

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE LA SANTÍSIMA CONCEPCIÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA



UCSC

Puesta en Marcha de Equipo de Perforación DTH Incluyendo Sistema Measurement While Drilling (MWD) Basado en Observadores

Gabriel Esteban Bout Saez

Informe de Habilitación Profesional para optar al título de:
Ingeniero Civil Eléctrico

Profesor Patrocinante:

Dr. Guillermo E. Ramírez A.

Profesores Guía:

Dr. Aníbal S. Morales M.

Dr. René E. Gómez P.

Concepción, Agosto (2022)

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE LA SANTISIMA CONCEPCION
Facultad de Ingeniería
Departamento de Ingeniería Eléctrica

Profesor Patrocinante:
Dr. Guillermo E. Ramírez A.

Puesta en Marcha de Equipo de Perforación DTH Incluyendo Sistema Measurement While Drilling (MWD) Basado en Observadores

Gabriel Esteban Bout Saez

Informe de Habilitación Profesional
para optar al Título de

Ingeniero Civil Eléctrico

Agosto 2022

Resumen

Measurement While Drilling (MWD) es una tecnología que recopila en tiempo real, los datos de máquinas perforadoras durante proceso de perforación sin remover la broca desde el agujero. La información recopilada es valiosa para tomar rápidas y eficientes decisiones en el diseño de túneles, minería de superficie y subterránea, entre ellos, basándose en la caracterización del macizo rocoso que se obtiene del análisis de los datos.

Este trabajo tiene como objetivo principal de realizar la puesta en marcha de un sistema de perforación Down the Hole (DTH), donde se implementa un sistema de registro de variables durante la perforación o MWD, el cual se incluyen sensores, observadores y estimadores de variables electromecánicas.

Se analizaron artículos, tesis y proyectos actualizados a nivel mundial con respecto al uso de la tecnología MWD, para la estimación de las diversas propiedades del macizo rocoso, indicando que las variables más importantes para el registro de datos son el tiempo, profundidad, torque, velocidad de rotación, presión de empuje y presión enviada hacia el martillo. A partir de las variables medidas se puede obtener parámetros importantes como tasa de penetración y la energía específica.

Este estudio a escala laboratorio se realiza mediante una perforadora rotoperkusiva del tipo DTH, donde un sistema neumático alimentado por un compresor de 30kW es el encargado del empuje, percusión y limpieza de los elementos de perforación. La velocidad y torque son proporcionados por un motor de inducción de 4Kw y son transmitidas a la broca (bit) de perforación a través de un reductor de razón 11:1.

Para el sistema de monitoreo MWD, se montó y configuró un set de sensores para monitoreo de presiones, tasa de penetración y deformación de eje, complementados con modelos de estimación tanto de torque (Modelo de Voltaje, Híbrido y Corriente) como de velocidad (Model Reference Adaptative System, MRAS), a partir de variables eléctricas de voltaje y corriente. Posteriormente se corroboró el correcto funcionamiento de los sensores y estimadores mediante pruebas de comisionamiento con la perforadora DTH funcionando.

Finalmente, se procedió a realizar pruebas experimentales (preliminares) del sistema de perforación considerando distintas materialidades y durezas. En base a los resultados obtenidos, se pudo concluir que existe un gran potencial al emplear un sistema MWD basado en observadores, permitiendo correlacionar cualitativamente la evolución de las variables de proceso con la resistencia a la compresión uniaxial, para los distintos casos analizados.

A los alumnos del pasado, presente y futuro de la carrera de Ingeniería Civil Eléctrica de la U.C.S.C.

Agradecimientos

Quiero comenzar agradeciendo y dedicando este trabajo a mi familia quien siempre ha estado, siendo el pilar fundamental de mi vida y la motivación para ser un profesional.

A mi madre Mercedes y mi padre José, que con sudor y esfuerzo todos estos años lograron entregar educación, valores, amor y un apoyo incondicional, todo lo necesario para que sus hijos puedan surgir en esta vida. Con orgullo puedo decir gracias y que ya es momento de que descansen.

Como no mencionar a mi hermano Luis que siempre confió en mis capacidades y que por culpa de esa rivalidad sana de ser mejor que el otro, me inspiro a estudiar lo que hoy ya estoy terminando, siendo el culpable de todo el sufrimiento que pase estos años de estudio. Agregar igual el apoyo de tu familia, tu esposa Silvana que siempre me apoyo y mi ahijado Cristóbal que me alegra la vida con solo verlo.

También, hay que mencionar a las amistades hechas en la universidad y futuros colegas, la mayoría medios dispersos, con cero ganas de estudiar y solo pensando en carretear. Aun así, fuimos madurando y acompañándonos todos estos años hasta llegar a estas instancias de la carrera, pero se agradece por todo lo vivido con ustedes y el apoyo, les deseo lo mejor.

Además, debo agradecer a las personas involucradas en este último proceso universitario, mi compañero Diego que comenzamos y terminamos este trabajo juntos, sin él hubiera sido mucho más difícil de lo que es y al profesor Guillermo por guiarme y apoyarme en todo.

Agradecer a la Agencia Nacional de Investigación y Desarrollo (ANID) por el financiamiento otorgado para la realización de esta investigación bajo el Proyecto Fondecyt Iniciación 11180768.

Tabla de Contenidos

LISTA DE TABLAS	VIII
LISTA DE FIGURAS	IX
NOMENCLATURA.....	XII
ABREVIACIONES.....	XIII
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	14
1.1. INTRODUCCIÓN GENERAL.....	14
1.2. TRABAJOS PREVIOS	15
1.2.1 Registro de variables electromecánicas para equipos de perforación DTH	15
1.2.2 Caracterización y clasificación de rocas usando MWD.	16
1.2.3 Estimación de Variables en motores de Inducción	24
1.2.4 Discusión	25
1.3. OBJETIVOS	26
1.3.1 Objetivo General	26
1.3.2 Objetivos Específicos.....	26
1.4. ALCANCES Y LIMITACIONES	27
1.5. TEMARIO Y METODOLOGÍA	27
CAPÍTULO 2. SISTEMA DE PERFORACIÓN DTH.....	29
2.1. INTRODUCCIÓN	29
2.2. SISTEMA DE PERFORACIÓN DTH.....	29
2.2.1 Montaje Perforadora DTH.....	30
2.3. SISTEMA ELECTROMECAÁNICO	33
2.3.1 Variador de frecuencia.....	33
2.3.2 Motor eléctrico.....	34
2.3.3 Reductor.....	34
2.3.4 Martillo DTH	35
2.3.5 Broca o Bit.....	38
2.4. SISTEMA NEUMÁTICO	39
2.4.1 Compresor	40
2.4.2 Consola de control neumática	40
2.4.3 Válvula purga de aire.....	42
CAPÍTULO 3. SISTEMA MWD BASADO EN OBSERVADORES	44
3.1. INTRODUCCIÓN	44
3.2. ESQUEMA GENERAL	44
3.3. SISTEMA DE ADQUISICIÓN Y PROCESAMIENTO DE DATOS	45
3.4. SENSORES	47
3.4.1 Sensor de deformación angular	47
3.4.2 Sensor de Profundidad	48
3.4.3 Sensor de Presión.....	54
3.5. VARIABLES ESTIMADAS	58
3.5.1 Observador de Flujo.....	58
3.5.2 Observador de Velocidad	61
3.5.3 Estimador de Torque	65
3.5.4 Implementación de los Observadores	66
3.5.5 Prueba de Observadores	68
3.6. DISCUSIÓN	76
CAPÍTULO 4. EVALUACIONES EXPERIMENTALES	78
4.1. INTRODUCCIÓN	78
4.2. PREPARACIÓN DEL MONTAJE EXPERIMENTAL	78

4.3.	MONTAJE EXPERIMENTAL	83
4.4.	PRUEBAS PRELIMINARES	85
4.5.	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	97
4.5.1	<i>Etapas de perforación</i>	97
4.5.2	<i>Análisis etapa 1 de perforación</i>	98
4.5.3	<i>Análisis etapa 2 de perforación</i>	99
4.5.4	<i>Análisis etapa 3 de perforación</i>	100
CAPÍTULO 5.	CONCLUSIONES	104
5.1.	SUMARIO	104
5.2.	CONCLUSIONES	106
5.3.	TRABAJO FUTURO	107
BIBLIOGRAFÍA		109
ANEXO A.	SENSOR DE DEFORMACIÓN ANGULAR	111
A.1.	SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS.....	111
A.2.	MONTAJE Y CALIBRACIÓN SENSOR.....	112
A.3.	PRUEBA DE SENSOR.....	122
A.4.	CONFIGURACIÓN SENSORCONNECT.....	123
ANEXO B.	DIAGRAMA DE BODE.....	124
ANEXO C.	MODELOS DE ESTIMACIÓN IMPLEMENTADOS EN SIMULINK.....	127
ANEXO D.	CLASIFICACIÓN DE MUESTRAS	130
ANEXO E.	GRÁFICOS DE INTERÉS PRUEBAS PRELIMINARES.....	132
E.1.	VOLTAJE Y CORRIENTE	132
E.2.	DEFORMACIÓN ANGULAR	136

Lista de Tablas

Tabla 1.1 Especificación de la perforadora.	17
Tabla 2.1 Parámetros de la Perforadora DTH.	29
Tabla 2.2 Parámetros del Motor de Inducción.	34
Tabla 2.3 Conjunto Martillo DTH.....	36
Tabla 3.1 Tabla resumen de variables independientes y dependientes.	45
Tabla 3.2 Especificaciones Dspace MicroLabBox 1202.....	46
Tabla 3.3 Parámetros Sensor TOF-DL250A.....	49
Tabla 3.4 Parámetros Transmisor de presión WIKA modelo A-10.....	54
Tabla 3.5 Rangos de tensión cc y ca.	66
Tabla 3.6 Parámetros del motor de inducción de la perforadora DTH.	67
Tabla 3.7 Promedios de velocidad en estado estacionario.	70
Tabla 3.8 Promedios de torque en estado estacionario.	74
Tabla 3.9 diferencia de los modelos de torque con respecto al VDF.	77
Tabla 3.10 Diferencia de los modelos de velocidad con respecto al VDF.....	77
Tabla 4.1 UCS muestras de rocas.....	80
Tabla 4.2 Muestras de hormigón sólidas.....	81
Tabla 4.3 Descripción de las muestras para pruebas preliminares.....	85
Tabla 4.4 Valores referidos al lado de la carga en etapa 1.	99
Tabla 4.5 Aumento de parámetros en etapa 2 de la perforación, referidos a la carga.....	100
Tabla 4.6 Resultados de las pruebas preliminares en estado estacionario (etapa 3).	100
Tabla 4.7 Tasa de penetración y energía específica.	101
Tabla 4.8 Tabla resumen.	102
Tabla A.1 Características SG-LINK-200.	111
Tabla A.2 Parámetros principales Strain Gauge.	112
Tabla A.3 Propiedades mecánicas acero SAE 1030.....	120

Lista de Figuras

Figura 1.1 Perforadora CSIRO Rock Cutting.	17
Figura 1.2 Perforadoras eléctricas 49R.	18
Figura 1.3 Perforadora Atlas-Copco T-45.	21
Figura 1.4 Perforadora DTH SmartROC D65 de Atlas Copco.	23
Figura 2.1 Perforadora DTH.	30
Figura 2.2 Dimensionamiento estructura de acero.	31
Figura 2.3 Montaje perforadora DTH.	31
Figura 2.4 Perforadora DTH montada en estructura.	32
Figura 2.5 Alzador límite de carrera.	32
Figura 2.6 VDF Parker AC690+.	33
Figura 2.7 Conexión delta de un motor de inducción trifásico.	34
Figura 2.8 Caja reductora.	35
Figura 2.9 Conjunto Martillo DTH.	36
Figura 2.10 Esquema movimiento pistón.	37
Figura 2.11 Martillo DTH utilizado.	37
Figura 2.12 Tipos de cara Broca DTH.	38
Figura 2.13 Diseños de botones o insertos.	38
Figura 2.14 Broca utilizada en Sistema DTH.	39
Figura 2.15 Estructura típica del sistema de perforación neumática.	40
Figura 2.16 Consola de control neumática.	41
Figura 2.17 Cilindro de levante y alimentaciones neumáticas.	41
Figura 2.18 Válvula purga de aire.	42
Figura 2.19 Presión en la perforadora antes y después de agregar válvula de purga de aire.	43
Figura 3.1 Diagrama general sistema MWD.	45
Figura 3.2 Dspace MicroLabBox 1202.	46
Figura 3.3 Strain Gages CEA-XX-250USA-350.	47
Figura 3.4 Ubicación Strain gauge.	48
Figura 3.5 Sensor laser TOF-DL250A.	49
Figura 3.6 Principio de tiempo y vuelo.	49
Figura 3.7 Sensor de distancia montado en la perforadora DTH.	50
Figura 3.8 Prueba de posición Sensor de profundidad.	52
Figura 3.9 Prueba Tasa de penetración (ROP) Sensor de profundidad.	53
Figura 3.10 Transmisor WIKA de presión modelo A-10.	54
Figura 3.11 Sensores de presión en la consola de control neumática.	55
Figura 3.12 Prueba sensor de presión Empuje.	56
Figura 3.13 Prueba sensor de presión Martillo DTH.	57
Figura 3.14 Diagrama de bloques Modelo de Voltaje.	59
Figura 3.15 Diagrama en bloques del Modelo de Corriente.	60
Figura 3.16 Diagrama de bloques del Modelo Hibrido.	61
Figura 3.17 Diagrama de bloques para estimación de velocidad mediante técnica MRAS.	62
Figura 3.18 Diagrama de bloques para estimación de velocidad mediante técnica BEMF-MRAS. .	64
Figura 3.19 Diagrama de bloques para la estimación del Torque Eléctrico.	66
Figura 3.20 Sondas de voltaje y corriente para modelos de estimación de torque y velocidad.	67
Figura 3.21 Esquema de acondicionamiento de señales voltaje y corriente de estator.	68
Figura 3.22 Esquema general adquisición de datos con las sondas de voltaje y corriente.	69

Figura 3.23 Estimadores de Velocidad con y sin filtro pasa bajo.	70
Figura 3.24 Comparación de Velocidades.	71
Figura 3.25 Encendido y apagado VDF.	72
Figura 3.26 Estimadores de Torque con y sin filtro pasa bajo.	73
Figura 3.27 Torque estabilizado antes de penetración.	74
Figura 3.28 Comparación de Torques.	75
Figura 3.29 Peak de encendido (gráfico izquierdo) y apagado (gráfico derecho) VDF.	76
Figura 4.1 Protectores de acrílicos.	79
Figura 4.2 Área de trabajo seguro.	79
Figura 4.3 Rocas de canteras.	80
Figura 4.4 Proceso de construcción de bloques de hormigón.	81
Figura 4.5 Montaje para pesar la perforadora.	82
Figura 4.6 Medición peso de la perforadora para cálculo de fuerza de empuje.	83
Figura 4.7 Montaje área de trabajo.	84
Figura 4.8 Perforación Roca Cantera Punta de Parra.	86
Figura 4.9 Monitoreo de sensores prueba 1.	87
Figura 4.10 Monitoreo de observadores prueba 1.	88
Figura 4.11 Perforación Roca Cantera Lonco.	89
Figura 4.12 Monitoreo de sensores prueba 2.	90
Figura 4.13 Monitoreo de observadores prueba 2.	91
Figura 4.14 Perforación Hormigón Blando.	92
Figura 4.15 Monitoreo de sensores prueba 3.	93
Figura 4.16 Monitoreo de observadores prueba 3.	94
Figura 4.17 Perforación Hormigón Gravilla.	95
Figura 4.18 Monitoreo sensores prueba 4.	96
Figura 4.19 Monitoreo de observadores prueba 4.	97
Figura 4.20 Etapas del torque en una perforación.	98
Figura 4.21 Muestra hormigón gravilla después de la perforación, prueba 4.	102
Figura 4.22 Gráfico resumen.	103
Figura A.1 Equipo de emisión y recepción de datos de la Strain Gauge.	111
Figura A.2 Strain gauge adherida en superficie de perforadora DTH.	113
Figura A.3 Puente de Wheatstone.	114
Figura A.4 Guía de conexiones Strain Gauge Full-Bridge.	114
Figura A.5 Strain Gauge y sus conexiones.	115
Figura A.6 SG-LINK-200 modificada.	115
Figura A.7 Montaje final Strain gauge y SG-LINK-200.	116
Figura A.8 Plataforma SensorConnect para visualizar datos.	117
Figura A.9 Calibración por resistencia de derivación.	118
Figura A.10 Diagrama esfuerzo deformación.	120
Figura A.11 Ventana Shunt Calibration del software SensorConnect.	121
Figura A.12 Prueba Strain gauge, deformación del material.	122
Figura A.13 Menú de configuración de hardware.	123
Figura A.14 Menú de configuración de muestreo.	123
Figura A.15 Menú de energía de configuración de nodo.	123
Figura A.16 Muestreo de un solo nodo.	124
Figura B.1 Diagrama de bode filtro pasa bajo con frecuencia de corte 5Hz.	124
Figura B.2 Diagrama de bode filtro pasa bajo con frecuencia de corte 0.5Hz.	125
Figura B.3 Diagrama de bode filtro pasa bajo con frecuencia de corte 20Hz.	125

Figura B.4 Diagrama de bode filtro pasa bajo con frecuencia de corte 500Hz.....	126
Figura C.1 Transformación de coordenadas abc a qd0.	127
Figura C.2 Modelo de Voltaje implementado en Simulink.	128
Figura C.3 Modelo de corriente implementado en Simulink.	128
Figura C.4 Modelo hibrido implementado en Simulink.	129
Figura C.5 MRAS implementado en Simulink.	129
Figura C.6 BEMF-MRAS implementado en Simulink.	130
Figura D.1 Clasificación de la roca en base a la resistencia a la compresión según la ISRM.	130
Figura D.2 Clasificación de los hormigones por resistencia a compresión.....	131
Figura E.1 Voltaje y corriente prueba Roca Punta de Parra.....	132
Figura E.2 Voltaje y corriente prueba roca Lonco.	133
Figura E.3 Voltaje y corriente prueba hormigón blando.....	134
Figura E.4 Voltaje y corriente prueba hormigón gravilla.	135
Figura E.5 Monitoreo de deformación angular prueba roca P.P.	136
Figura E.6 Monitoreo de deformación angular prueba roca Lonco.	137
Figura E.7 Monitoreo de deformación angular prueba hormigón blando.....	138
Figura E.8 Monitoreo de deformación angular prueba hormigón gravilla.....	139

Nomenclatura

i_{ds}^s, i_{qs}^s	: corrientes de estator en ejes qd en el marco de referencia estacionario.
i_{dr}^s, i_{qr}^s	: corrientes de rotor en ejes qd en el marco de referencia estacionario.
v_{ds}, v_{qs}	: voltaje de estator en eje qd en el marco de referencia estacionario.
L_s	: inductancia de estator.
L_r	: inductancia de rotor.
L_m	: inductancia de magnetización.
R_s	: resistencia de estator.
T_r	: constante de tiempo rotor.
T_s	: constante de tiempo estator.
ω_r	: velocidad actual del rotor.
$\hat{\omega}_r$	: velocidad estimada del rotor.
$\lambda_{ds}^s, \lambda_{qs}^s$	: enlace de flujo del estator en el marco de referencia estacionaria.
$\lambda_{dr}^s, \lambda_{qr}^s$	: enlace de flujo del rotor en el marco de referencia estacionaria.
σ	: reactancia de fuga total.
T_e	: torque eléctrico.
e_{md}, e_{mq}	: fuerza contra-electromotriz inducida actual.
$\hat{e}_{md}, \hat{e}_{mq}$	: fuerza contra-electromotriz inducida estimada.

Abreviaciones

Mayúsculas

PIB.	: Producto Interno Bruto.
MWD.	: medición durante la perforación (Measurement While Drilling).
DTH.	: Down The Hole.
VDF.	: Variador de Frecuencia.
PLC.	: controlador lógico programable (Programmable Logic Controller).
ROP.	: tasa de penetración (Rate Of Penetration).
ToF.	: tiempo y vuelo (Time of Flight).
SE.	: energía específica (Specific Energy).
RQD.	: índice del grado de fragmentación (Rock Quality Designation).
UCS.	: resistencia a la compresión uniaxial (Unconfined Compressive Strength).
I.S.R.M.	: International Society for Rock Mechanics.
P.P.	: Punta de Parra.
M.H.	: Modelo Híbrido.
M.V.	: Modelo de Voltaje.

Minúsculas

c.c.	: corriente continua (en inglés es d.c.).
c.a.	: corriente alterna (en inglés es a.c.).

Capítulo 1. Introducción

1.1. Introducción General

La minería es una de las actividades económicas más importantes a nivel global, centrada esencialmente en la explotación, procesamiento y comercialización de minerales metálicos, minerales no metálicos y minerales industriales.

América, Asia y Oceanía son los tres continentes en que la actividad minera se desarrolla de forma permanente, y en los que existen países que producen el mayor número de minerales metálicos y minerales industriales, como son, Estados Unidos, Canadá, México, Perú y Chile; China, India, y Rusia; y Australia. Entre ellos, algunos son líderes mundiales en producción de uno o más de estos minerales, como Canadá en potasa, México en plata, Chile en cobre y yodo, China en oro, molibdeno, nitrógeno, silicio y azufre, y Australia en hierro y litio [1].

En Chile, la minería participa en forma relevante en la economía nacional. El año 2020 la participación de la minería en el PIB alcanzo al 12.5%, y en este la participación de la minería del cobre fue de 11.2%. Chile como mayor productor y explotador de cobre en el mundo, produjo 5773 mil toneladas métricas el año 2020, lo que equivale al 28.5% de la producción mundial, además de ocupar un segundo lugar en la producción mundial de molibdeno, con 59319 toneladas métricas que corresponde al 20.2% de esa producción. Nuestro país, además, ocupó el primer lugar en la producción de yodo con 21941 tm y un 69% de participación en la producción mundial, y el segundo lugar en la producción de litio con 23160 tm y un 26.5% de participación [1].

Sin embargo, debido al continuo aumento de la demanda y al agotamiento de los yacimientos actuales, las explotaciones y futuros proyectos se realizan cada vez en lugares más inhóspitos o de difícil acceso y mayor profundidad, lo que implica mayores inversiones y riesgo económico. Para reducir estos gastos y mejorar la eficiencia en la industria, el uso de nuevas tecnologías se ha vuelto una herramienta indispensable para el desarrollo de cualquier actividad ya sea geológica o minera.

Las aplicaciones más comunes de una perforadora DTH son para pozos de tronaduras en minas de rajo abierto y subterráneas, pozos de tronaduras en canteras, pozos de agua, sondajes de exploración y geotecnia, pozos de petróleo, fundaciones, entre otras. Sea cualquiera el método a utilizar en el proceso de perforación, siempre se basa en el mismo principio, es decir, en la rotación.

El sistema “Measurement While Drilling” o MWD por sus siglas, inicialmente se usaba para medir variables de la perforación, con el tiempo este concepto fue expandiéndose llegando a servir para la caracterización de la masa rocosa, donde se realizará la perforación mediante la

monitorización de los parámetros más relevantes en la perforación. Estos pueden llegar a ser un sistema más preciso que las evaluaciones geológicas (que se realizan en la etapa de exploración) y también son eficiente en tiempo e inclusive en términos económicos.

Considerando las ventajas de los sistemas MWD de proporcionar una gran cantidad de información relevante de cada perforación y sus características, este proyecto de habilitación profesional consiste en la puesta en marcha de un sistema de perforación DTH, en conjunto con un sistema de monitoreo y registro de variables (MWD). El sistema MWD se compone por un set de sensores y un conjunto de estimadores robustos de torque y velocidad, que se obtienen mediante un modelo dinámico del motor de inducción trifásico, lo que permite implementar un sistema de monitoreo robusto y menos invasivo.

Para la evaluación preliminar del sistema implementado, se llevaron a cabo pruebas de perforación, en un ambiente seguro, con rocas de distintas durezas y muestras de hormigón diseñadas para la obtención de distintas bases de datos que posteriormente se analizaran para identificar características que se puedan correlacionar a sus durezas.

