para evitar brotes.

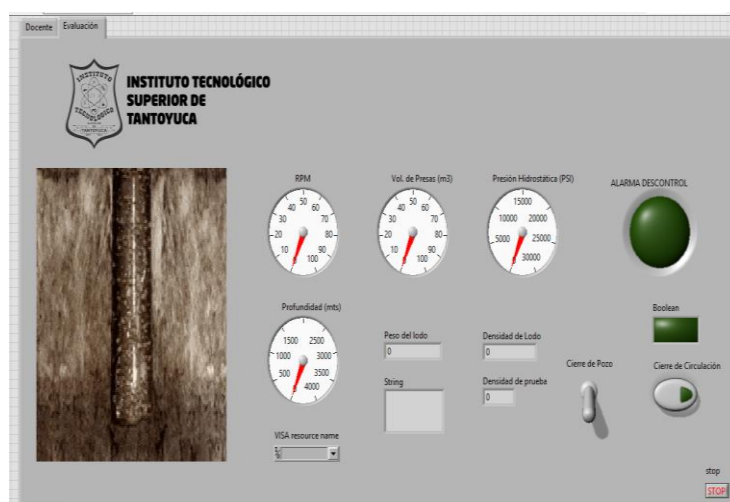


Figura 39. Simulador en LabVIEW. (Fuente propia)

5.2. Conclusiones

Con el desarrollo del simulador de técnicas de detección, de monitoreo de parámetros de formación y control de brotes en pozos petroleros; se determinó la densidad de lodo de perforación con la balanza programada en Arduino Uno.

Se logró visualizar los datos numéricos y posteriormente se graficaron los datos obtenidos de la densidad del lodo en tiempo real.

Se elaboró el programa en LabVIEW, el cual compara los datos obtenidos de la densidad del lodo con los valores establecidos y se determina si el peso del lodo es correcto. Si no es correcto el valor de la densidad del lodo se activa una alarma y posible corregir la descompensación, en caso de que no se pueda corregir se puede cerrar el pozo. De igual manera se observan los parámetros de perforación en la pantalla del simulador.

5.3. Recomendaciones

- Calibrar correctamente la balanza.
- Llenar correctamente el recipiente de medición.
- Colocar el recipiente de medición en el centro de la balanza para obtener lecturas correctas.
- Esperar que la balanza termine de tomar la medición.
- Limpiar correctamente el recipiente de medición para evitar que queden residuos de lodo.
- Al iniciar la simulación el docente debe de introducir los valores de la profundidad de perforación y volumen de presas.

6. Referencias bibliográficas

Abreu, J. (2014). *El método de la investigación*. Daena.

Alvarado, D, (2004). *Análisis de Pruebas de Presión*. Venezuela: S. E.

Algeroy, J., Auzerais, F., Bryant, I., Crabtree, M., Davies, J., Eslinger, D., Fletcher, P., Gai, M., Johannessen, O., Johnson, A., & King, G. (1999). *Control remoto de yacimientos*. Oilfield Review, Vol. 11, Págs. 18-29.

Benítez, M. (1979). *Fluidos de perforación*. México: UNAM

Da Silva, A. (2007). *LODO DE PERFORACIÓN*. Marzo 06,2019, De LA COMUNIDAD PETROLERA Sitio web: <https://www.lacomunidadpetrolera.com/2007/12/lodos-de-perforacin.html>

Del Campo, M. (2016). *Balanza digital de hasta 20Kg con celda de carga y transmisor HX711*. Marzo 15, 2019, de Mi Aruino Tiene un Blog Sitio web: <https://miarduinounotieneunblog.blogspot.com/2016/06/balanza-digital-de-hasta-20kg-con-celda.html>

Emerson. (2019). *Desempeño de densidad y viscosidad insuperable*. 2019, de Emerson Sitio web: <https://www.emerson.com/es-mx/automation/measurement-instrumentation/flow-measurement/density-viscosity-learn-about>

Enríquez, R. (2009). *Guía de Usuario de Arduino*. USA: S, E.

Evans, B. W. (2007). *Manual de programación Arduino*. San Francisco, California: Creative Commons.

Gasopedia & Blogger. (2015). *¿En qué consiste la perforación de pozos petroleros?* Marzo 13, 2019, de GASOPEDIA Sitio web: <https://www.gasopedia.net/2015/07/en-que-consiste-la-perforacion-de-pozos-petroleros.html>

Golding, F. (2016). *Deepwater well control: Integrated simulation for risk management*. Galveston, SPE 180351-MS.

González, P. (2018). *Diseño de software de simulación de control de pozos petroleros didáctico*. Villahermosa, Tabasco: CIATEC.

Hawker, D., Vogt, K., & Robinson, A. (2001). *Manual de perforación procedimientos y operaciones en el pozo*. Canadá: Datalog.

Lajara, J., & Pelegri, J. (2007). *LabVIEW Entorno grafico de programación*. Barcelona: Marcombo.

Naylamp. (2015). *Tutorial trasmisor de celda de carga HX711, Balanza Digital*. marzo 12, 2019, de Naylamp Mechatronics Sitio web: https://naylampmechatronics.com/blog/25_tutorial-trasmisor-de-celda-de-carga-hx711-ba.html

Publico (2019). *Fluidos de control*. Tomo 3.

Publico (2019). *Terminación y mantenimiento de pozos*.

QimiNet. (2016). *Lodos de perforación en la industria petrolera*. Marzo 13, 2019, de QuimiNet.com Sitio web: <https://www.quiminet.com/articulos/lodos-de-perforacion-en-la-industria-petrolera-13862.htm>

Schlumberger. (2019). *Balanza de lodo*. 2019, de Schlumberger Sitio web: https://www.glossary.oilfield.slb.com/es/Terms/m/mud_balance.aspx

T. E. W. Nind. (1987). *Fundamentos de Producción y Mantenimiento de Pozos Petroleros*. México: Limusa.

Torrente, O. (2013). *Arduino curso práctico de formación*. Madrid, España: Alfaomega.