1.2. Trabajos Previos

La revisión bibliográfica incluye estudios de caracterización y clasificación de rocas mientras se perfora con diferentes maquinarias, entregando variables relevantes a monitorear. Además, se revisan estudios donde se proponen modelos de estimación de variables de un motor de inducción basado en modelos dinámicos.

1.2.1 Registro de variables electromecánicas para equipos de perforación DTH

- ♣ Torres Campos, J. N. M. (2021) “*Implementación de un Sistema de Registro de Variables Electromecánicas para Equipos de Perforación DTH*” [Tesis para optar al Título de Ingeniero Civil Eléctrico]. Universidad Católica de la Santísima Concepción. [2]

Este documento aborda la base para realizar una puesta en marcha de un prototipo de perforadora DTH y un sistema de monitoreo MWD para obtener variables como velocidad de rotación, torque, fuerza de empuje, tasa de penetración, profundidad, magnitud y frecuencia de vibraciones y presión de aire, además de proponer set de sensores para obtener variables de interés, con el fin de lograr una caracterización de rocas mediante una perforación.

Además, se realizaron diseños de estimadores robustos de torque y velocidad obtenidos del modelo dinámico del motor de inducción mediante las mediciones de voltaje y corriente del estator,

para luego evaluarlas por medio de simulaciones en códigos en Matlab, donde implementa un esquema de control vectorial indirecto a partir de las ecuaciones del modelo dinámico del motor. Para obtener los parámetros de la maquina utilizo el accionamiento Siemens G120 en conjunto con el software Starter donde realiza la estimación de los parámetros del circuito equivalente del motor de inducción. Al analizar los resultados obtenidos, se concluyó que las mejores prestaciones para estimación de torque y velocidad fueron el modelo hibrido y MRAS respectivamente.

Luego se realizo una nueva etapa experimental con el objetivo de validar y analizar los modelos de estimacion de torque y velocidad, utilizando el motor de induccion de la perforadora accionada mediante el VDF Parker AC690+, por otro lado, el calculo de parametros relevantes de la maquina como el coeficiente de roce viscoso y la inercia del conjunto motor-reductor.

Se realizaron pruebas en donde se miden tension y corrientes de estator desarrolladas por la maquina de induccion ante variaciones de velocidad, rampas de aceleracion y desaceleracion de 5 y 10 segundos utilizando el VDF antes mencionado, obteniendo que el estimador hibrido y MRAS tanto para torque y velocidad respectivamente fueron los que entregaron mejores rendimientos.

Como resultado se obtuvo que la inercia del motor de induccion de la perforadora es de $0.0153[\text{kg}\cdot\text{m}^2]$ mientras que la del conjunto motor-reductor es de $0.0244[\text{kg}\cdot\text{m}^2]$, por otro lado, el coeficiente de roce viscoso del motor es igual a $0.0019[\text{Nm}\cdot\text{s}/\text{rad}]$ mientras que al conectar el reductor aumenta alrededor de 5 veces. Destacando asi que los algoritmos de estimacion presentan un mejor desempeño a velocidad nominal ante variaciones de parametros electricos, por lo que se espera un bajo error de estimacion.

1.2.2 Caracterización y clasificación de rocas usando MWD.

- ♣ Khanal, M., Qin, J., Shen, B. & Dlamini, B. (2020). Preliminary Investigation into Measurement While Drilling as Means to Characterize the Coalmine Roof. *Resource*, 9,10. [3]

En este documento se desarrolla una etapa preliminar para identificar la aplicabilidad durante la perforación en 3 tipos de muestras preparadas para representar geomateriales de baja, media y alta resistencia con la mezcla de cemento y arena, cada muestra fue con un área de 0.4m^2 , una altura de 0.3m y un volumen de 0.048m^3 .

Se realizaron 10 perforaciones ocupando una perforadora CSIRO Rock Cutting (figura 1.1) con una caja de cambio de 2 velocidades, esta máquina es a escala de laboratorio para trabajar en un entorno controlado. Sus especificaciones se dan en la Tabla 1.1, con un set de instrumentos para

medir la velocidad de rotación, el torque, presión, fuerza de tracción y posición, que se encuentran instalados en el equipo para la adquisición de datos, reduciendo la exposición humana al peligro.

Tabla 1.1 Especificación de la perforadora.

Eje de Velocidad	0-1250 rpm
Torque Máximo	4150 Nm
Peso máximo en la broca	60 kN
Velocidad de alimentación vertical	0-3 m/s
Profundidad	2.3 m
Flujo máximo de agua	~50 L/min a presión de red
Compresor de aire	600 CFM a 190 psi
Martillo DTH	Drilloc 5 pulgadas
Supresión de polvo con martillo DTH	1450 psi de agua a 8 L/min en la parte superior giratoria



Figura 1.1 Perforadora CSIRO Rock Cutting.

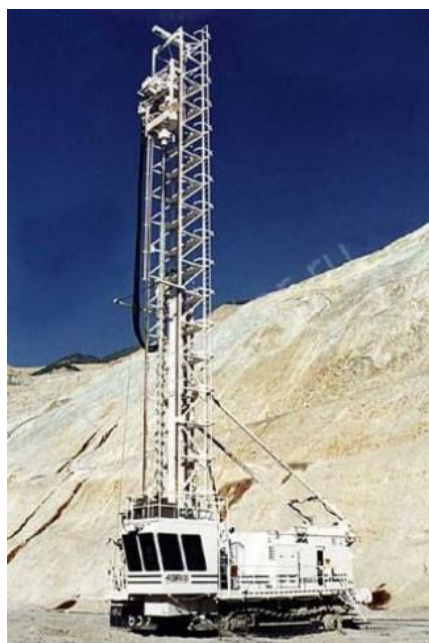
Los datos obtenidos por medio de MWD se analizaron para identificar si los datos de la perforación diferencian las fortalezas asociadas con las muestras de las rocas. Si bien, es un estudio preliminar para poder caracterizar el suelo en minas de carbón, su objetivo final es elaborar túneles en zonas seguras.

Los resultados muestran respuestas de los distintos bloques de muestras, concluyendo así que el peso de la broca varía con la resistencia de los bloques de rocas sintetizados, el torque de la broca igual muestra una dependencia de la resistencia de las rocas.

- ♣ Khorzoughi, M. B. & Hall, R. (2016). Processing of measurement while drilling data for rock mass characterization. *International journal of mining science and technology* 26, 989-994. [4]

Este documento trata sobre el procesamiento de datos MWD, como la tasa de penetración (ROP), velocidad de rotación, el torque de rotación y la fuerza de extracción, recopiladas de las rotatory blasthole drilling (perforación rotativa de barrenos para tronaduras).

Las perforadoras utilizadas en este estudio fueron un Bucyrus49RIII (Perforadora 1, figura 1.2a) y un 49HR (perforadora 2, figura 1.2b), serie de perforadoras eléctricas 49R montadas sobre orugas para tronaduras a gran escala. Estos son accionados por dos motores eléctricos de CC controlados por un PLC, que proporcionan la fuerza de bajada/elevación y el torque de giro de la broca.



(a)



(b)

Figura 1.2 Perforadoras eléctricas 49R.

(a) Modelo Bucyrus49RII. (b) Modelo 49HR.

En este trabajo las variables mecánicas que se midieron indirectamente durante la perforación es el torque, velocidad de rotación, tasa de penetración, la fuerza de tracción, la posición del mástil y otras medidas de control y retroalimentación se obtienen por medio de una interfaz digital desde el PLC.

Para el registro de datos de estudio, se utiliza un registrador de datos DataQ que fue configurada con una frecuencia de muestreo de 400Hz. La captura del DataQ es continua y captura

los datos tanto del tiempo de perforación como de no perforación, por lo que se realiza una selección de datos utilizables, considerando una profundidad de perforación de 20m.

El documento destaca la variable de tasa de penetración (Rate of Penetration ROP). La variable ROP permite obtener la energía específica y la caracterización de rocas, considerando dos enfoques. El primero, que está relacionado a las variables eléctricas para obtener la energía específica, evitando realizar cálculos complejos del motor, mientras que, por otro lado, se tiene la estimación de la energía específica por medio de variables mecánicas.

$$\text{Electrical SE (Pa)} = \frac{V_h \times I_h}{A \times ROP} + \frac{V_r \times I_r}{A \times ROP} + \frac{W_s \times g}{A} \quad (1.1)$$

Ecuación de Energía Específica Eléctrica, donde:

V_h : Voltaje de armadura para motor de elevacion/ba (V)

I_h : Corriente de Armadura de motor de elevacion/ba(A)

V_r : Voltaje de armadura para motor de rotacion (V)

I_r : Corriente de armadura para motor de rotacion (A)

g : Constante de la aceleracion de gravedad (9.8 m/s^2)

W_s : Masa estatica de la perforadora (Kg)

A : Superficie de perforacion (m^2)

$$SE = \frac{F}{A} + \frac{\pi * N * T}{30 * A * PR} \quad (1.2)$$

Donde:

F: fuerza de tracción (N)

A: área de sondaje (m^2)

PR: tasa de penetración (m/s)

N: velocidad de rotación (rpm)

T: torque (Nm)

- ♣ Vezhapparambu, V. S., Eidsvik, J. & Ellefmo, S. L. (2018). Rock Classification Using Multivariate Analysis of Measurement While Drilling Data: Towards a Better Sampling Strategy. *Minerals*, 8,384. [5]

Este artículo es parte de un proyecto de investigación que se centra en la implementación de conceptos geometalúrgicos en el sector de minerales industriales de la industria minera del norte de Noruega, específicamente en Brønnøy Kalk AS, mina ubicada cerca de Brønnøysund, donde se

produce aproximadamente dos millones de toneladas de mármol calcita.

El objetivo es desarrollar y probar metodologías para dividir un macizo rocoso en diferentes clases de rocas en función de las variaciones de resistencia y dureza. Los datos de medición MWD se utilizarán para lograr esto, proponiendo un nuevo método para clasificar los tipos de rocas según su resistencia y dureza, especialmente las intrusiones de rocas duras.

Se recopilan datos MWD de una operación de mármol a tajo abierto y se presentan los resultados del uso de diferentes variables, además, estos datos se utilizan para la clasificación de los tipos de rocas utilizando un modelo estadístico Hidden Markov Model (HMM). Los datos se recopilaron utilizando una perforadora Atlas-Copco T-45 (figura 1.3) y consisten en la profundidad (m), velocidad de penetración (m/min), presión de percusión (bar), presión de alimentación (bar), presión de aire de descarga (bar), presión de rotación (bar) y presión de amortiguación (bar).

Los datos se recopilan en un intervalo de aproximadamente 2cm, además se registraban imágenes en televisor óptico (OTV), utilizado para ver fracturas, geometría, posición, litologías y orientación de cualquier estructura, susceptibilidad magnética (MSUS), medidor de las propiedades magnéticas de un material, gamma espectral (SGAM), que identifica sustancias radiactivas dentro del pozo existentes como potasio (K), torio (Th) y uranio (U) y gamma total (TGAM), siendo la agregación de todos los SGAM.

El artículo concluye que al aplicar estos métodos en diferentes combinaciones de datos MWD, la tasa de penetración, la presión de rotación y la presión de amortiguamiento juntas pueden identificar y clasificar explotaciones de minerales duros, zonas fracturadas y mármol dentro de un pozo. Además, los datos MWD se comportan de manera diferente dentro de sus diferentes explotaciones. La explotación y fracturas delgadas tienen un comportamiento similar.



Figura 1.3 Perforadora Atlas-Copco T-45.

- ♣ Kadkhodaie-Ilkhchi, A., Monteiro, S. T., Ramos, F. & Hatherly, P. (2010). Rock Recognition From MWD Data: A Comparative Study of Boosting, Neural Networks, and Fuzzy Logic. *IEE Geoscience and Remote sensing Letters*, 7, 4. [6]

El estudio presenta una comparación empírica del rendimiento estadístico, la facilidad de implementación y la eficiencia computacional asociados a tres técnicas de aprendizaje automático. Los métodos propuestos son, boosting, que se compara con dos métodos bien establecidos, las redes neuronales (neural networks) y la lógica difusa (fuzzy logic), utilizados como puntos de referencia.

Los datos MWD adquiridos fue de agujeros para tronaduras en una mina de hierro en Australia Occidental, en donde, los pozos intersectaron una serie de tipos de rocas, incluyendo esquistos, mineral de hierro y formaciones de bandas de hierro. Siendo este el primer estudio que se informa sobre la aplicabilidad de LogitBoost para el reconocimiento de rocas a partir de datos MWD.

El artículo utiliza doce mediciones MWD, estos son: presión del barreno, presión de rotación, presión de descenso, velocidad de descenso y velocidad del cabezal, junto a esto se usan siete transductores de presión que registran la alimentación hacia abajo, alimentación hacia arriba, rotación inversa, rotación hacia adelante, alivio de rotación, alivio de avance y retención. Con el

objetivo de clasificar los datos MWD en categorías de rocas de forma autónoma, investigar un algoritmo propuesto recientemente (LogitBoost) y evaluar el rendimiento de diferentes técnicas de aprendizaje automático.

Los métodos utilizados se compararon utilizando los datos de barrenos de la mina mencionada anteriormente, donde se analizaron los diferentes métodos aplicados en función de su precisión, simplicidad de implementación y tiempo de cálculo. Los experimentos entregaron que todos los métodos lograron clasificar los tipos de rocas con más del 80% de precisión, y la diferencia entre el rendimiento de los métodos fue estadísticamente pequeños.

El uso de datos MWD proporcionaron una buena estimación de los verdaderos parámetros físicos y tiene un gran potencial de mejorar la caracterización del subsuelo.

- ♣ Basarir, H., Wesseloo, J., Karrech, A., Pasternak, E. & Dyskin, A. (2017). The use of soft computing methods for the prediction of rock properties based on measurement while drilling data. *Deep Mining 2017: Proceeding of the Eighth International Conference on Deep and High Stress Mining*, 537-551. [7]

Aquí se realiza una revisión de la literatura sobre el tema de la tecnología MWD para la predicción de las propiedades del macizo rocoso. Donde indica que los diferentes parámetros de perforación están interrelacionados y deben considerarse los parámetros de perforación cuando se correlacionan con las condiciones geotécnicas.

Además, se presenta un estudio de caso con la integración de métodos computacionales blanda como el sistema de inferencia difusa adaptativa ANFIS (adaptative neuro fuzzy inference system) con datos obtenidos de MWD para la predicción del macizo rocoso y la designación de la calidad de la roca RQD (rock quality designation).

Los parámetros medidos MWD calculados e inferidos con mayor frecuencia son profundidad (m), tiempo de perforación (s), velocidad de rotación (RPM), fuerza de arrastre (kgf) y presión media de lavado (kgf/cm^2), también se consideran parámetros medidos como la vibración (Nm/s) y el nivel de sonido (dB).

Mientras que los parámetros calculados son la tasa de penetración, el torque y la energía específica. Entregando el consumo de la energía específica (SE) durante la perforación se puede calcular en función de las variables de perforación medidas utilizando la ecuación 1.2 mencionada anteriormente.

El estudio realizado donde se utilizó el modelo ANFIS para relacionar los parámetros MWD

con RQD, indica que es adecuado para obtener y cuantificar correlaciones complejas entre los parámetros MWD y las condiciones geotécnicas, entregando una buena correlación con RQD.

- ♣ Manzoor, S., Liaghat, S., Gustafson, A., Johansson, D. & Schunnesson, H. (2020). Establishing relationships between structural data from close-range terrestrial digital photogrammetry and measurement while drilling data. *Engineering Geology*, Vol 267. [8]

En este artículo, los datos estructurales se obtienen de diferentes frentes de banco de una mina a tajo abierto en Leveäniemi de Luossavaara-Kiirunavaara AB (LKAB) en Suecia, utilizando un paquete de software comercial, ShapeMetriX3D (de 3GSM). Esos datos se comparan con los datos MWD que se recopilaban del Epiroc totalmente mecanizado (Atlas Copco) SmartROC D65 (figura 1.4), un equipo de perforación DTH, para establecer ciertas relaciones entre los parámetros de perforación y las estructuras del macizo rocoso.



Figura 1.4 Perforadora DTH SmartROC D65 de Atlas Copco.

El sistema de monitoreo recupera y almacena datos registrados, el cual incluye el tiempo (AAAA-MM-DDThh:mm:ss), profundidad (m), presión de rotación (bar), velocidad de penetración (m/min), presión de alimentación (bar) y presión de percusión (presión del agua medida por bar), con un intervalo de muestreo de 5cm.

De los análisis que se lograron obtener se tiene que los parámetros de perforación como la presión de avance y de percusión no responden a las propiedades de la roca, sin embargo, la tasa de penetración y la presión de rotación si varían con respecto al macizo rocoso que se perforo.

1.2.3 Estimación de Variables en motores de Inducción

- ♣ Haron, A. R. & Idris, N. R. N. (2006). Simulation of MRAS-based Speed Sensorless Estimation of Induction Motor Drives using MATLAB/SIMULINK. *IEE International Power and Energy Conference*, 411-415. [9]

El documento se basa en el Model Reference Adaptive System (MRAS) como método para estimar la velocidad del rotor, utilizando dos modelos diferentes (el modelo de referencia y el modelo ajustable) para obtener un vector de error en que se comparan ambos como retroalimentación de la estimación de velocidad del rotor.

También se compara el rendimiento de un modelo MRAS de flujo de rotor y MRAS basado en back e.m.f. para estimar la velocidad del rotor, donde ambos esquemas utilizan ecuaciones del estator y ecuación del rotor como modelo de referencia y modelo ajustable respectivamente. El error se ajusta mediante un controlador PI dando la velocidad estimada de este.

Se realizó una simulación en MATLAB/Simulink donde se implementaron los estimadores en el accionamiento de una máquina de inducción de control directo de torque. Concluyendo que el BEMF-MRAS es un estimador versátil demostrando una buena capacidad de seguimiento y una excelente insensibilidad a las variaciones de los parámetros.

- ♣ Agrebi Zorgani, Y., Koubaa, Y. & Boussak, M. (2010). Simultaneous Estimation of Speed and Rotor Resistance in Sensorless ISFOC Induction Motor Drive Based on MRAS Scheme. *The XIX International Conference on Electrical Machine – ICEM 2010*, 1-6. [10]

El estudio propone un método de estimación simultánea de la velocidad y la resistencia de rotor para un accionamiento de motor de inducción convencional controlado por el flujo directo del estator ISFOC (Indirect Stator Flux Oriented Controlled). Se genera un algoritmo de adaptación basado en el esquema del sistema MRAS (Model Reference Adaptive System) para ajustar ambos parámetros mencionados.

Los modelos de referencia y ajustable fueron desarrollados en el marco de referencia del estator estacionario, utilizando el MRAS para la estimar la velocidad del rotor y la resistencia del rotor a partir de mediciones en los terminales de voltaje y corriente.

Se realizaron simulaciones mostrando que el método de estimación de velocidad y resistencia de rotor simultáneamente son precisas para una velocidad de referencia del accionamiento del motor de inducción con un torque a carga nominal.

- ♣ Vas, P. (1998). *Sensorless Vector and Direct Torque Control*, Oxford University Press. [11]

Este libro examina los accionamientos controlados por vectores sin sensores y los motores controlados por torque directo, siendo el motor de inducción el requerido para este trabajo, el cual describe modelos de estimación tanto de velocidad y torque, utilizando, siempre que sea posible, la teoría del vector espacial en un análisis matemático y físico detallado.

El libro incluye más de veinte unidades vectoriales, cinco tipos de accionamientos vectoriales basados en MRAS y once tipos de accionamientos controlados por control directo de torque (DTC). Donde destacan los modelos clásicos de estimación de flujo (Corriente, Voltaje e híbrido), utilizados para este trabajo.

- ♣ Bose, B. K. (2002). *Modern Power Electronics and AC Drivers*, Prentice Hall. [12]

El autor en este libro describe variados temas sobre la electrónica de potencia, siendo el de nuestro interés la estimación de parámetros eléctricos para motores de inducción. Donde toma como referencia los modelos dinámicos del motor de inducción jaula de ardilla y los estimadores de flujo, torque y velocidad.

1.2.4 Discusión

Se realizó una revisión bibliográfica agrupada temáticamente, donde en el primer apartado 1.2.1 del capítulo se hace una recapitulación del estudio previo que se emplea como base para realizar la puesta en marcha del sistema. En este estudio se describe un set de sensores disponibles, pruebas experimentales mediante simulación de observadores, verificando sus funcionamientos y dando a conocer los parámetros a analizar para la realización del sistema MWD.

En el apartado 1.2.2 se analizan distintos métodos tecnológicos que se realizaron para la caracterización y clasificación de rocas mientras se perfora, los cuales algunos son ejecutados por empresas mineras con el fin de buscar innovación, aumentar la eficiencia y reducir gastos, proporcionando información y datos de perforadoras DTH al estudio.

Lo que se tiene en común en cada artículo descrito es el uso del método MWD como principal técnica de medición, ya que, a partir de los datos obtenidos se proceden a realizar

diferentes técnicas. Además, ~~agregar~~ que en la mayoría de los estudios las variables de interés son: profundidad, tiempo, velocidad de rotación y presión, del cual a partir de estos se calculan otros parámetros necesarios como la tasa de penetración, torque y energía específica. Todo esto con el mismo objetivo, que es la clasificación y caracterización de las rocas.

Las revisiones de estos artículos son fundamentales para tener un enfoque claro con respecto a la técnica MWD y realizar una puesta en marcha con los parámetros más influyentes en la perforación de rocas.

En el apartado 1.2.3 se realiza una revisión centrada en los métodos de estimaciones de variables de un motor de inducción, destacando la estimación de flujo como base de los modelos de estimación de voltaje, corriente, híbrido (las tres centradas en la estimación del torque) y la técnica MRAS (estimador de velocidad del rotor), para este último se detalla en [9] realizando una comparación entre dos métodos.

El artículo [10] es un estudio donde se utiliza la técnica MRAS, poniéndolo en práctica y obteniendo resultados confiables para el autor, obteniendo argumentos necesarios para la utilización de esta técnica, la cual se abordará en este trabajo.

1.3. Objetivos

A continuación, se mencionarán los objetivos generales y específicos que se abordan en este proyecto de habilitación profesional.

1.3.1 Objetivo General

Realizar la puesta en marcha del Sistema MWD para perforadora DTH incluyendo medición y estimación de variables electromecánicas.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Realizar una revisión bibliográfica actualizada de sistemas MWD en ambiente controlado.
- Evaluar nuevo algoritmo de estimación de velocidad para motores de inducción utilizando MRAS.
- Seleccionar estimadores de velocidad y torque implementados en Dspace MicroLabBox 1202 a partir de mediciones experimentales realizadas con perforadora DTH.
- Seleccionar set de sensores monitoreados en Dspace MicroLabBox 1202 y SensorConnect a partir de mediciones experimentales realizadas con perforadora DTH.

- Integrar set de sensores y observadores en un único sistema MWD.
- Analizar resultados preliminares obtenidos de las pruebas experimentales en perforaciones realizadas con el sistema MWD en perforadora DTH.

1.4. Alcances y Limitaciones

La redacción de este trabajo de habilitación profesional se centra en una puesta en marcha del equipo de perforación roto-percussiva con martillo DTH que incluye un sistema MWD (monitoreo y registro en línea de variables), utilizando un set de sensores disponibles, donde se encuentra el sensor de profundidad, sensor de presión y deformación angular. Además, la obtención de velocidad y torque utilizando algoritmos de estimación robustos. Para su obtención es necesario la medición de voltaje y corriente de estator del motor de inducción que se encuentra en la perforadora DTH mediante sondas de voltaje y corriente.

Los sensores serán montados estratégicamente en la perforadora DTH para su eventual verificación de su funcionamiento y que sus mediciones sean coherentes. Para la adquisición de datos se utilizará la Dspace MicrolabBox 1202 (para los sensores de profundidad y presión), mientras que para la deformación angular se utilizará la SG-LINK-200 y la puerta de enlace WSDA-BASE-101-LXRS. Logrando el completo funcionamiento del equipo de perforación DTH y el sistema MWD.

Una vez teniendo todo funcionando correctamente se realizarán pruebas de perforación preliminares acotadas a la disponibilidad de rocas o materiales.

1.5. Temario y Metodología

En el capítulo 1, se realiza una presentación del proyecto de habilitación profesional a realizar y se plantean objetivos claros a cumplir, además, se realiza una revisión bibliográfica actualizada siendo el principal sustento teórico para afrontar el trabajo de mejor forma. Abordando una serie de documentos, trabajos y libros relevantes sobre la caracterización de rocas en minas con sistemas MWD y sobre el modelo dinámico de la máquina de inducción para los algoritmos de estimación de flujo, torque y velocidad.

En el capítulo 2, se contextualiza el trabajo describiendo cada parte del sistema de perforación DTH y su funcionamiento. La perforadora DTH trabaja en conjunto con dos sistemas (neumático y eléctrico). Además, se entregan soluciones a problemáticas en el funcionamiento de la perforadora DTH.

En el capítulo 3, se definen las variables de interés para el sistema MWD, también se realiza una descripción del funcionamiento y su respectivo montaje de los diferentes sensores que medirán los parámetros necesarios para el sistema de monitoreo, realizando pruebas individuales para su correcto uso. Además, se detallan los modelos de estimación de torque y velocidad (Modelo de Voltaje, Modelo de corriente, Modelo Híbrido, MRAS y BEMF-MRAS) con sus respectivas pruebas para corroborar su adecuado funcionamiento.

En el capítulo 4, se muestra el proceso para conseguir un ambiente de trabajo experimental seguro, la fabricación de muestras y resultados de estudios. Además, se realizarán las pruebas preliminares con todo el sistema implementado en una mesa de trabajo (sensores y estimadores). Mientras se realiza la perforación a las distintas muestras se irán adquiriendo los datos necesarios de las variables de interés, realizando su respectivo análisis a los primeros resultados obtenidos.

Capítulo 2. Sistema de Perforación DTH

2.1. Introducción

La perforación es una de las operaciones más importantes dentro de la actividad minera ya sea a rajo abierto o subterránea, se realiza con la finalidad de realizar agujeros en el macizo rocoso.

En la actualidad la aplicación de las perforadoras DTH es extensa y variada, sus ventajas y versatilidad frente a otros sistemas de perforación han hecho que nuevas aplicaciones y versiones de perforadoras aparezcan cada año.

Una de las principales características del sistema DTH es que la roto-percusión se realiza directamente sobre la broca en el fondo del pozo, a diferencia de otros tipos de perforadora que esto ocurre en la superficie a través de las barras.

La perforadora DTH reúne conceptos de electricidad y neumática. El aire a presión es necesario para barrer el agujero y accionar componentes mecánicos y la electricidad se utiliza para la rotación, accionamientos de equipos, etc. La penetración de la broca ocurre debido a la combinación de 4 acciones: percusión, rotación, avance y barrido.

Para este proyecto de habilitación profesional se cuenta con una perforadora DTH que contiene un martillo ubicado en la parte inferior. Este capítulo abordará las características de cada elemento del sistema de perforación DTH, además del accionamiento eléctrico (rotación) por un Variador de Frecuencia conectado a un motor de inducción y neumática (percusión) mediante un Compresor de aire conectada a la perforadora.

2.2. Sistema de perforación DTH

La perforadora a utilizar para este proyecto es la YGD100 DTH, la que comúnmente se utiliza para perforaciones en carreteras, pozos de agua y rocas. Este equipo es ligero de fácil movilidad y operación en comparación a las perforadoras industriales de esta categoría (DTH).

El movimiento rotatorio lo realiza por medio de un motor de inducción, mientras que la acción percusiva es por medio de un compresor de aire, conectadas a las válvulas de control neumático, la estructura de la perforadora se presenta en la Figura 2.1.

Tabla 2.1 Parámetros de la Perforadora DTH.

Parámetros	Magnitud
Modelo	YGD100
Diámetro de perforación	90-130 mm
Profundidad de perforación	25 m

Velocidad de rotación	110 rpm
Presión de aire	0.5-1 Mpa
Consumo de aire	6 m ³ /min
Dimensiones	2.28x0.44x0.55 m
Peso	470 Kg

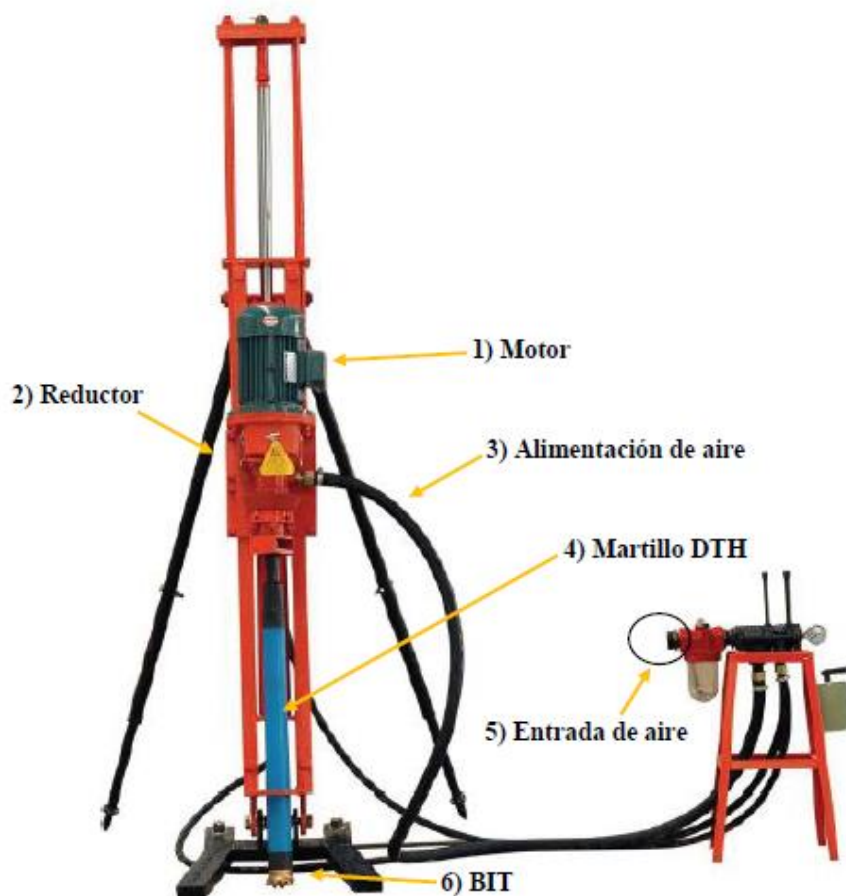


Figura 2.1 Perforadora DTH.

2.2.1 Montaje Perforadora DTH

Debido a la inestabilidad de la perforadora durante su operación, se construyó una estructura de acero utilizándose como soporte y mantenerla fija a la hora de realizar trabajo en ella, evitando accidentes, facilitando su traslado e instalación. En la figura 2.2 se encuentra el dimensionamiento de la estructura, cabe destacar que las barras implementadas de forma horizontal tienen un espesor de 5cm.

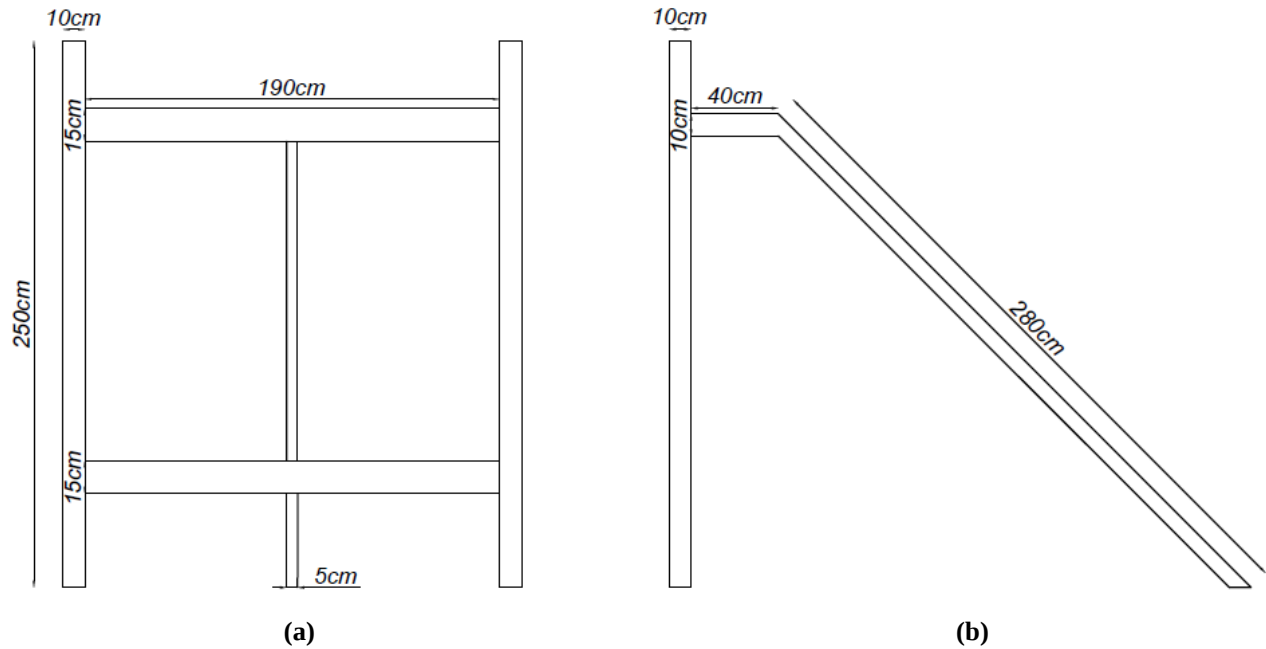


Figura 2.2 Dimensionamiento estructura de acero.

(a) Vista Frontal. (b) Vista Lateral.

Se montó la perforadora DTH en la estructura de acero, esta fue apoyada por una grúa pluma y poleas, en la en la figura 2.3a y figura 2.3b se encuentra parte del procedimiento realizado y en la figura 2.4 la perforadora DTH montada y fijada.

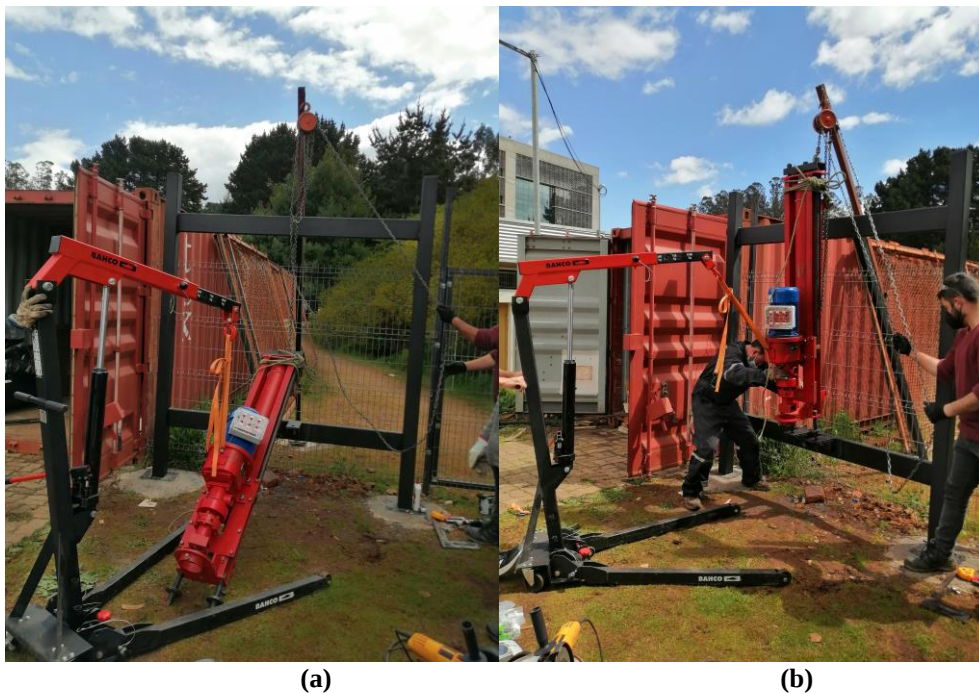


Figura 2.3 Montaje perforadora DTH.

(a) Levantamiento de perforadora DTH. (b) Instalación perforadora DTH.



Figura 2.4 Perforadora DTH montada en estructura.

Además, en el mástil de la perforadora DTH se implementó un alzador de acero con altura 5.5cm, limitando la carrera de la perforadora, esto con el fin de obtener mayor distancia entre el suelo y la broca para evitar problemas de altura a la hora de realizar pruebas.



Figura 2.5 Alzador límite de carrera.

2.3. Sistema electromecánico

Este sistema se conforma por dos etapas, la primera ocurre conectando a una red trifásica el variador de frecuencia y alimentar con la energía necesaria que requiere el motor de inducción para su accionamiento. Una vez que el motor está funcionando acoplado al reductor, ocurre la segunda etapa, que consta de transformar la energía eléctrica a energía mecánica, esta energía mecánica es transferida hacia el martillo y el bit para realizar la perforación.

2.3.1 Variador de frecuencia

El variador de frecuencia Parker AC690+ funciona con una tensión nominal de 380V/50Hz, diseñado para el control de velocidad de motores de inducción trifásicos. El software DSE Lite permite monitorear parámetros de importancias como corriente y voltaje RMS, velocidad, torque, entre otras.



Figura 2.6 VDF Parker AC690+.

El VDF se alimenta directamente de la red trifásica de 380V/50Hz, se puede controlar localmente usando el panel de control o remotamente usando el software DSE Lite, en ambos casos se da acceso a los parámetros del motor, que son ajustables. Además, se puede configurar el tipo de control de flujo, ya sea, Closed loop vector, V/F, Sensorless vector (siendo este último el usado en este trabajo), entre otras características que se requiera dependiendo del uso del usuario. El variador requiere el ingreso de los datos de placa del motor para su accionamiento.

2.3.2 Motor eléctrico

En la perforadora se encuentra un motor de inducción de 4 polos, modelo Y2-4E, que se alimenta con una tensión trifásica de 380V, que se debe conectar en delta como se muestra en la figura 2.7, esto debido a los valores requeridos para su accionamiento.

Tabla 2.2 Parámetros del Motor de Inducción.

Características	Magnitud
Modelo	Y2-4E
Potencia	4 kW
Tensión	380 V
Corriente	8.8 A
Velocidad	1440 rpm
Inercia	0.0153 Kg-m ²
Coeficiente viscoso	0.0019 Nm-s/rad

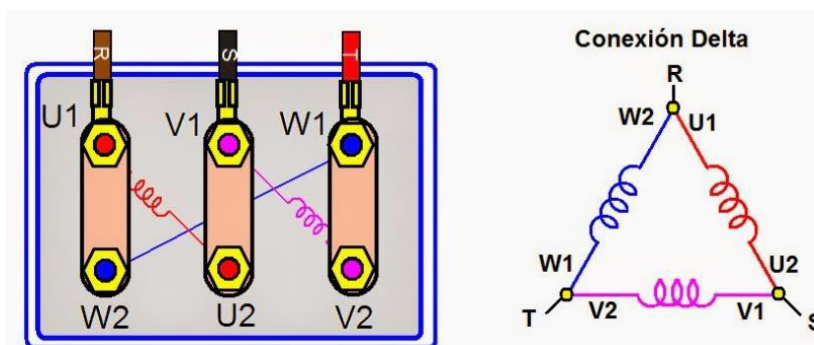


Figura 2.7 Conexión delta de un motor de inducción trifásico.

Cuando el motor eléctrico está funcionando, la electricidad se convierte en torque y velocidad que se transmite al reductor acoplado al martillo.

2.3.3 Reductor

Es el encargado de convertir el torque mecánico y velocidad del motor para que la perforadora cumpla con los requisitos. El reductor de velocidad utilizado (figura 2.8) consta de cuatro niveles con una transmisión efectiva de 11:1. Según [2] el conjunto motor-reductor tiene una inercia de 0.0244 Kg-m² por lo que la inercia propia del reductor es de alrededor un 60% de la inercia del motor, mientras que el coeficiente viscoso se ve aumentado 5 veces que el del motor en vacío.



Figura 2.8 Caja reductora.

2.3.4 Martillo DTH

El martillo es una herramienta de impacto neumática que utiliza aire comprimido como su poder, es decir avanza con la perforación y, por lo tanto, percute directamente sobre la broca. Consta de un cilindro cuya longitud es en función de la carrera del pistón que se encuentra al interior y un diámetro acorde con el diámetro de perforación (tabla 2.3). Además de percutir, el martillo gira debido al conjunto motor-reductor del sistema DTH.

Los componentes interiores del conjunto de martillo DTH forma dos cámaras, una frontal (adelante del martillo cerca de la broca) y una cámara posterior (atrás del martillo, más cerca de la culata).

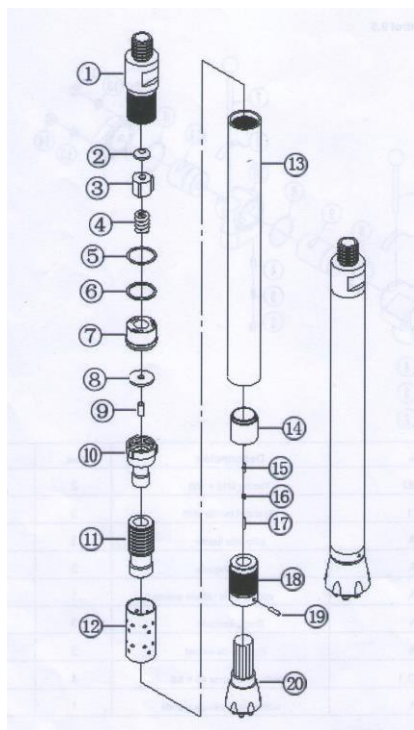


Figura 2.9 Conjunto Martillo DTH.

Tabla 2.3 Conjunto Martillo DTH.

Número	Descripción
1	Culata
2	Cabeza superior
3	Válvula de retención
4	Resorte
5	Arandela de hierro
6	Anillo de goma
7	Tapa de la Válvula
8	Empaquetadora
9	Pin asiento de la válvula
10	Asiento de la válvula
11	Pistón
12	Cilindro de aire
13	Mango exterior
14	Guía de la manga
15	Enchufe de goma
16	Resorte
17	Pasador vertical
18	Conector frontal
19	Pasador lateral
20	Broca o Bit

El pistón es la única pieza móvil, dirige el aire de red a una de las cámaras, mientras la otra permanece en comunicación con el fondo de la perforación, creando de esta manera una diferencia de presiones entre ambas cámaras. Esta diferencia de presión hace que el pistón adquiera un movimiento de vaivén, golpeando sobre la broca, quien a su vez percute sobre la roca, perforándola.

El aire para mover el pistón pasa a través de la broca y barre el fondo de la perforación, sacando los detritos al exterior. De esta manera, se mantiene siempre limpia el área de impacto del Bit con el terreno, haciendo más eficiente la perforación, en la figura 2.10 se explica gráficamente lo anteriormente explicado generando la diferencia de presión y la percusión.

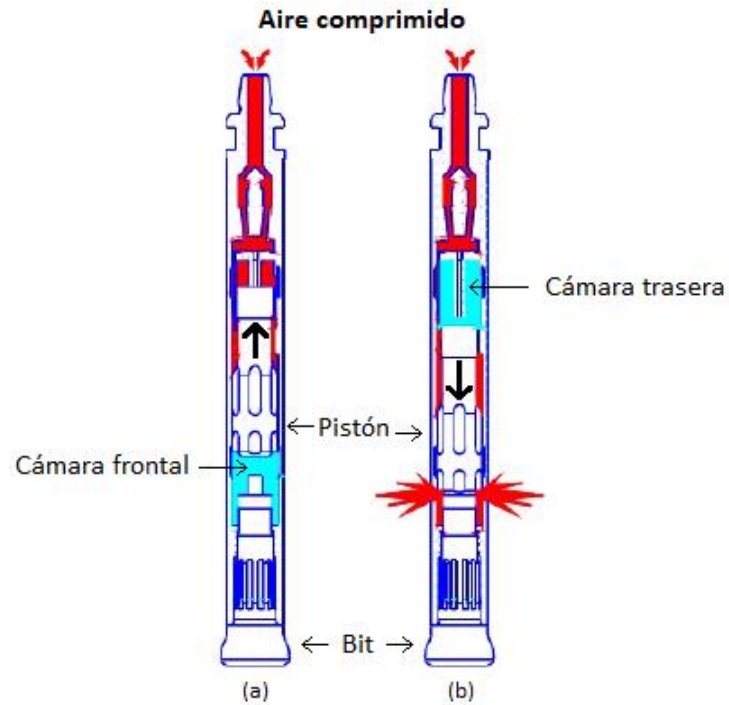


Figura 2.10 Esquema movimiento pistón.

(a) Pistón recogándose. **(b)** Percusión.

El martillo que se implementara en el sistema de perforación DTH se nos presenta en la figura 2.11, posee una longitud de 1,07m y un diámetro de 9cm.



Figura 2.11 Martillo DTH utilizado.

2.3.5 Broca o Bit

En el mercado se pueden encontrar con distintos tipos de broca para perforadoras DTH, unas de las diferencias son por el tipo de cara que tienen tal como se muestran en la figura 2.12.

Cada una se utiliza para distintos tipos de roca, la cara cóncava ayuda a perforaciones con menor desviación en roca media a dura, la cara cóncava-convexa es para mayor velocidad de penetración y una menor desviación en rocas media a duras, las caras convexas son diseñadas para una mayor velocidad de penetración en rocas suaves y la cara plana son de uso general que rinde con todo tipo de roca.

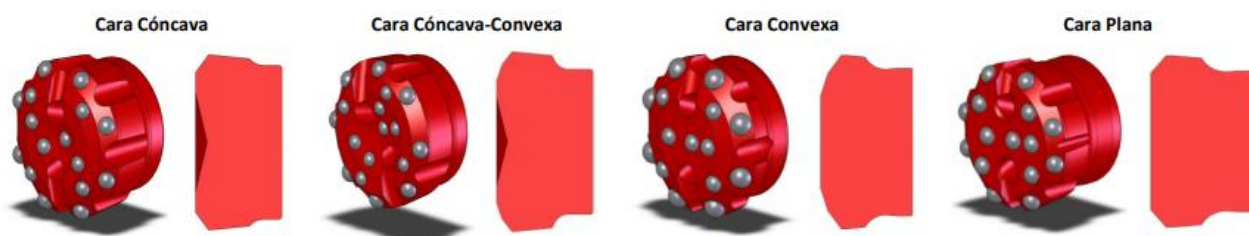


Figura 2.12 Tipos de cara Broca DTH

Otra diferencia a en el proceso de perforación es la geometría de los botones o insertos es fundamental, ya que, provoca que la velocidad de perforación sea mayor o menor. En la figura 2.13 se presentan algunos de los diseños que se encuentra en el mercado, siendo el cónico el de velocidad de penetración más rápida, mientras que el hemisférico más lento, además, destacar que entre más rápido sea, menor es su tiempo de vida y es más propenso al quiebre



Figura 2.13 Diseños de botones o insertos

Destacar que el número de botones que se encuentran en el bit es un factor a tener en cuenta ya que al tener un mayor número de estos y de menor diámetro la vida útil disminuye, mientras que, al tener un menor número de botones, la vida útil es mayor.

El tipo de broca que se implementara en el sistema de perforación DTH es de cara convexa y con botones de tipo cónico, además, tiene un largo de 19cm y en la cabeza del bit tiene un diámetro de 9cm, esta es presentada en la Figura 2.14.



Figura 2.14 Broca utilizada en Sistema DTH.

(a) Vista Frontal. **(b)** Vista Lateral.

2.4. Sistema neumático

Este sistema está compuesto por el compresor, tuberías, consola neumática, mangueras, conducto a través del martillo, columna de perforación y boquillas de la broca.

Se conforma por tres etapas, la primera etapa ocurre en el compresor, el cual se genera la presión de aire para el trabajo (8 bar), luego es expulsada por medio de una manguera de alta presión. La segunda etapa es donde se encuentra la consola neumática, que consiste en el control de válvulas de presión para alimentar a la perforadora por medio de mangueras neumáticas de alta presión. La tercera y última etapa consiste en la alimentación neumática a la perforadora DTH, en donde, se realizan dos trabajos, el primero es el encargado de subir el martillo y realizar la presión de empuje en la perforación (o bajar) y el segundo, que con el mismo aire que circula, es el responsable de accionar el pistón en el martillo, limpiar la broca y sacar los detritos hasta la superficie.

Además, una función secundaria es la de mantener fría la broca para evitar el sobrecalentamiento. En la figura 2.15 se explica gráficamente el trabajo realizado por el martillo para la realización de la percusión y limpieza.

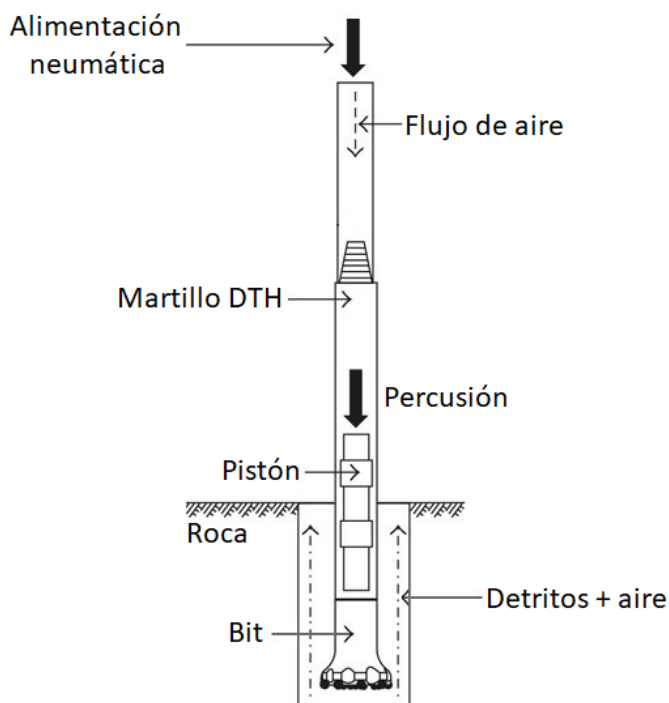


Figura 2.15 Estructura típica del sistema de perforación neumática.

2.4.1 Compresor

Para el accionamiento neumático de este trabajo se utilizó un compresor eléctrico de tornillo lubricado, modelo WBS-30A, cuya potencia nominal del motor integrado es de 30kW y proporciona una presión de trabajo igual a 8 bar, lo cual está dentro del rango de trabajo de la perforadora que se encuentra entre 5-10 bar. El compresor tiene una salida de aire de 1^{1/2} pulgadas, conectada a una manguera de alta presión que alimenta a la consola neumática de la perforadora.

2.4.2 Consola de control neumática

Esta consola es el segundo escalón del sistema neumático (figura 2.16), en ella se puede encontrar un recipiente de aceite lubricante, que realiza la mezcla aire-aceite para lubricar la perforadora mientras funciona.

La consola contiene dos juegos de válvulas neumáticas accionadas manualmente por palancas. La palanca número 1 de la figura 2.16 tiene la función de abrir y cerrar la válvula de aire para que llegue aire al martillo, la palanca número 2 tiene la función de enviar aire al cilindro de levante (figura 2.17) teniendo tres posiciones: hacia abajo, hacia arriba y al centro, la primera envía aire para subir la perforadora, la segunda para el empuje hacia abajo del martillo (bajar la perforadora) y un neutro el cual cierra la válvula sin enviar aire a ningún tubo.

En ella se encuentra un manómetro, el cual indica la presión de aire en las válvulas, con la unidad de medida Mpa.



Figura 2.16 Consola de control neumática.

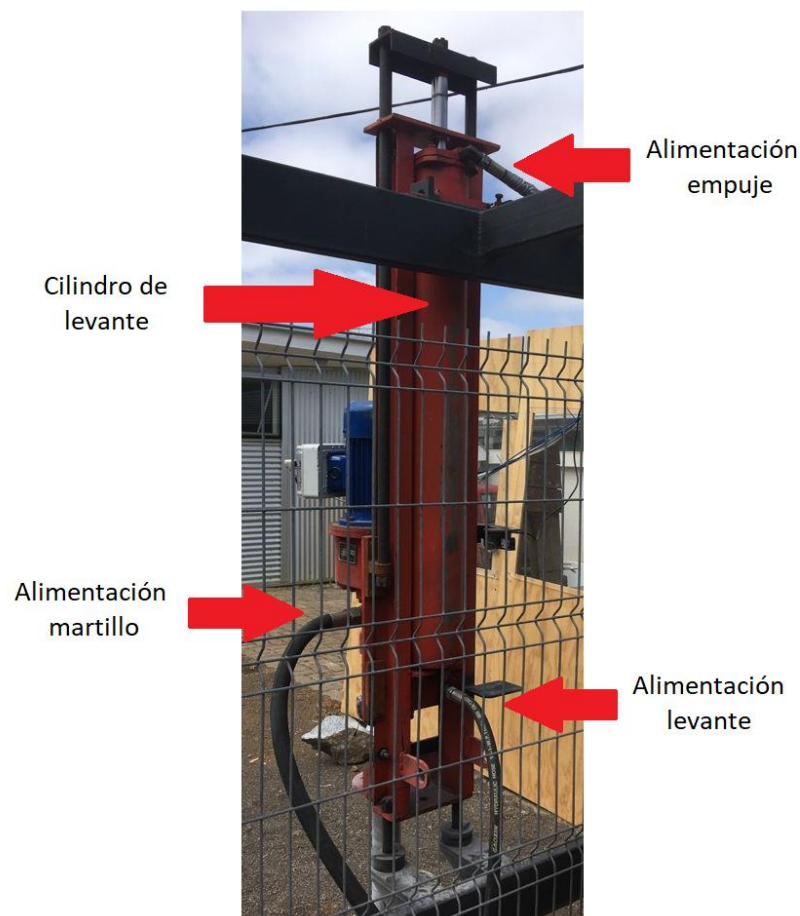


Figura 2.17 Cilindro de levante y alimentaciones neumáticas.

2.4.3 Válvula purga de aire

Para evitar que el compresor se detenga cuando llega a su máxima presión de trabajo, se agregó una válvula de bola manual (ver figura 2.18) a la entrada de la alimentación del martillo.

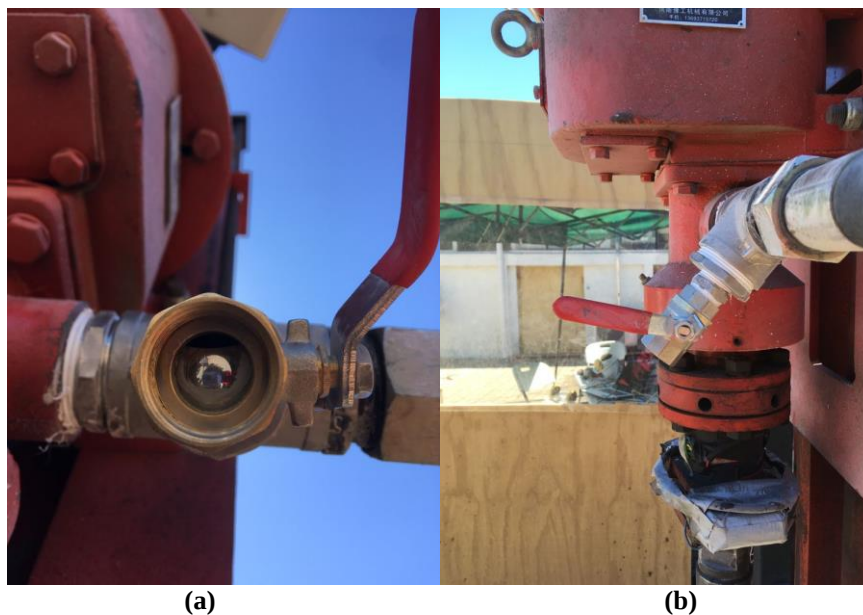


Figura 2.18 Válvula purga de aire.

(a) Vista frontal. **(b)** Vista lateral.

Con esta inserción de la válvula de purga de aire al sistema neumático, se logra regular la presión de forma manual, obteniendo una operación estable a la hora de realizar una perforación. El ángulo de trabajo de esta fue ajustado de tal manera que cumpla con los requisitos para realizar una perforación constante sin interrupciones.

En la figura 2.19 se puede observar el cambio de presión que se obtuvo al realizar esta modificación, en el primer grafico se ve una presión inestable, aumentando a su presión de operación para inmediatamente disminuir y luego repetir el mismo proceso. Una vez agregada la válvula (segundo gráfico) se regula esta presión obteniéndola de manera constante entre los 100s y 210s aproximadamente.

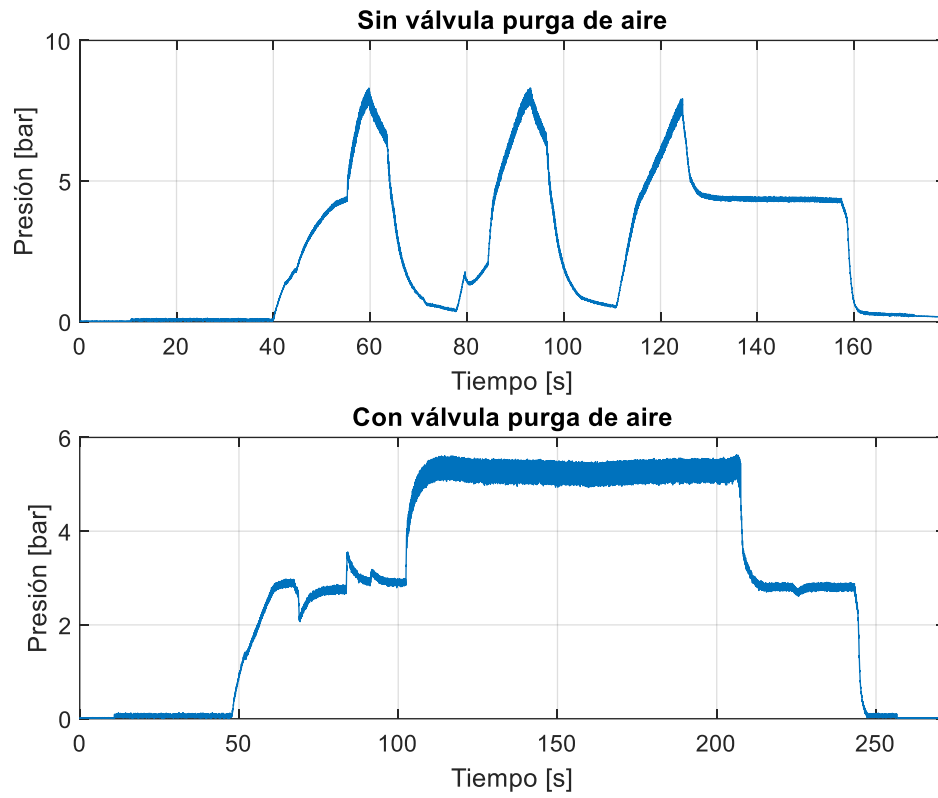


Figura 2.19 Presión en la perforadora antes y después de agregar válvula de purga de aire.

Capítulo 3. Sistema MWD basado en Observadores

3.1. Introducción

En este capítulo se presenta el sistema MWD, compuesto por sensores implementados en la perforadora DTH, además, estimadores de torque y velocidad de la máquina. De esta manera el sistema de monitoreo permite la recopilación de datos durante la perforación, luego de una adecuada evaluación de sensores y estimadores implementados.

Para el monitoreo de datos de las señales de interés requeridas se utiliza la plataforma Dspace MicroLabBox 1202 en conjunto de software especializados, tales como, el software Controldesk.

3.2. Esquema General

En los sistemas MWD, se registran variables de tal manera que los datos obtenidos nos proporcionen información necesaria de las condiciones de la masa rocosa que se está perforando.

El monitoreo se realiza mediante sensores instalados en la consola de control neumática, encargados de capturar las variaciones de presión. En la perforadora se encuentra el sensor de distancia, encargados de registrar la profundidad, además, se sondea el voltaje y corriente del motor de inducción trifásico. Además, se tiene el procesador MicroLabBox encargado del acondicionamiento, filtrado de señales y de realizar el procesamiento de los datos para el cálculo de otros parámetros de interés.

En la figura 3.1 se presenta un esquema general de lo antes explicado, donde los colores indican los parámetros utilizados dentro del procesamiento de los datos, es decir, las señales de voltaje y corriente se utiliza para la obtención del flujo, velocidad y torque (líneas de color rojo) y la profundidad para la obtención de la ROP (líneas de color verde), mientras que para el cálculo de la energía específica (línea de color azul) se requiere de la ROP, velocidad, torque y fuerza de empuje (línea de color rosa). La presión de empuje y del martillo solo se monitorea para verificar el correcto funcionamiento del sistema neumático.

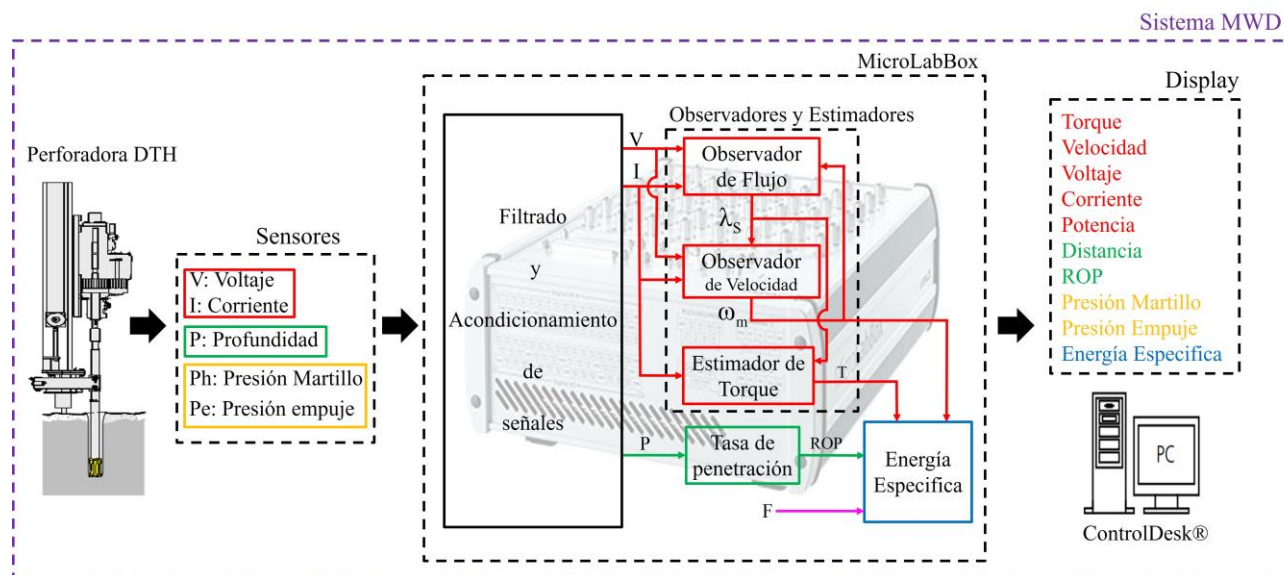


Figura 3.1 Diagrama general sistema MWD.

Los parámetros del MWD se divide en 2 grupos, independientes y dependientes. Los dependientes o variables de operación, son aquellos controlados por el operador, mientras que el otro grupo se relacionan con las condiciones del macizo rocoso, por lo que están ligados a los otros parámetros como a las características de la roca. En la tabla 3.1 se encuentra un resumen de los sensores utilizados, estimadores y tipo de variable.

Tabla 3.1 Tabla resumen de variables independientes y dependientes.

Variable	Sensor	Estimador	Tipo de variable
Profundidad	TOF-DL250A	-	Independiente
ROP	TOF-DL250A	-	Dependiente
Presión Empuje	WIKA A-10	-	Independiente
Presión Martillo	WIKA A-10	-	Independiente
Deformación angular	CEA-XX-250USA-350	-	Dependiente
Voltaje estator	Pintek DP-25	-	-
Corriente estator	i30s	-	-
Enlaces de flujo	-	Observador: Mod. Voltaje, Mod. Corriente, Mod. Híbrido	Dependiente
Velocidad	-	Observador: MRAS, BEMF-MRAS	Independiente
Torque	-	Ecuación del torque eléctrico	Dependiente
Fuerza de empuje	-	Segunda ley de Newton	Independiente

3.3. Sistema de adquisición y procesamiento de datos

El sistema de adquisición de datos está compuesto por el hardware Dspace MicroLabBox

1202 que permite configurar distintas aplicaciones de control, prueba o mediciones de forma rápida y sencilla. En la tabla 3.2 se detalla el número de entradas analógicas, niveles de voltaje tolerable para la lectura de sensores, parámetros de operación y componentes del procesador MicroLabBox.



Figura 3.2 Dspace MicroLabBox 1202.

Tabla 3.2 Especificaciones Dspace MicroLabBox 1202.

Parámetros	Magnitud
Alimentación	220V
Frecuencia	50Hz
Memoria RAM	1GB
Tipo de procesador	Dual-Core de 2 GHz
Entradas/salidas digitales	48 canales (2.5/3.3/5) V
Salidas analógicas	16 canales ($\pm 10V$, $\pm 8mA$)
Entradas analógicas	24 canales ($\pm 10V$)

El procesador MicroLabBox es compatible con muchos paquetes de software Dspace, de los cuales incluye ControlDesk 6.1, que proporciona acceso a la aplicación en tiempo real durante la realización del trabajo y el Real-Time Interface (RTI) para Simulink para la integración de modelos. Con el software ControlDesk 6.1 es posible trabajar de manera online o guardar los datos para luego procesarlas de forma offline.

Como se ve en el esquema presentado en la figura 3.1, el procesador MicroLabBox requiere de los sensores para realizar el trabajo de acondicionamiento y filtrado de señales, además, realiza el cálculo de variables de velocidad, torque (ambos por medio de estimadores) y de la tasa de penetración, utilizadas para la obtención de la energía específica, posteriormente estas variables son mostradas y guardadas en el software ControlDesk.

3.4. Sensores

El set de sensores para el monitoreo de señales de perforación se encuentra compuesto por los sensores de profundidad y de presión. Cada uno fue escogido por sus características acordes para nuestro sistema de adquisición de datos. Cada sensor será descrito con su respectiva configuración, montaje y se realizará una prueba para corroborar su correcto funcionamiento.

3.4.1 Sensor de deformación angular

Para la obtención de las deformaciones del material se usó una Strain Gauge o galga extensiométrica, usados para la medición eléctrica de diversas magnitudes mecánicas como: Presión, Carga, Torque, Deformación, etc.

En este estudio, se cuenta con una galga extensiométrica Full-Bridge, este dispositivo contiene cuatro resistencias, cada una de ellas forman un ángulo de 45° con respecto al eje principal (figura 3.3). La grilla está pegada a un fino respaldo llamado carrier o portador, el cual está sujeto directamente a la pieza que se desea medir. Por lo tanto, la deformación experimentada por la pieza es transferida directamente a la galga extensiométrica, el cual responde con cambios de resistencia eléctrica.

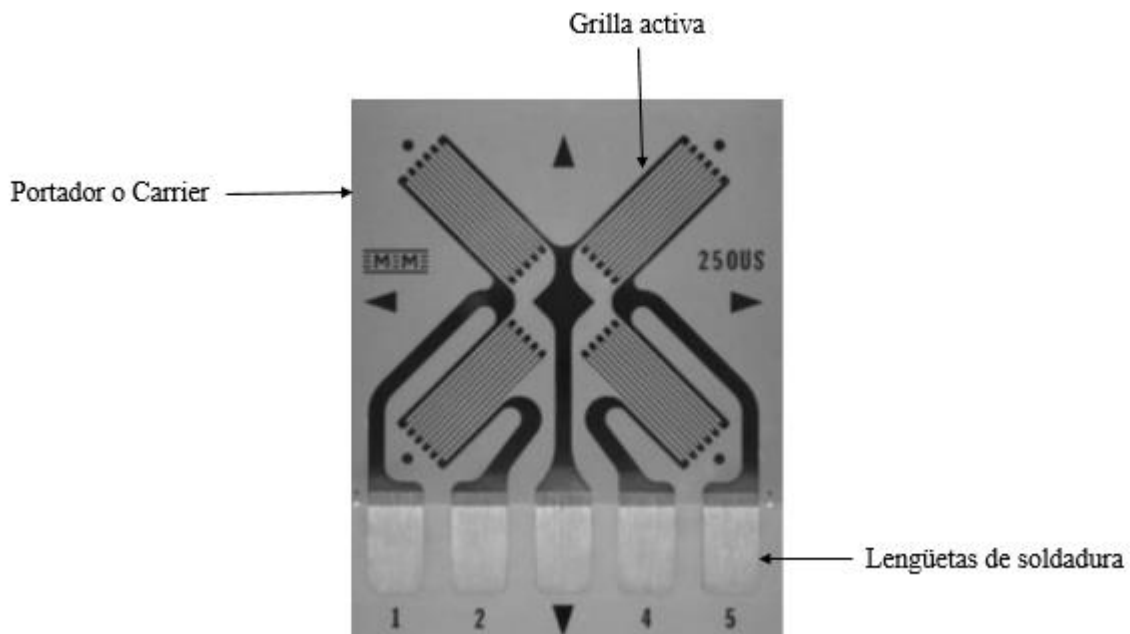


Figura 3.3 Strain Gages CEA-XX-250USA-350.

Destacar que de la deformación angular no se obtuvieron los resultados esperados en el proceso de este proyecto. Como se muestra en la figura 3.4, el material en donde se instaló está

completamente desacoplada del martillo, este último es el que recibe directamente el impacto entre la muestra y el bit. Además, el espacio para la instalación del sensor en la maquina DTH es reducido y complejo, siendo un problema para su aplicación. Aun así, la calibración, montaje, configuración y respectiva prueba de funcionamiento se encuentra en Anexo A.

Además, se encuentran disponibles los datos obtenidos del sistema de monitoreo de las pruebas preliminares del capítulo 4 en Anexo E.2.



Figura 3.4 Ubicación Strain gauge.

3.4.2 Sensor de Profundidad

El sensor utilizado se muestra en la figura 3.5, pertenece a la serie FASTUS TOF-DL, funciona con un sensor laser de distancia ultra compacto capaz de detectar a distancia hasta 2.5m, además, posee una pantalla digital incorporada que permite configurar algunos ajustes y la distancia mostrando valores numéricos en centímetros. Sus principales características se encuentran en la tabla 3.3, las cuales son acordes para el uso en la MicroLabBox 1202.

Tabla 3.3 Parámetros Sensor TOF-DL250A.

Parámetros	Magnitud
Modelo	TOF-DL250A
Distancia de censado	0.25-2.5m
Salida Promedio	390 μ W
Periodo de muestreo	200 μ s
Tiempo de respuesta	0.5 ms Max.
Salidas analógicas	0-10VDC
Fuente de alimentación	12-30 VDC
Consumo de corriente	Max. 60mA



Figura 3.5 Sensor laser TOF-DL250A.

El sensor de profundidad funciona utilizando el tiempo que tarda un pulso de luz láser emitido en golpear un objeto y retornar al sensor, luego este tiempo es procesado internamente y se convierte en distancia, esto se conoce como el principio de “tiempo y vuelo” (ToF). En la figura 3.6 se explica de forma gráfica este principio de funcionamiento.

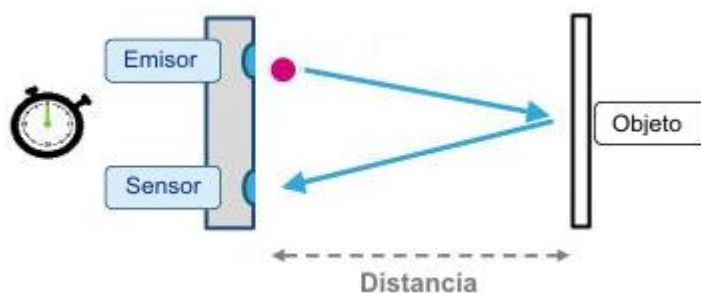


Figura 3.6 Principio de tiempo y vuelo.

La pantalla digital contiene indicadores, entre ellos está el indicador de salida (naranja), indicador de laser apagado (verde/rojo) y un indicador de estabilidad que se enciende (indicador central de color verde) cuando la medición es estable y se apaga (indicador central de color rojo) cuando la detección no es posible.

Para poder integrar el sensor en la perforadora DTH, se colocó en una carcasa y una base de acero, será ubicada en el lado derecho de la perforadora, ya que, en esta posición no hay objeto que intervenga y se utilizó un tope de acero, encargado de realizar el ToF mencionado anteriormente. El sensor fue montado en un lugar estratégico de la perforadora DTH, de tal manera que logre realizar las mediciones de forma correcta, en la Figura 3.7 se ve el sensor montado. El funcionamiento de este sensor fue corroborado en [2].

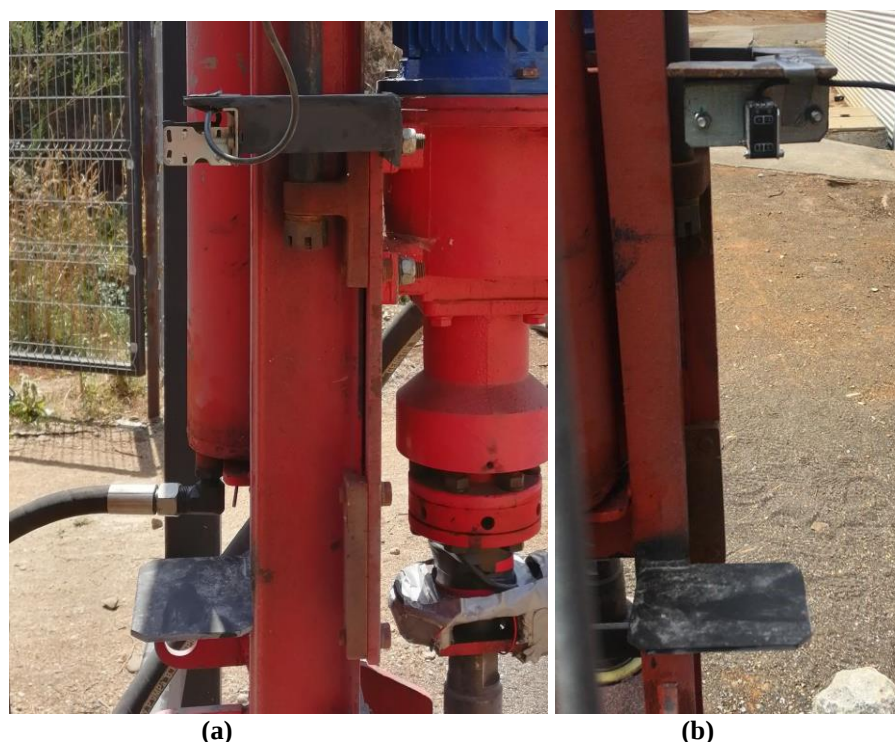


Figura 3.7 Sensor de distancia montado en la perforadora DTH.

(a) Vista Lateral Perforadora. **(b)** Vista Trasera Perforadora.

Con el sensor instalado en la maquinaria, es posible obtener la señal de desplazamiento y la tasa de penetración (ROP), que se define como la velocidad a la cual la broca del equipo perfora la roca y se obtiene por medio de la derivada de la posición.

La tasa de penetración o Velocidad de perforación se considera como uno de los parámetros más importantes del MWD, siendo el mejor para la correlacionarse con las condiciones de las rocas.

A continuación, se realizará una prueba al sensor montado y conectada a la MicroLabBox

encargada de adquirir y registrar las variables. De esta manera la salida analógica del sensor fue conecta a una entrada disponible mediante conectores tipo BNC.

Paralelamente se realizó un diagrama Simulink para obtener los parámetros de profundidad y tasa de penetración (ROP). El software ControlDesk 6.1 será el encargado de guardar y mostrar los datos en línea del sensor mientras se realiza la prueba.

La prueba consta en variar la posición de la perforadora DTH en el tiempo. En la figura 3.8 se observa que en el tiempo se produce ruido y variaciones bruscas ocasionadas por el movimiento de la perforadora (graficas de color rojo), es por ello que se optó por la inclusión de unos filtros pasa bajo (gráficos azules) con frecuencias de corte de 0.5/5/20 Hz.

Con el filtro de 0.5Hz y de 20Hz se observan retardos y pérdida de información, esto se ve en el primer tramo en que la perforadora cambia de posición (entre 2s y 7s), repitiéndose en el transcurso del tiempo, mientras que el filtro con frecuencia de corte de 5Hz no ocurre esto, siendo el más adecuado, obteniendo una señal de bajo nivel de ruido, un retardo no considerable y menor cantidad de perdida de datos. El diagrama de bode se encuentra en la figura B.1 del Anexo B.

Como observación, en el tramo entre 50s y 75s se ven unas lecturas de peak altos que perturban la medición, estos son ocasionados por la misma máquina, ya que, al realizar movimientos bruscos, el láser del sensor tiende a medir fuera de la plataforma, esta perturbación ocurre en ocasiones especiales, como por ejemplo, cuando se traba la máquina con alguna muestra o si en algún momento se llega a obstruir la manguera neumática, la presión hace que la máquina se mueva de manera brusca, estas perturbaciones ocurre de manera escasa, por lo que no influye en las mediciones.

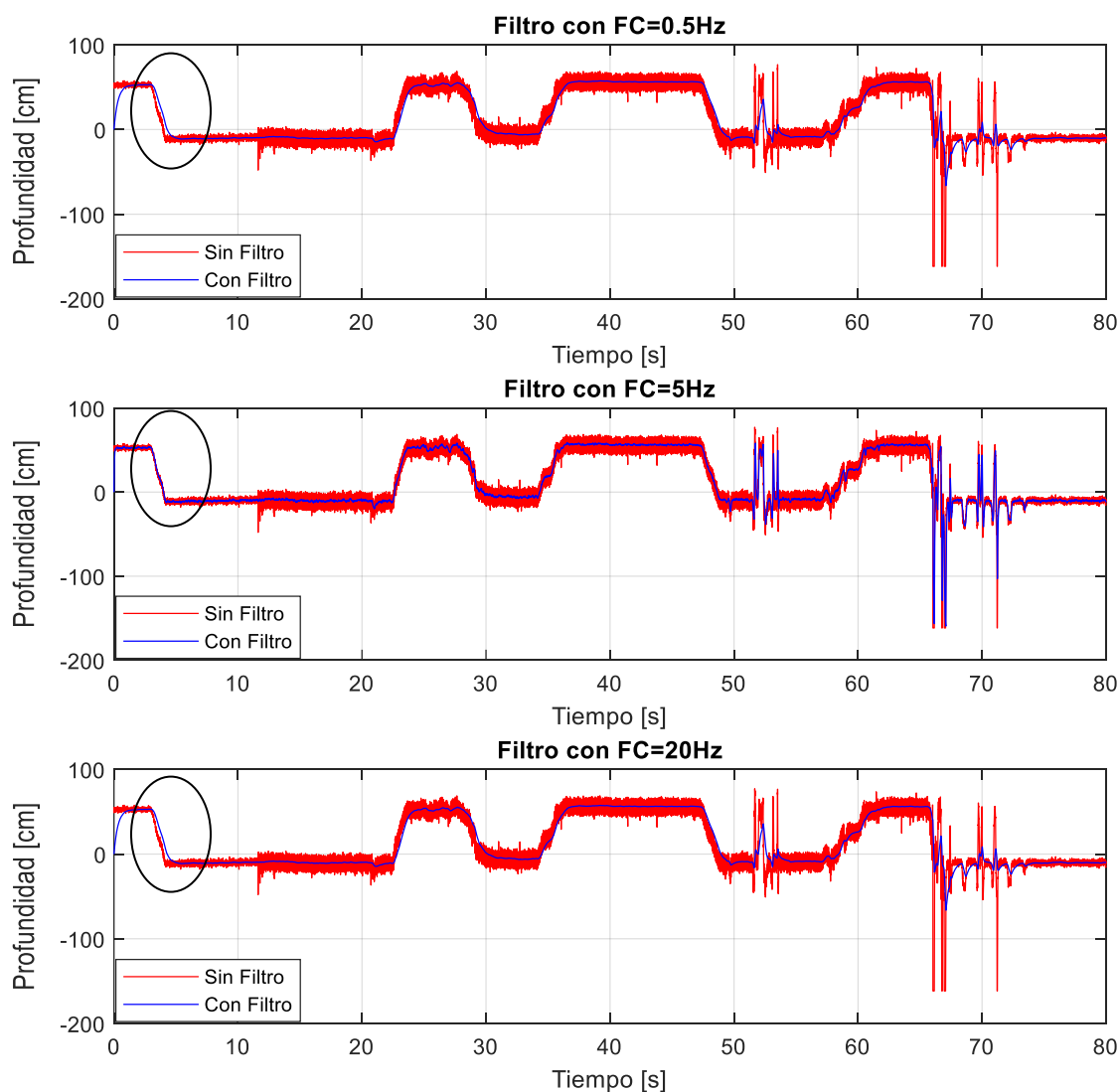


Figura 3.8 Prueba de posición Sensor de profundidad.

Una vez escogido el filtro pasa bajo para obtener un mejor procesamiento de datos del sensor de profundidad, se procede a observar la tasa de penetración.

La ROP se comporta de tal manera que al aumentar la posición la tasa de penetración es positiva, lo mismo ocurre al disminuir la posición, la tasa de penetración es negativa, cuando la posición se mantiene constante y fija la tasa de penetración es cero.

El resultado de la prueba realizada se muestra en la figura 3.9, a simple vista se puede ver que con los filtros con frecuencia de corte de 5Hz y 20Hz nos entregan una ROP ilegible, con un nivel de ruido alto, donde los cambios en la tasa ROP no son perceptibles. Caso contrario se tiene

con el filtro de 0.5Hz, se pueden observar claramente que a medida que ocurre un cambio de posición la tasa de penetración se mantiene constante con valores positivos o negativos dependiendo el caso y cuando la posición es fija la tasa de penetración es cero, siendo este filtro la mejor opción en cuanto a lectura de datos. El diagrama de bode se encuentra en la figura B.2 del Anexo B.

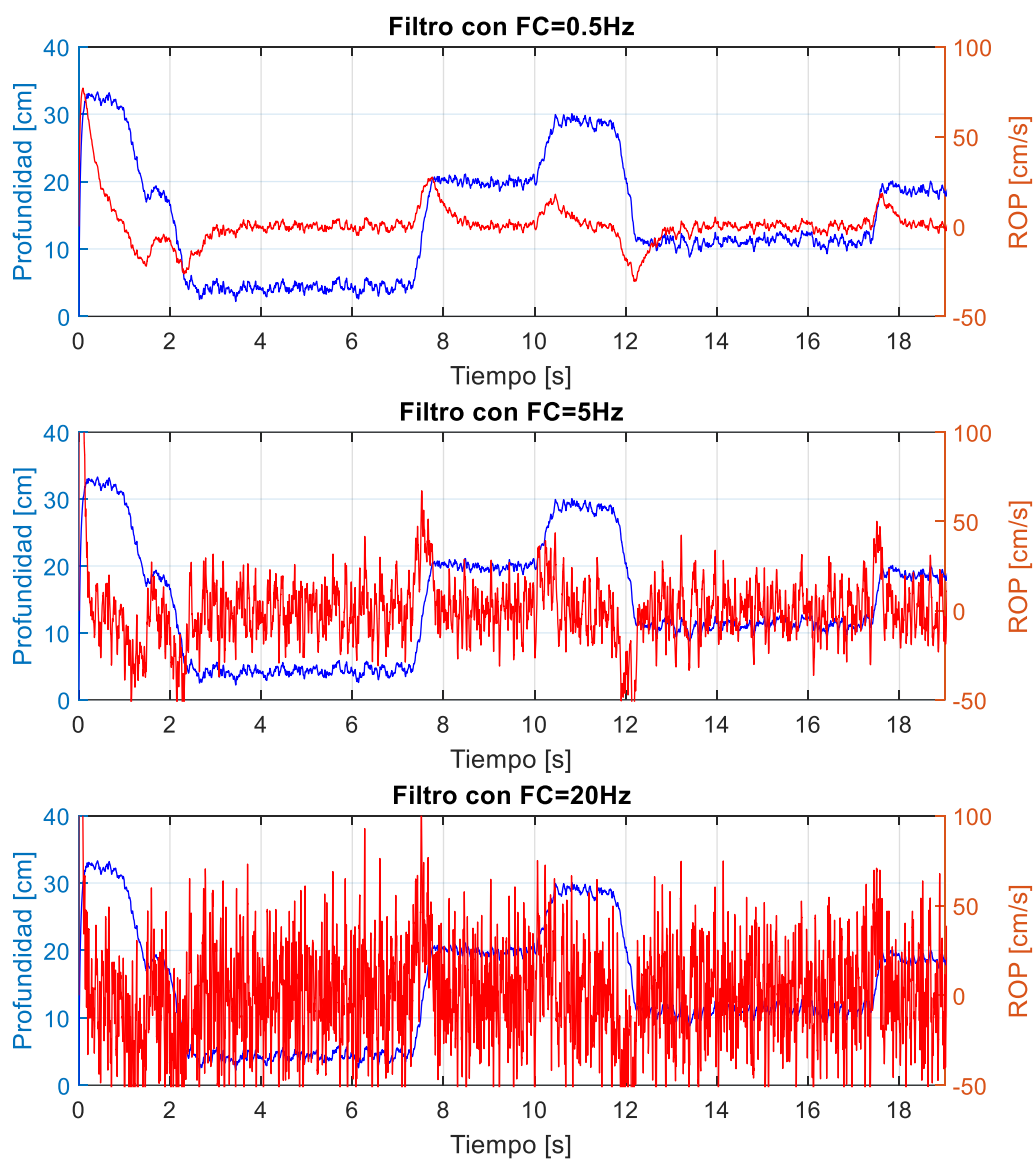


Figura 3.9 Prueba Tasa de penetración (ROP) Sensor de profundidad.

3.4.3 Sensor de Presión

Para monitorear la presión se usó el transmisor de presión WIKA modelo A-10 que se muestra en la figura 3.10, el cual está hecho para aplicaciones industriales, destacando su diseño compacto, además, de ser resistente brindando resistencia a vibraciones, golpes, amplias variaciones de temperatura, entre otras. En la tabla 3.4 se presenta sus principales características, las cuales son adecuadas para el uso a la par con la MicroLabBox 1202.

Tabla 3.4 Parámetros Transmisor de presión WIKA modelo A-10

Parámetros	Magnitud
Modelo	A-10
Alimentación	14-30 VDC
Señal de salida	0-10 VDC / 4-20mA / 0-5VDC
Peso	80 g
Tiempo de respuesta	<4 ms
Rango de medición	0-10 bar.
Sobrepresión momentánea	20 bar
Conexión de presión	G $\frac{1}{4}$ A DIN 3852-E



Figura 3.10 Transmisor WIKA de presión modelo A-10

Este sensor tiene distintas señales de salidas, las cuales son ajustables, en nuestro caso usaremos una salida de 0-10VDC, el cual se ajusta a las señales tolerables por la Dspace MicroLabBox 1202, además, nos da una simplicidad de lectura de datos, ya que, la perforadora trabaja con un máximo de 9 bar y con este ajuste se tiene una lectura máxima de 10 bar.

En este trabajo se implementaron dos sensores de presión que se agregaron al sistema neumático, siendo más específico, a la salida de la consola de control neumática, para realizar la conexión entre el sensor, la manguera y la consola se utilizó una unión Tee de 3/4", el sensor fue adherido con dos bushing, uno de 1/4" a 1/2" y otro de 1/2" a 3/4" (ver Figura 3.11), obteniendo así un buen acoplamiento entre las tres partes.

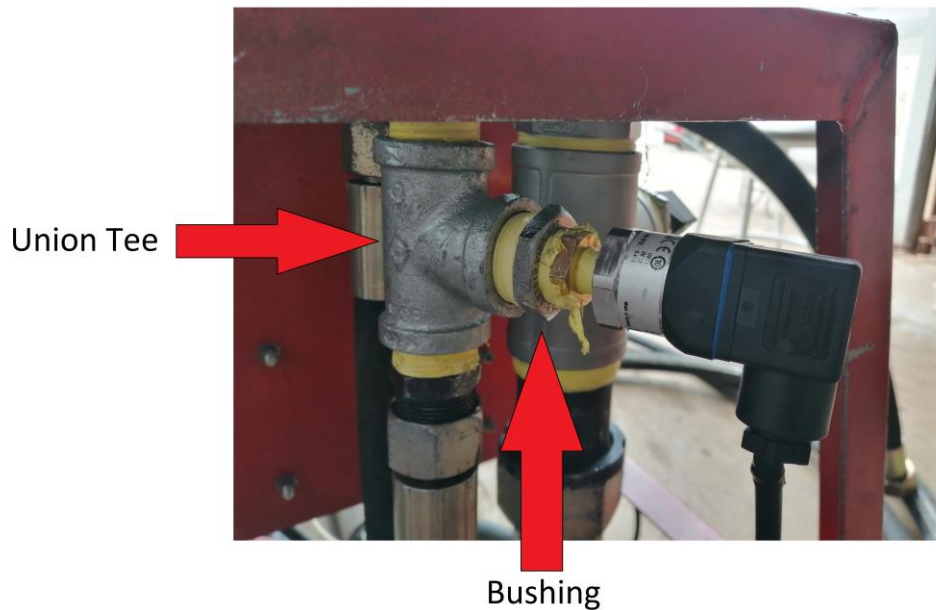


Figura 3.11 Sensores de presión en la consola de control neumática.

Estos sensores nos proporcionarían información tanto de la presión enviada hacia el martillo y la presión enviada hacia la perforadora para realizar el empuje hacia abajo.

A continuación, se realizará una prueba a los sensores de presión montados y conectados a la MicroLabBox. Del mismo modo que se utilizó el sensor de profundidad, las salidas analógicas de los sensores fueron conectadas a las entradas disponibles mediante conectores tipo BNC y paralelamente se realizó un diagrama Simulink para la obtención de las señales censadas.

El software ControlDesk 6.1 será el encargado de guardar y mostrar los datos en línea de cada sensor mientras se realizan las pruebas.

La prueba constó en abrir y cerrar las válvulas de la consola neumática, esto para variar la presión entregada tanto para realizar el empuje y para el martillo. En las figuras 3.12 y 3.13 se puede ver que las lecturas de los sensores son legibles, pero contiene ruido el cual aplicando un filtro pasa bajo se ve disminuido considerablemente.

En ambos sensores el ruido que se genera es de alta frecuencia, por lo que todos los filtros

implementados filtran igual con leves diferencias. Con el filtro de 0.5Hz se produce un retardo y perdida de información, para el filtro de 5Hz el retardo producido es mínimo y la pérdida de información es menor realizando una buena lectura, pero al utilizar un filtro con frecuencia de corte de 20Hz el retardo es casi indetectable y la perdida de información igual, teniendo un comportamiento ideal y de fácil lectura, disminuyendo los niveles de ruido, siendo la mejor opción para utilizar en los sensores de presión. El diagrama de bode se encuentra en la figura B.3 del Anexo B.

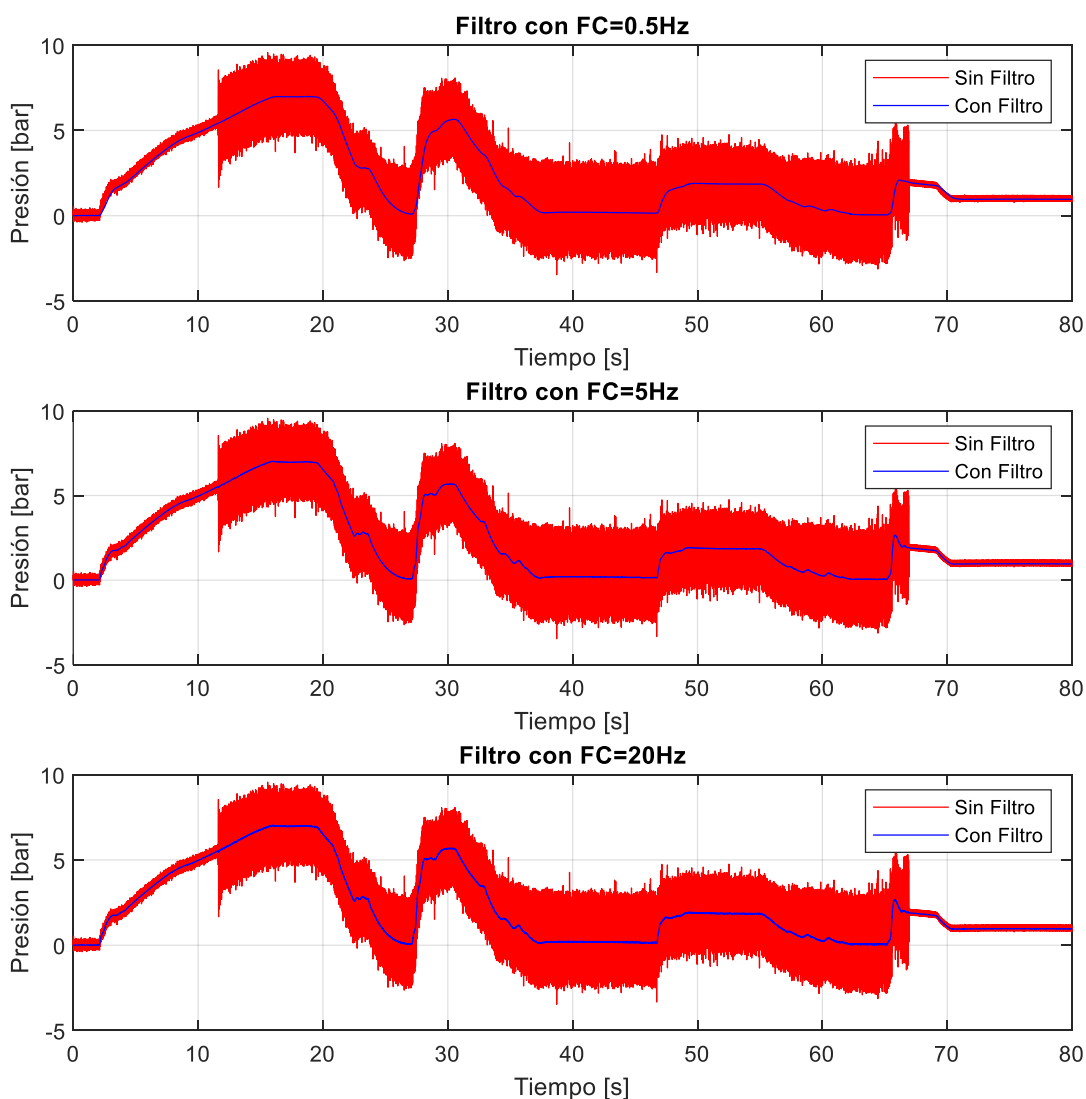


Figura 3.12 Prueba sensor de presión Empuje.

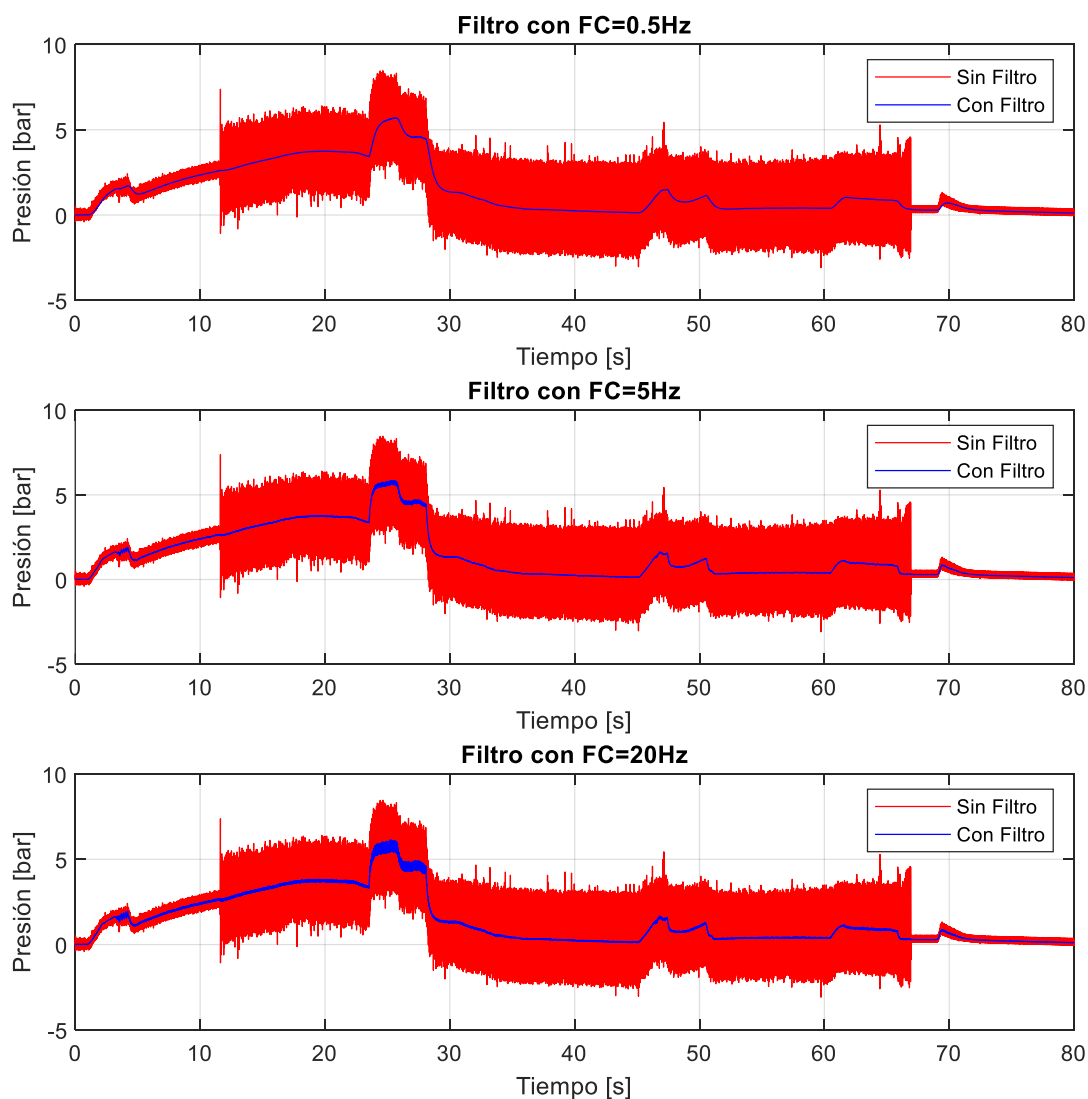


Figura 3.13 Prueba sensor de presión Martillo DTH.

Como observación, en todas las lecturas obtenidas por los sensores desde el instante 5s se produce un ruido de alta frecuencia hasta los 67s, esto es producido por el VDF y el motor, ya que, en estos instantes se estuvo trabajando con todos los equipos encendidos en la perforadora DTH, produciendo vibraciones y perturbaciones en los distintos sensores.

3.5. Variables Estimadas

El torque y la velocidad son variables relevantes y necesarios para futuras correlaciones de datos, debido a que la perforadora cuenta con un motor de inducción existe la posibilidad mediante la implementación de observadores estimar estas variables.

Para realizar los algoritmos hay que entender ciertos aspectos del modelo dinámico del motor de inducción jaula de ardilla y de la transformación de ejes trifásicos a ejes de coordenadas bifásicos y qd0 que fueron explicados en [2].

3.5.1 Observador de Flujo

Como se muestra en el esquema general (figura 3.1), para estimar el torque y velocidad, primero se debe estimar el flujo (enlaces de flujo). Para lograr una estimación de flujo del motor de inducción jaula de ardilla describiremos tres métodos, modelo de voltaje, modelo de corriente y el modelo híbrido. Estos fueron utilizados y estudiados en [2], por esta razón solo se mostrarán sus expresiones y respectivo diagrama de bloques para cada modelo.

➤ Modelo de Voltaje

En este modelo se mide tanto la corriente y voltaje de estator de la máquina, donde $\sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_r L_s}$ y los flujos se calculan a partir de las siguientes ecuaciones.

$$\lambda_{qr}^s = \frac{L_r}{L_m} (\lambda_{qs}^s - \sigma L_s i_{qs}^s) \quad (3.1)$$

$$\lambda_{dr}^s = \frac{L_r}{L_m} (\lambda_{ds}^s - \sigma L_s i_{ds}^s) \quad (3.2)$$

De esta manera los flujos de rotor en el eje estacionario qd referidos al estator dependen de los flujos en ejes qd de estator, las corrientes de estator y parámetros eléctricos del motor de inducción jaula de ardilla. En la figura 3.14 se muestra el diagrama de bloques del modelo de voltaje.

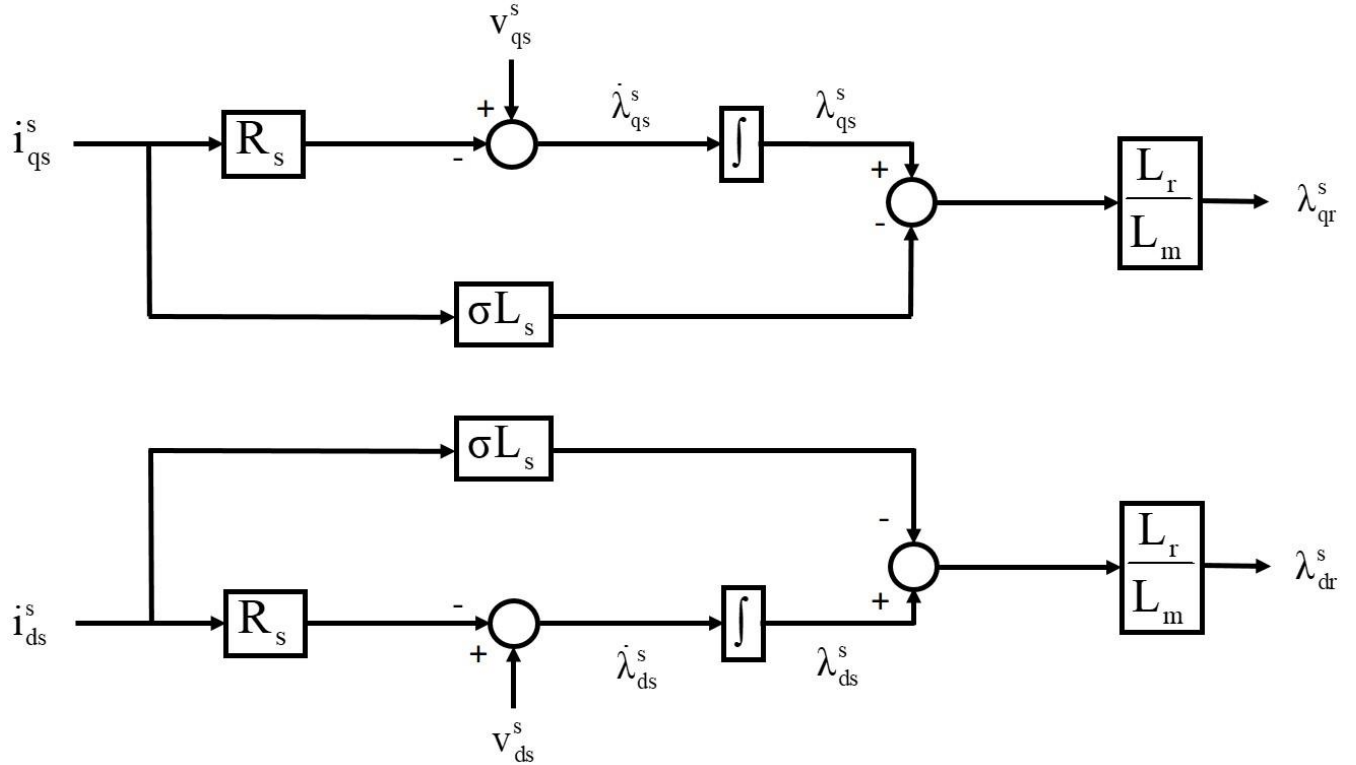


Figura 3.14 Diagrama de bloques Modelo de Voltaje.

Este modelo entrega buenas prestaciones para rangos de velocidades altas, y la variación de los parámetros eléctricos como las resistencias de estator/rotor, las inductancias de fuga estator/rotor e inductancia de magnetización tienden a reducir la precisión de las señales emitidas. La temperatura de la maquina afecta directamente a la resistencia de estator, sin embargo, a niveles altos de voltaje este efecto es despreciable.

➤ Modelo de corriente

Las señales de entrada para este modelo son las corrientes de estator y la velocidad del motor.

$$\frac{d\lambda_{qr}^s}{dt} = \frac{L_m}{T_r} i_{qs}^s + \omega_r \lambda_{dr}^s - \frac{1}{T_r} \lambda_{qr}^s \quad (3.3)$$

$$\frac{d\lambda_{dr}^s}{dt} = \frac{L_m}{T_r} i_{ds}^s - \omega_r \lambda_{qr}^s - \frac{1}{T_r} \lambda_{dr}^s \quad (3.4)$$

Donde $T_r = L_r/\Gamma_r$, representa la constante de tiempo del circuito de rotor. Las ecuaciones 3.3 y 3.4 nos entregan el flujo del rotor en función de las corrientes de estator y velocidad de rotor. En la figura 3.15 se presenta el diagrama de bloques de este modelo.

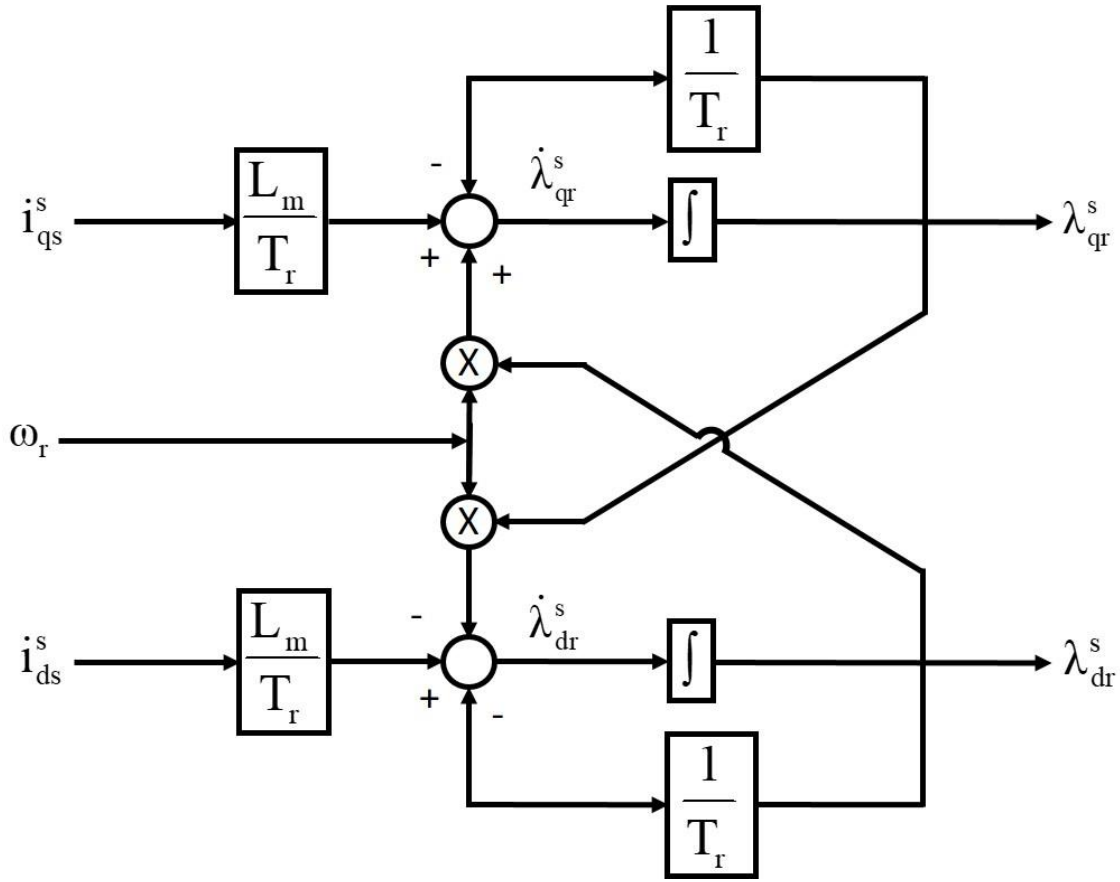


Figura 3.15 Diagrama en bloques del Modelo de Corriente.

Este modelo entrega buenas prestaciones a bajas frecuencias inclusive a velocidad cero supliendo de esta manera la desventaja del modelo de voltaje, su precisión se ve afectada por la variación de los parámetros eléctricos de la máquina, principalmente la resistencia de rotor debido a la temperatura y el efecto skin. A diferencia del modelo de voltaje, este modelo requiere conocer la velocidad de rotor.

➤ Modelo Híbrido

Este modelo se obtiene a partir de la combinación de los flujos de rotor en ejes estacionarios “qd” del modelo de voltaje y corriente. Combinando las ecuaciones 3.1, 3.2 y 3.3, 3.4, se obtienen las siguientes expresiones de flujo de rotor:

$$[(1-\sigma)T_s + T_r] \frac{d\lambda_{qr}^s}{dt} = \frac{L_m}{r_s} v_{qs}^s + \omega_r T_r \lambda_{dr}^s - \lambda_{qr}^s - \sigma L_m T_s \frac{di_{qs}^s}{dt} \quad (3.5)$$

$$[(1-\sigma)T_s + T_r] \frac{d\lambda_{dr}^s}{dt} = \frac{L_m}{r_s} v_{ds}^s + \omega_r T_r \lambda_{qr}^s - \lambda_{dr}^s - \sigma L_m T_s \frac{di_{ds}^s}{dt} \quad (3.6)$$

Donde $T_s = L_s/r_s$ y $T_r = L_r/r_r$, representan las constantes de tiempo de estator y rotor respectivamente. En la figura 3.16 se muestra el diagrama de bloque del modelo.

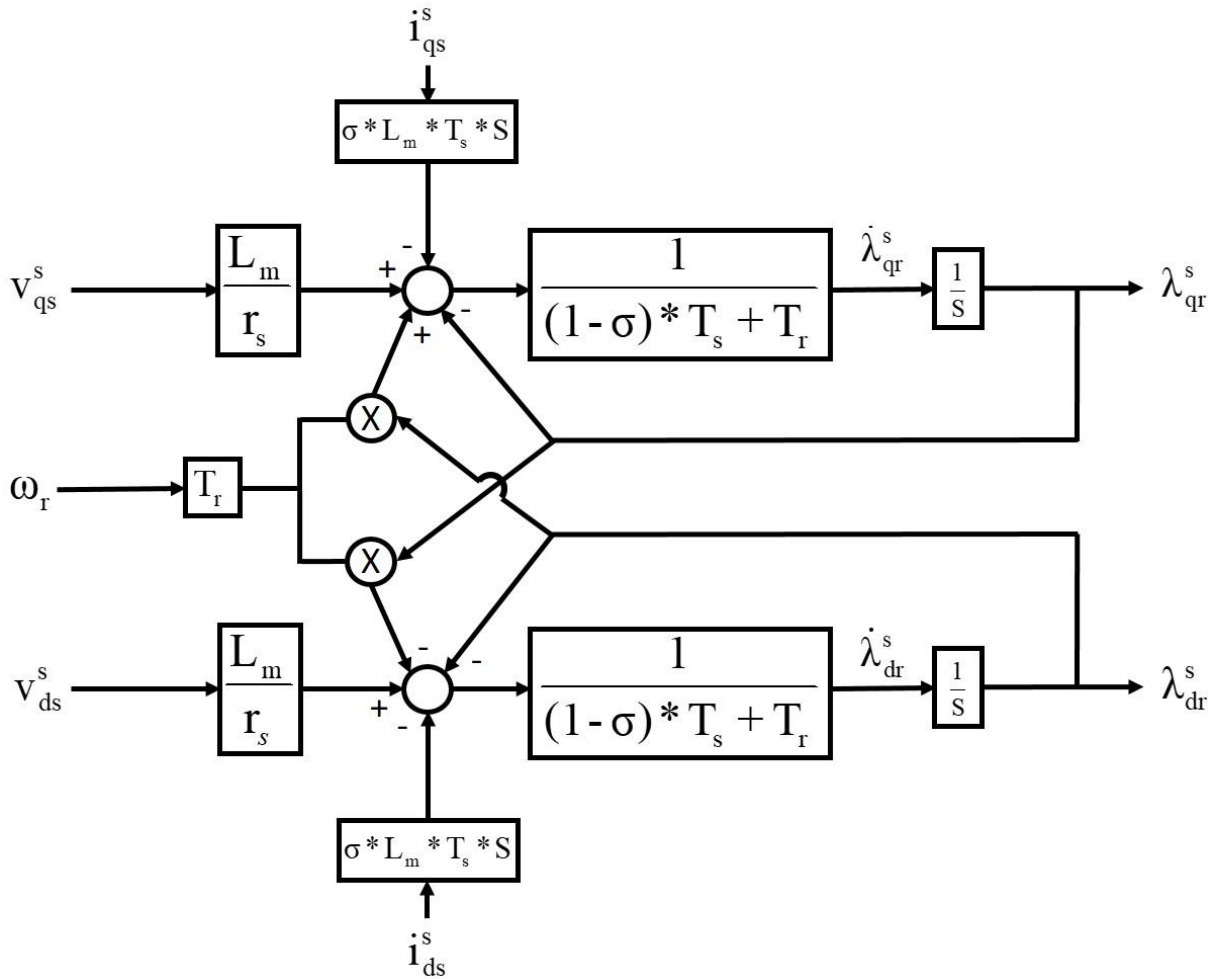


Figura 3.16 Diagrama de bloques del Modelo Híbrido.

Este modelo recoge las buenas prestaciones de ambos modelos anteriores, es decir, tiene buen desempeño en la estimación de flujo para rangos de velocidad altos y para velocidades bajas recoge el buen desempeño del modelo de corriente que utiliza la velocidad como variable de entrada.

3.5.2 Observador de Velocidad

Para la estimación de la velocidad del motor jaula de ardilla se ha experimentado a través de años nuevas técnicas para ir mejorando técnicas anteriores con la intención de encontrar un método que pueda satisfacer todo el problema relacionado a obtener la velocidad sin un sensor, presentando dos métodos. El primero es el MRAS, que fue estudiado y utilizado en [2] y el segundo llamado

BEMF-MRAS siendo una nueva propuesta para la estimación de velocidad.

➤ Model Reference Adaptive System (MRAS)

Para este modelo, la velocidad puede calcularse mediante un sistema adaptativo teniendo como referencia otros modelos, donde la salida del sistema de referencia (Modelo de Voltaje) se compara con la salida de un sistema ajustable o adaptativo (Modelo de Corriente) hasta que el error entre ambos modelos sea igual a cero. En la figura 3.17 se presenta el diagrama de bloques para la estimación de velocidad mediante la técnica MRAS.

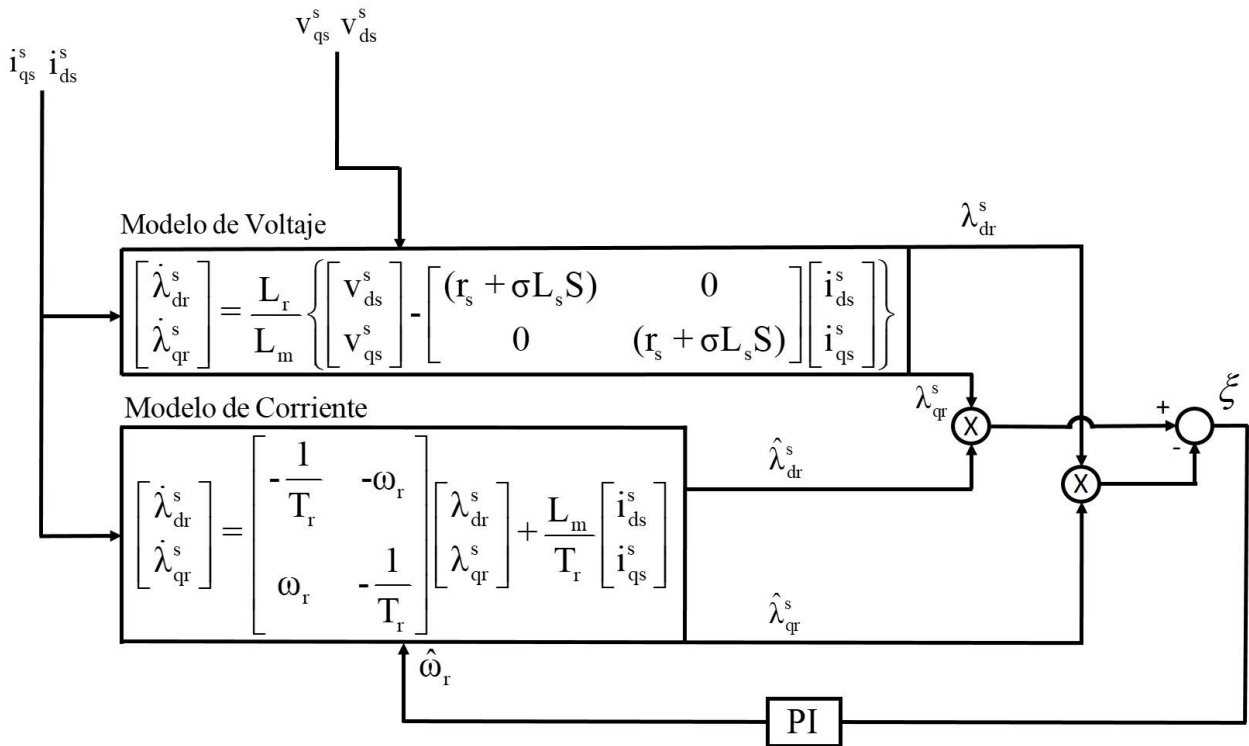


Figura 3.17 Diagrama de bloques para estimación de velocidad mediante técnica MRAS.

Considerando que el modelo de referencia como el modelo que recibe las señales de voltaje y corriente del estator de la máquina, calcula las señales de flujo con sus respectivas expresiones del modelo de voltaje. Las ecuaciones de flujo del modelo de corriente se definen como un modelo adaptativo, el cual se calcula a partir de corrientes de entrada del estator solo si la señal de velocidad ω_r es conocida. Con las señales correctas, los flujos calculados a partir del modelo de referencia y los calculados a partir del modelo adaptativo coincidirán, es decir, $\lambda_{dr}^s = \hat{\lambda}_{dr}^s$ y $\lambda_{qr}^s = \hat{\lambda}_{qr}^s$, siendo $\hat{\lambda}_{dr}^s$ y $\hat{\lambda}_{qr}^s$ las salidas del modelo adaptativo.

Se puede usar un algoritmo de adaptación con un control PI, como se indica en la figura

3.17, para ajustar la velocidad de modo que el error en estado estacionario sea cero ($\xi = 0$). Al diseñar el algoritmo es importante tener en cuenta la estabilidad del sistema y garantizar que la velocidad estimada converja al valor deseado con características dinámicas satisfactorias.

Con lo anterior, la velocidad estimada por el MRAS se puede calcular de la siguiente forma:

$$\hat{\omega}_{rk} = \xi \left(k_p + \frac{k_i}{S} \right) \quad (3.7)$$

Donde el error se define como:

$$\xi = X - Y = \hat{\lambda}_{dr}^s i_{qr}^s - \hat{\lambda}_{qr}^s i_{dr}^s \quad (3.8)$$

➤ Back e.m.f based MRAS (BEMF-MRAS)

Este modelo al igual que el anterior utiliza las ecuaciones del estator y el rotor como modelo de referencia y modelo ajustable, usando la fuerza contra-electromotriz (BEMF-MRAS). Para entender este nuevo modelo MRAS hay que recordar las ecuaciones de flujo del estator en ejes qd del modelo de voltaje (ecuación 3.9 y 3.10).

$$\lambda_{ds}^s = \int (v_{ds}^s - r_s i_{ds}^s) dt \quad (3.9)$$

$$\lambda_{qs}^s = \int (v_{qs}^s - r_s i_{qs}^s) dt \quad (3.10)$$

Ambas ecuaciones se reemplazan en 3.1 y 3.2, obteniendo un nuevo modelo de referencia mostradas en las ecuaciones 3.11 y 3.12.

$$e_{md} = \frac{L_m}{L_r} \frac{d\lambda_{ds}^s}{dt} = v_{ds}^s - \left(R_s i_{ds}^s + L_s \frac{di_{ds}^s}{dt} \right) \quad (3.11)$$

$$e_{mq} = \frac{L_m}{L_r} \frac{d\lambda_{qs}^s}{dt} = v_{qs}^s - \left(R_s i_{qs}^s + L_s \frac{di_{qs}^s}{dt} \right) \quad (3.12)$$

Para obtener el modelo ajustable se utilizan las ecuaciones 3.3 y 3.4 del modelo de corriente, obteniendo las siguientes expresiones mostradas en las ecuaciones 3.13 y 3.14.

$$\hat{e}_{md} = \frac{L_m}{L_r} \frac{d\lambda_{ds}^s}{dt} = \frac{L_m^2}{L_r} \left(-\hat{\omega}_r i_{mq} - \frac{1}{T_r} i_{md} + \frac{1}{T_r} i_{ds}^s \right) \quad (3.13)$$

$$\hat{e}_{mq} = \frac{L_m}{L_r} \frac{d\lambda_{qs}^s}{dt} = \frac{L_m^2}{L_r} \left(-\hat{\omega}_r i_{md} - \frac{1}{T_r} i_{mq} + \frac{1}{T_r} i_{qs}^s \right) \quad (3.14)$$

Donde:

$$\frac{di_{md}}{dt} = -\hat{\omega}_r i_{mq} - \frac{1}{T_r} i_{md} + \frac{1}{T_r} i_{ds}^s \quad (3.15)$$

$$\frac{di_{mq}}{dt} = \hat{\omega}_r i_{md} - \frac{1}{T_r} i_{mq} + \frac{1}{T_r} i_{qs}^s \quad (3.16)$$

El diagrama de bloques del BEMF-MRAS se ve en la figura 3.18, siendo una de las características de este modelo la eliminación de integradores tanto en el modelo de referencia y ajustable.

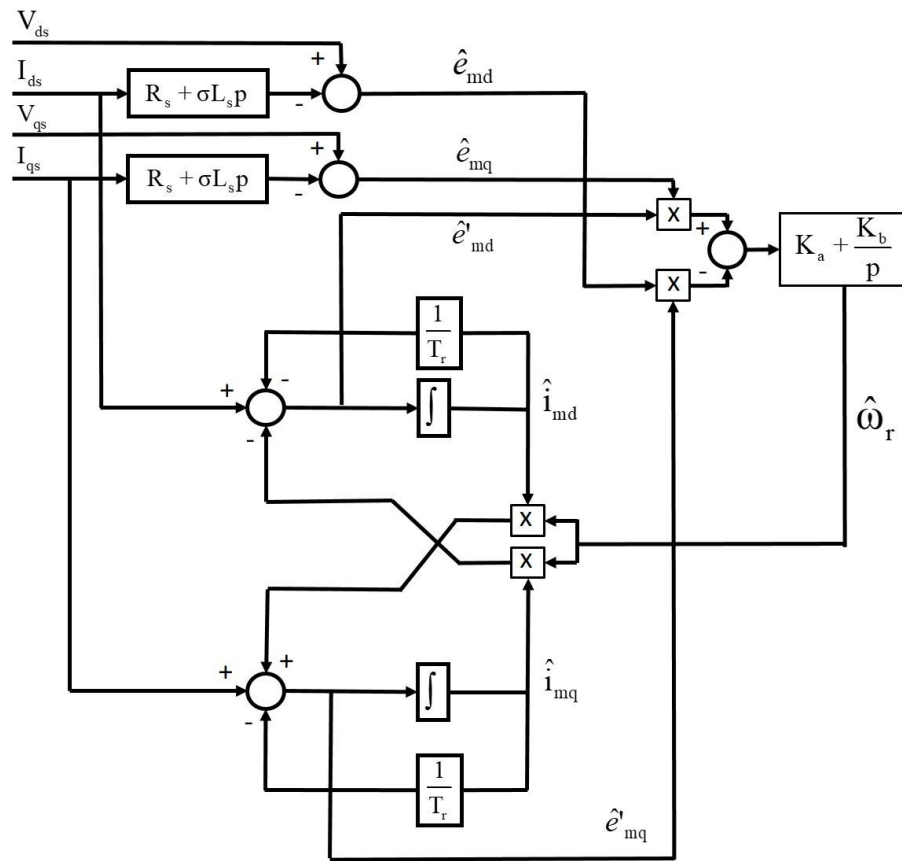


Figura 3.18 Diagrama de bloques para estimación de velocidad mediante técnica BEMF-MRAS.

La parte más importante del proceso de estimación es el diseño del mecanismo de adaptación que al final determina si el sistema es estable o no. El diseño del mecanismo de adaptación para el estimador BEMF-MRAS de velocidad del rotor está dada por la ecuación 3.17.

$$\hat{\omega}_r = \left(K_p + \frac{K_I}{p} \right) (\hat{e}_m \otimes e_m) \quad (3.17)$$

El modelo BEMF-MRAS es uno de los mejores estimadores de velocidad, ya que el esquema adopta el requisito como un estimador versátil, demostrando una buena capacidad de seguimiento y un excelente estimador ante inestabilidad a las variaciones de los parámetros, sin embargo, es más difícil de diseñar debido a su no linealidad efecto de las constantes de ganancia de adaptación [10].

➤ Estimación de Velocidad

Ambos modelos mostrados (MRAS y BEMF-MRAS) entregan la velocidad del rotor en rad/s, para obtenerlas en RPM se requiere de la relación de velocidad, ecuaciones 3.18 y 3.19.

$$\frac{1}{J} \frac{P}{2} (T_e - T_L) = \frac{d\omega_r}{dt} \quad (3.18)$$

$$T_e - T_L = J \frac{d\omega_m}{dt} \quad (3.19)$$

Reemplazando la ecuación 3.19 en 3.18 se obtiene la velocidad del motor en rad/s, para transformarla en RPM se debe multiplicar por $30/\pi$, obteniendo finalmente la siguiente expresión para la velocidad del motor.

$$N_m = \omega_r \frac{2}{P} \frac{30}{\pi} \quad (3.20)$$

3.5.3 Estimador de Torque

Con los tres modelos descritos anteriormente para la estimación de flujo del rotor en ejes “qd” (modelo de voltaje, híbrido y corriente), se puede obtener el torque, es por eso que se reemplazan las ecuaciones obtenidas en 3.1 y 3.2 en la ecuación del torque eléctrico obteniendo las siguientes expresiones:

$$T_e = \frac{3}{2} \frac{P}{2} \frac{L_m}{L_r} (\lambda_{dr}^s i_{qs}^s - \lambda_{qr}^s i_{ds}^s) \quad (3.21)$$

$$T_e = \frac{3}{2} \frac{P}{2} (\lambda_{ds}^s i_{qs}^s - \lambda_{qs}^s i_{ds}^s) \quad (3.22)$$

Donde P se define como el número de polos del motor eléctrico, opcionalmente se puede

ocupar la ecuación 3.22. Con ambas ecuaciones (3.21 y 3.22) es posible obtener una estimación de torque tal como se muestra en el diagrama de bloques de la figura 3.19.

Los modelos de corriente e híbrido requieren de un sensor de velocidad para la estimación del flujo, al no poseer uno se optó por incluir un modelo de velocidad que mejor resultados nos entregue.

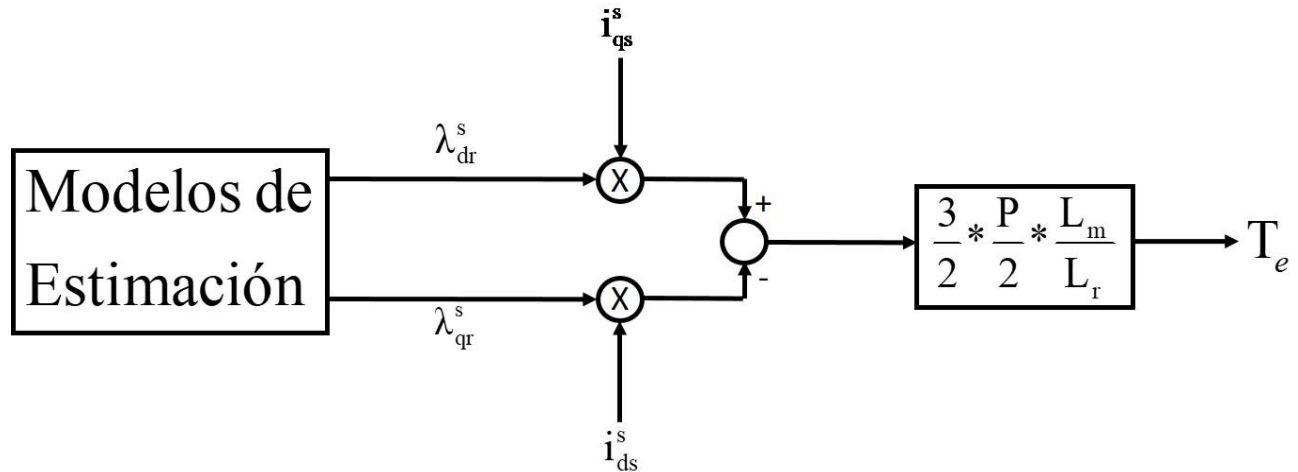


Figura 3.19 Diagrama de bloques para la estimación del Torque Eléctrico.

3.5.4 Implementación de los Observadores

Los modelos necesitan como entrada los voltajes y corrientes de estator, para obtenerlos se miden estas señales utilizando sondas de voltaje y corriente que se muestran en la figura 3.20. En la tabla 3.5 se muestran los rangos permisibles para mediciones en cc y ca de la sonda de voltaje.

Tabla 3.5 Rangos de tensión cc y ca.

Atenuación	Valor máximo CC	Valor máximo CA
x200	±700V	±500V _{rms}
x50	±175V	±125 V _{rms}
x20	±70V	±50 V _{rms}



(a)



(b)

Figura 3.20 Sondas de voltaje y corriente para modelos de estimación de torque y velocidad.

(a) Sonda de voltaje Pintek DP-25. (b) Sonda de corriente Fluke i30s.

Además, los parámetros eléctricos del motor de inducción jaula de ardilla que está montado en la perforadora DTH son requeridos para el uso de los observadores, estos fueron obtenidos de [3] y se encuentran tabulados en la tabla 3.6.

Tabla 3.6 Parámetros del motor de inducción de la perforadora DTH.

Parámetros	Magnitud
Potencia	4kW
Velocidad	1440rpm
Voltaje	380V
Frecuencia	50Hz
Resistencia de estator	1.3809 Ω
Resistencia de rotor	0.6843 Ω
Inductancia de estator	0.1675H
Inductancia de rotor	0.1675H
Inductancia de magnetización	158.36827mH
Inercia total	0.0241kg-m ²

Las sondas se deben conectar a las entradas analógicas del procesador Dspace MicroLabBox 1202 convirtiéndolas a señales digitales. De esta manera se obtienen los vectores de voltaje y corrientes de estator que necesitan los observadores.

Antes de realizar alguna estimación de torque o velocidad se debe realizar un proceso de acondicionamiento de señales tal como se describe en la figura 3.21. El proceso considera las atenuaciones de la sonda de voltaje, sonda de corriente y la entrada de la Dspace. Además, se tiene

una etapa de filtrado de las señales de voltaje y corriente.

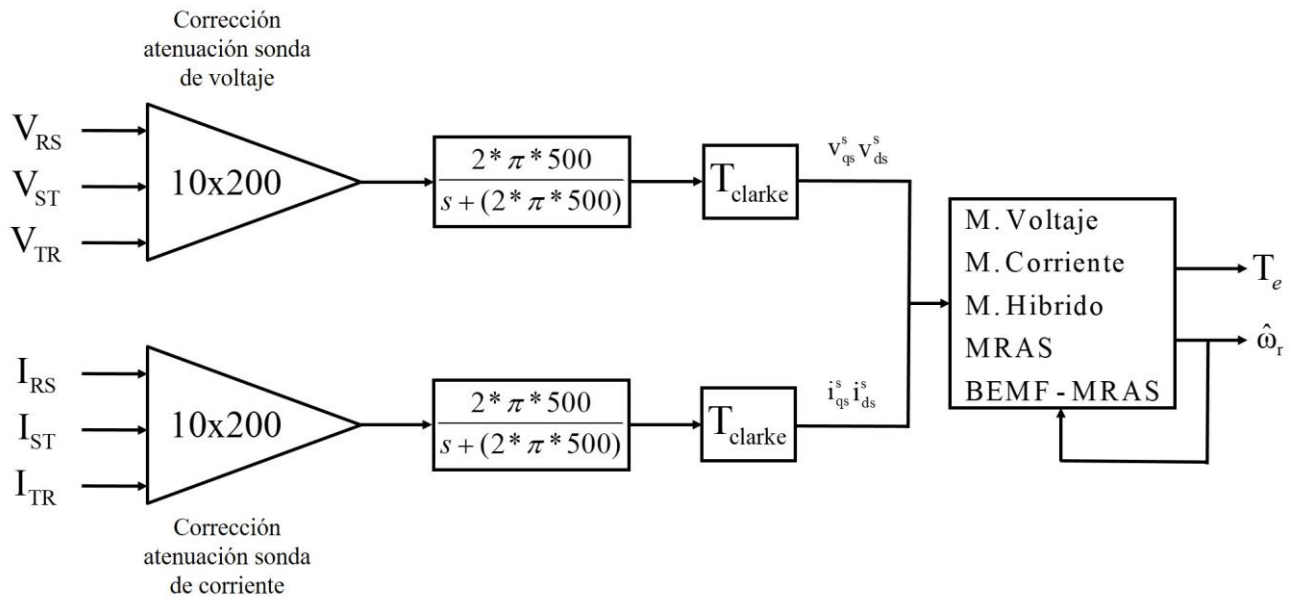


Figura 3.21 Esquema de acondicionamiento de señales voltaje y corriente de estator.

De la figura 3.21 vemos que el factor de atenuación de los canales de entrada es de 10 veces, la sonda de voltaje dentro del rango de $\pm 500V_{rms}$ con la opción de escoger atenuaciones de 50, 100 y 200 veces, el factor de conversión de la sonda de corriente es de 100mV/A. Por otra parte, la tensión proveniente del VDF contiene componentes de alta frecuencia (del orden de los kHz) debido a la modulación por ancho de pulso (PWM), es por ello que se implementó un filtro pasa bajo de primer orden cuya frecuencia de corte es de 500Hz. El filtro no introduce de forma considerable desfases ni variaciones en la ganancia de la señal a su frecuencia fundamental de 50 Hz de igual manera se filtran las señales de corriente, su diagrama de bode se encuentra en Anexo B, figura B.4.

3.5.5 Prueba de Observadores

En la figura 3.22, se muestra un esquema general de la adquisición de datos de las sondas de voltaje y corriente, el cual, se utiliza el software ControlDesk 6.1 para ver en línea las señales de torque y velocidad u opcionalmente, se puede realizar la adquisición de los datos de las señales de voltaje y corriente con el mismo software y luego procesar estos de manera offline para obtener las estimaciones de torque y velocidad.

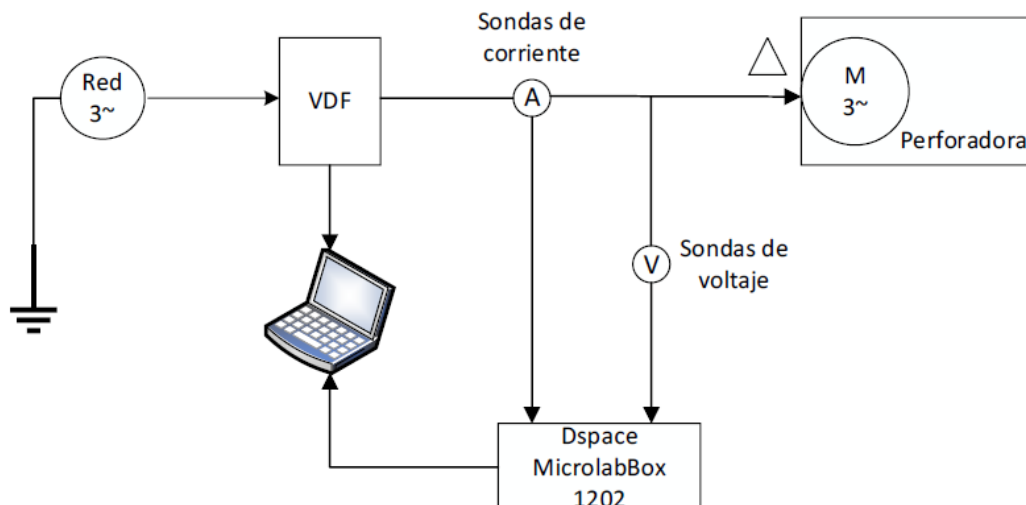


Figura 3.22 Esquema general adquisición de datos con las sondas de voltaje y corriente.

Se realizaron pruebas experimentales de los diferentes estimadores en [3] para la estimación de torque con los modelos de Torque Voltaje, Corriente, Híbrido y para la velocidad con el modelo MRAS, en cuanto al BEMF-MRAS, se realizó un estudio de su funcionamiento y pruebas experimentales en [10], es por eso que las pruebas que se realizarán en este apartado se centran en su funcionalidad al realizar una perforación en una roca con nuestro sistema DTH, comparándolas con los datos obtenidos del VDF.

Los modelos implementados mediante Simulink para la estimación de torque y velocidad se encuentran en Anexo C, para la realización de la transformada se utilizó un bloque disponible en el software llamado “abc to dq0”.

Como ya se mencionó antes, mientras se realiza la perforación se estará monitoreando tanto voltaje y corriente por sondas.

➤ Evaluación observador de velocidad

Primeramente, compararemos los resultados obtenidos del observador de velocidad. En la figura 3.23 nos muestra dos gráficos, el primero mostrando el estimador de velocidad MRAS y el otro el BEMF-MRAS, en ambos, la gráfica de color rojo representa la señal resultante que a simple vista se observa una gran cantidad de ruido. Difícilmente se puede realizar una lectura de estos, es por ello que se implementó un filtro pasa bajos en ambos observadores con una frecuencia de corte de 5Hz (diagrama de bode disponible en figura B.1 del Anexo B), disminuyendo el ruido drásticamente y obteniendo una señal más limpia, con bajo nivel de ruido en comparación a la

original, siendo legible por el lector.

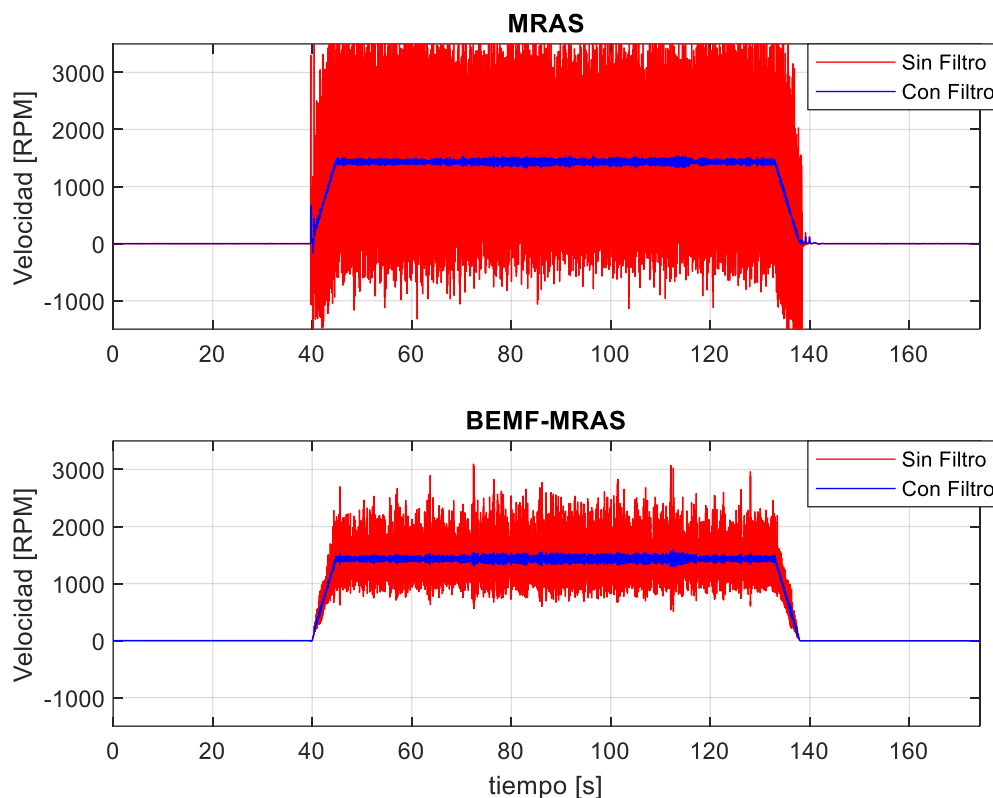


Figura 3.23 Estimadores de Velocidad con y sin filtro pasa bajo.

Una vez escogido el filtro a utilizar, realizaremos una comparación con los datos que nos entrega el VDF por medio del software DSELite.

En la figura 3.24 se tienen los dos estimadores de velocidad (MRAS en color rojo, BEMF-MRAS en color verde) y lo que nos proporciona el VDF (en color azul). En aprox. 40s inicia la rampa de velocidad del sistema y luego en aprox. 140s se detiene. Se observa que el comportamiento de ambos observadores es idéntico al que proporciona el software. En estado estacionario el valor promedio de los observadores es cercano al que nos entrega el VDF (ver Tabla 3.7), con una diferencia de 8rpm aproximadamente, y entre los observadores una diferencia bastante pequeña de tan solo 0.3rpm.

Tabla 3.7 Promedios de velocidad en estado estacionario.

Modelo	Velocidad [RPM]
MRAS	1432.2
BEMF-MRAS	1432.5
VDF	1440.5

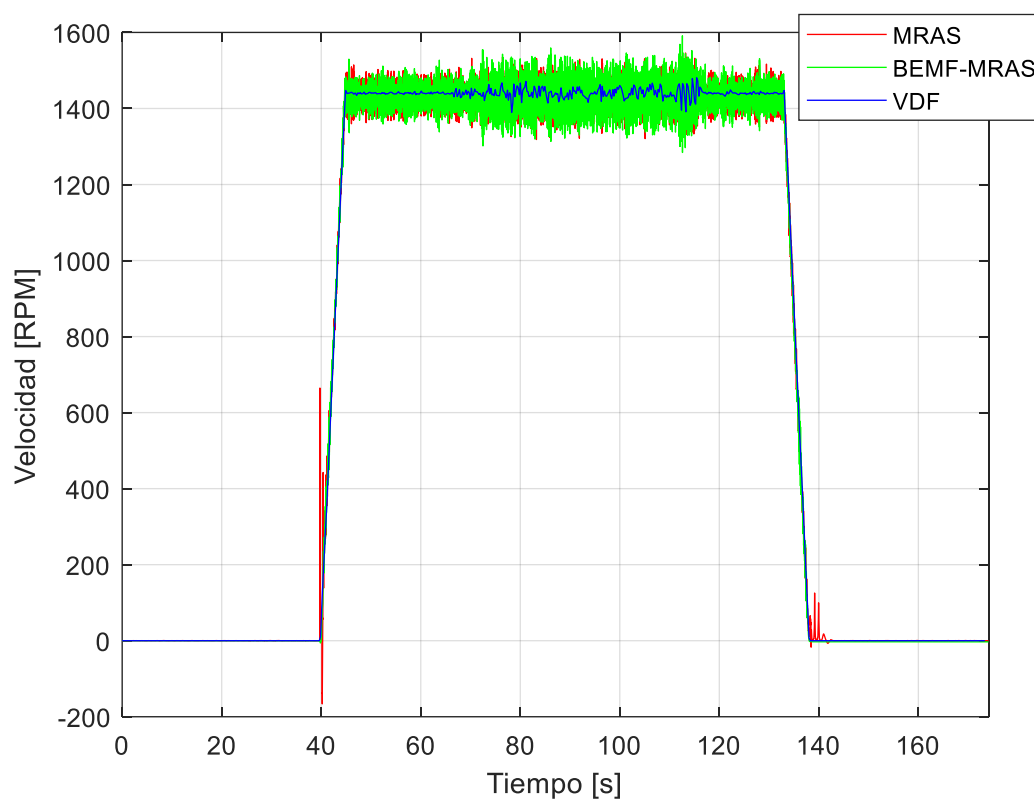


Figura 3.24 Comparación de Velocidades.

En cuanto a los observadores, el MRAS presenta unos peak en los primeros segundos en que se inicia la rampa de aceleración del sistema, este comportamiento se replica en los últimos instantes al detener el VDF (ver figura 3.25), dando a entender que tiende a ser inestable en los primeros y últimos instantes del accionamiento, mientras que el BEMF-MRAS presta una buena estimación con leves variaciones en el inicio, para luego estabilizarse y tener un comportamiento muy superior al MRAS.

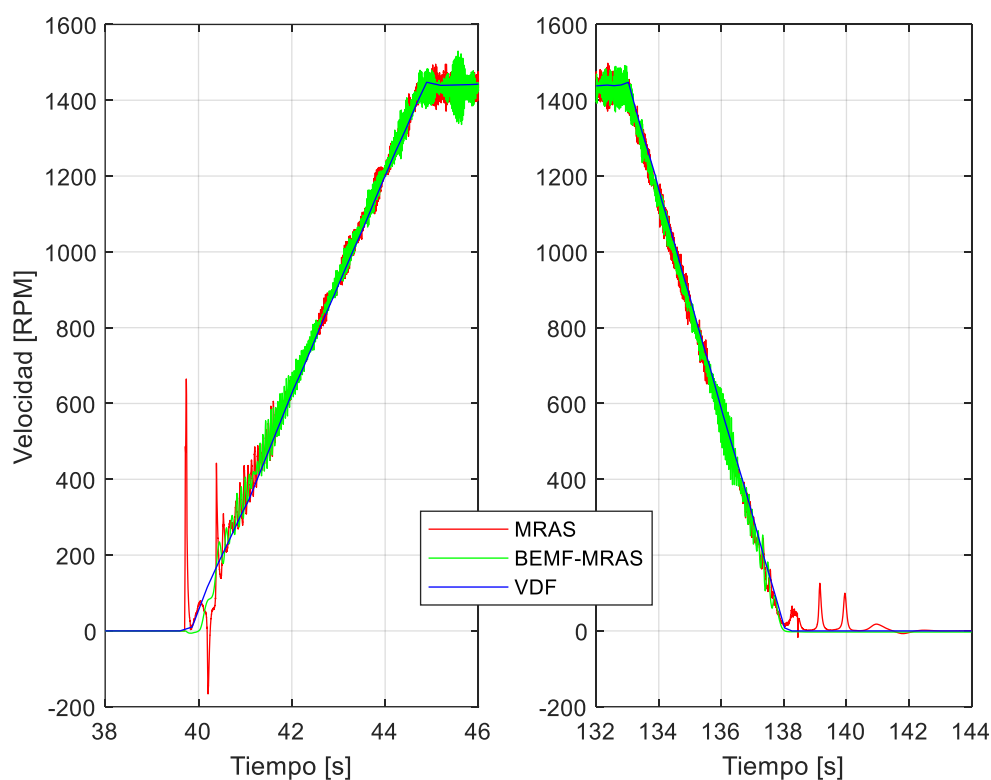


Figura 3.25 Encendido y apagado VDF.

➤ Evaluación estimador de torque

A continuación, se probarán los estimadores de torque a partir de 3 observadores de flujo (Modelos de voltaje, corriente e híbrido). Los modelos de corriente e híbrido requieren de un sensor de velocidad, al no tenerlo se optó por la inclusión de un modelo de velocidad que preste los mejores resultados siendo el modelo BEMF-MRAS.

Los gráficos de color rojo presentados en la figura 3.26 representan los datos sin filtro y se ve una gran cantidad de ruido, al incorporar un filtro pasa bajo con frecuencia de corte de 5Hz, el ruido disminuye (gráficos de color azul), siendo más legible para en análisis de estos.

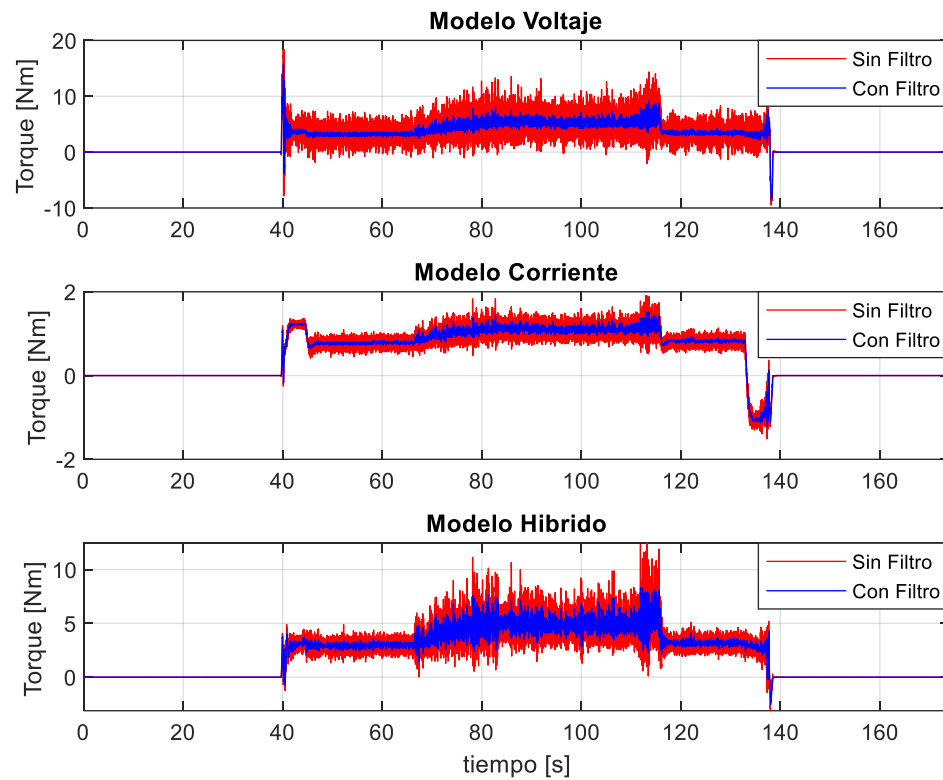


Figura 3.26 Estimadores de Torque con y sin filtro pasa bajo

Con el filtro escogido para los estimadores de torque se realizará una comparación, pero antes hay que destacar que ocurre una variación en el tramo de 65s y 116s que es donde el martillo penetra a la roca y comienza a perforar hasta finalizar, esto será analizado en el capítulo 4, pero nos da indicios de que los observadores funcionan correctamente en el sistema. Por esta razón nos centraremos en un tramo que se encuentra el motor estabilizado y actuando en vacío, esto ocurre en el tramo entre 47s y 66s (ver figura 3.27).

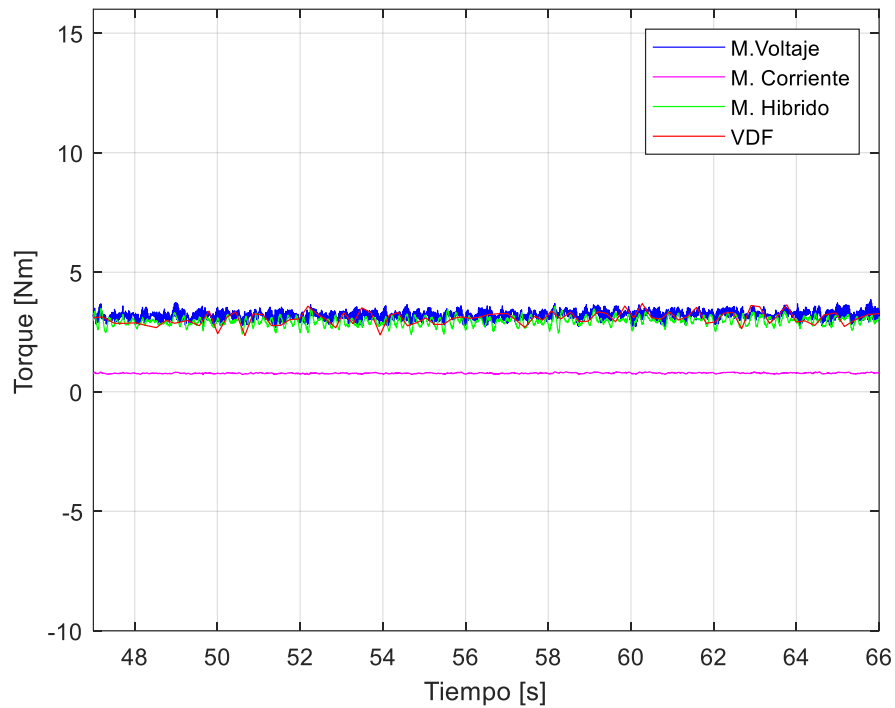


Figura 3.27 Torque estabilizado antes de penetración.

En la figura 3.27 tenemos de color azul el modelo de voltaje, en magenta el modelo de corriente, en verde el modelo híbrido y en rojo los datos del VDF (estos colores se replican en la figura 3.28). En el periodo estacionario nos dan valores promedios que se encuentran tabulados en la tabla 3.8, de esta tabla tenemos que el modelo de voltaje se encuentra 0.1327Nm sobre el valor del VDF, valor bastante aceptable por la diferencia mínima entre ellas. El modelo de corriente se encuentra con un valor muy inferior al VDF con una gran diferencia entre ellas de 2.2972Nm. Para el modelo híbrido se tiene una diferencia de 0.1222Nm, por lo que es muy aceptable al igual que el modelo de voltaje.

Tabla 3.8 Promedios de torque en estado estacionario.

Modelo	Torque [Nm]
M. Voltaje	3.2069
M. Corriente	0.777
M. Híbrido	2.952
VDF	3.0742

Comparando visualmente lo que nos entrega la figura 3.28 es el comportamiento del modelo de corriente es bastante bajo y eso se corrobora con los valores promedios mencionados la tabla 3.8, dando a entender que este modelo no es el indicado para la realización de este trabajo, ya que esta

por muy debajo de los esperados, mientras que los modelos híbrido y de voltaje nos proporciona valores aceptables, dentro del rango en que está operando el VDF. La diferencia entre estos dos observadores es que el modelo de voltaje entrega valores con un offset positivo mientras que el híbrido con un offset negativo con respecto al VDF.

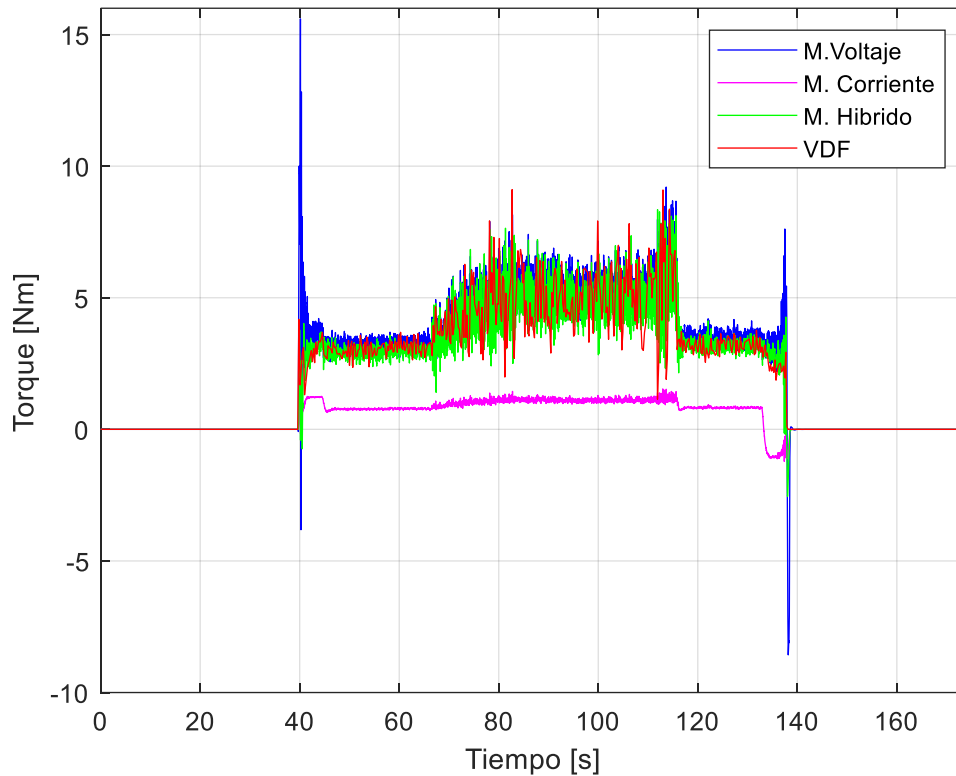


Figura 3.28 Comparación de Torques.

Otra característica que se puede apreciar son los valores peak de torque que alcanza al encender y apagar el VDF (ver figura 3.29), al inicio se ve que el modelo de voltaje alcanza valores cercanos a los 15.5Nm, mientras que el VDF y el modelo híbrido nos proporciona un comportamiento amortiguado, con un peak en ambos cercano a los 4Nm. Caso similar tenemos al detener el VDF, reafirmando que el modelo híbrido es la mejor opción para la estimación de torque.

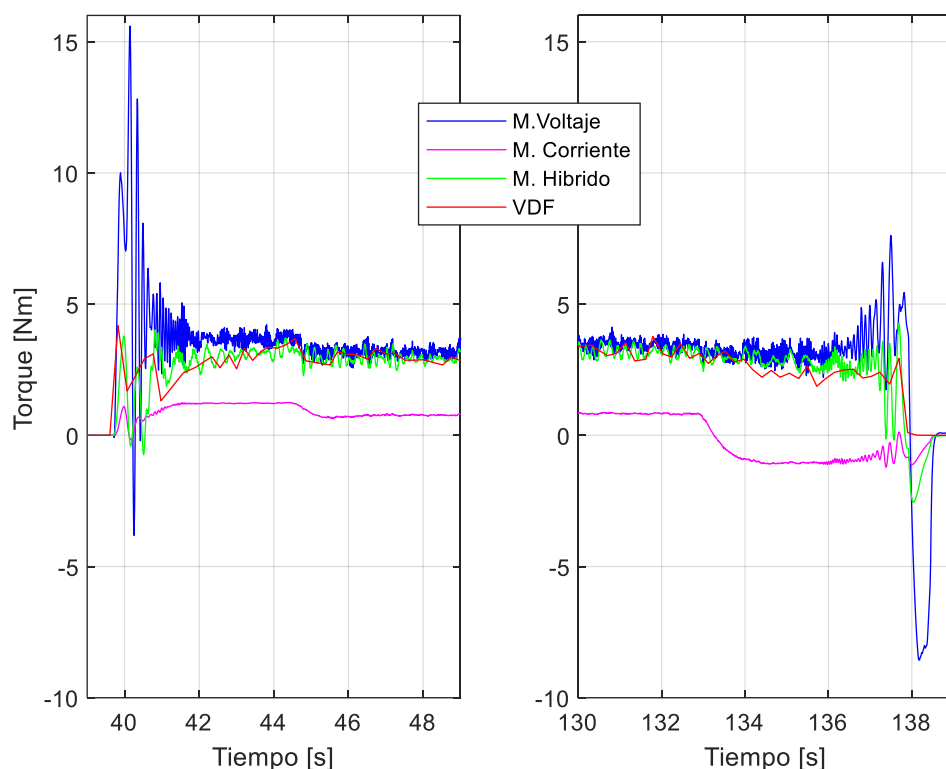


Figura 3.29 Peak de encendido (gráfico izquierdo) y apagado (gráfico derecho) VDF.

3.6. Discusión

En este capítulo se presentó el set de sensores que se utilizará dentro del sistema MWD. Estos fueron modificados para que sea compatible para el sistema de adquisición de datos.

A partir de estos equipos se obtendrán datos como la profundidad de perforación y la tasa de penetración por medio del sensor de profundidad. Paralelamente, por medio del sensor de presión, obtener los datos de la presión que alimenta al martillo y la que realiza el empuje hacia abajo de la perforadora.

Una vez modificados, el set de sensores fue montado en la perforadora de tal forma que no interfiera en su trabajo y brindarnos una mejor lectura de datos, es por eso que se realizaron ajustes en la perforadora (sensor de profundidad) y en la consola neumática (sensores de presión).

Posteriormente se comprobó el funcionamiento de todo este set de sensores, prestando un buen funcionamiento, entregándonos una respuesta rápida y correcta a variaciones tanto de presión y profundidad.

Además, dentro del sistema MWD se puso en práctica los observadores, realizando un repaso

teórico para entender sobre ellos y se implementó un nuevo modelo de estimación de velocidad llamado BEMF-MRAS. Los modelos ya fueron validados en estudios anteriores, por lo que se realizó una corroboración de su funcionamiento aplicándolos en nuestro sistema, con el fin de escoger las mejores opciones de estimadores.

De los observadores implementados para la estimación de velocidad el que presenta un mejor rendimiento fue el modelo BEMF-MRAS, presentando un seguimiento de la señal oscilatorio menor y un offset poco perceptible, pero con una rápida estabilidad, mientras que el MRAS es todo lo contrario, presenta un seguimiento de señal oscilatorio mayor y una lenta estabilidad (ver figura 3.25).

Para los observadores de Torque el que mejor rendimiento tiene es el modelo híbrido presentando un buen seguimiento de señal y amortiguamiento, por otro lado, el modelo de voltaje igual presenta un buen seguimiento de señal, pero se generan un peak de 4 veces más que el modelo híbrido al iniciar el accionamiento y al finalizar, obteniendo un bajo amortiguamiento de señal. El modelo de corriente presenta un seguimiento de señal con un gran offset negativo, siendo el de peor rendimiento tiene, a pesar de tener buena estabilidad (ver figura 3.28).

Además, en la tabla 3.9 se tabulan los valores en porcentaje con respecto a lo que proporciona el VDF (valores obtenidos a partir de las tablas 3.7 y 3.8), en donde se corrobora que el modelo de corriente es el peor estimador de torque estando bajo un 74.72% en comparación a los otros dos modelos (voltaje e híbrido) que, si bien no son valores cercanos al VDF, se mantienen en un margen tolerable y bajo.

Tabla 3.9 diferencia de los modelos de torque con respecto al VDF.

Modelo	Diferencia (%)
M. Voltaje	+4.32
M. Corriente	-74.73
M. Híbrido	-3.97

Por otro lado, en la tabla 3.10 se muestran los modelos MRAS y BEMF-MRAS. Estos se encuentran bajo los valores entregados por el VDF, sin embargo, la diferencia es bastante baja y no llegan a superar el 1%, siendo valores bastante aceptables.

Tabla 3.10 Diferencia de los modelos de velocidad con respecto al VDF.

Modelo	Diferencia (%)
MRAS	-0.57
BEMF-MRAS	-0.55

Capítulo 4. Evaluaciones Experimentales

4.1. Introducción

En el presente capítulo se realiza una puesta en marcha de todo el sistema de perforación DTH (capítulo 2) y el sistema MWD (capítulo 3) y realizar sus respectivas pruebas preliminares en un ambiente controlado y seguro.

Se reportará un resumen de los trabajos de preparación realizados, tanto como protecciones, construcción y obtención de muestras, estudios en las muestras y cálculos previos necesarios para el análisis de los resultados obtenidos.

De las pruebas se espera un correcto funcionamiento de ambos sistemas, trabajando en conjunto para la adquisición y procesamiento de datos y realizar un análisis. Los registros continuos de las perforaciones se realizarán a diferentes muestras (rocas, hormigones). En ellas se obtendrán los primeros resultados del sistema MWD, donde se espera encontrar datos de interés para realizar un estudio de correlación de rocas.

4.2. Preparación del montaje experimental

Para trabajar en un ambiente controlado se realizó una serie de trabajos antes de la puesta en marcha, el cual nos entregará la seguridad de los equipos y del personal que estará trabajando en estas pruebas. Para las pruebas de perforación se obtuvieron muestras de rocas de canteras y se confeccionaron bloques de hormigón de distinta dureza. A continuación, se describe cada tarea realizada.

➤ Confección de protectores.

Como se explicó en los capítulos anteriores, el martillo al realizar una perforación hace una limpieza, expulsando detritos de manera aleatoria, siendo un peligro constante para el personal y los equipos durante las pruebas experimentales.

Para dar solución al problema se construyeron paneles protectores, elaborados con planchas estructurales de terciado con dimensiones 2,2m x 1,22m y un grosor de 15mm, a esta plancha se le hizo un agujero de medidas 1,02m x 0,78m, en donde se instaló un acrílico transparente con grosor de 4mm para usarse como ventana. En la figura 4.1 se aprecia el resultado final, obteniendo una visión clara de la perforación que se está realizando, un claro manejo de la perforadora y evitar los

elementos que se expulsan.



Figura 4.1 Protectores de acrílicos.

Además, se instaló un toldo para disminuir la radiación del sol y proteger los equipos de algún proyectil que pueda caer en ellos desde arriba y producir algún daño en sus funcionamientos. En la figura 4.2 se observa el área de trabajo en donde se realizarán las pruebas experimentales.



Figura 4.2 Área de trabajo seguro.

➤ Muestras de Rocas

Para las muestras a perforar, se tiene dos tipos de rocas que se extraen en dos canteras diferentes, Cantera Lonco (ubicada en Concepción, Chile) y Cantera Punta de Parra (ubicada en Tome, Chile), además, se fabricaron muestras con hormigón.



Figura 4.3 Rocas de canteras.

(a) Roca de Cantera Lonco. **(b)** Roca de Cantera Punta de Parra.

A estas rocas se le realizó un estudio para obtener sus Resistencia a la Compresión (UCS, Unconfined Compressive Strength).

La UCS es la resistencia a la compresión y corresponde al valor del esfuerzo compresivo máximo que un material puede resistir antes de su rotura. Los resultados se encuentran en la tabla 4.1.

Tabla 4.1 UCS muestras de rocas.

Muestra	USC (MPa)
Roca P.P.	92.64±42.89
Roca Lonco	161.51±11.54

En la figura D.1 del Anexo D se encuentra la clasificación de la roca en base a la resistencia a la compresión según la ISRM (International Society for Rock Mechanics) [20], basándonos en esto se puede clasificar la Roca P.P. como una roca “dura”, para la Roca Lonco se clasifica como una roca “muy dura”.

➤ Muestras de Hormigón

Las muestras con hormigón se confeccionaron a partir de cajones de planchas de osb estructural, con dimensiones de 30cm de ancho, 30cm de largo y 50cm de alto, con diferentes proporciones de hormigón, agua, cemento, gravilla y rocas, generando diferentes resistencias. Las

diferentes muestras se encuentran resumida en la tabla 4.2, en donde se encuentra la cantidad de material usado en cada muestra.

A las mezclas se les agregó un líquido que actúa como acelerador del fraguado y endurecimiento del hormigón, disminuyendo el tiempo de su curado. En la figura 4.4 se muestra parte del proceso y el resultado final de estas muestras.

Tabla 4.2 Muestras de hormigón sólidas.

Muestras	Agua (L)	Hormigón (Kg)	Cemento (Kg)	Gravilla (Kg)	Acelerante (L)	UCS (MPa)	Grado
1	9	75	0	0	0.72	35.92	H35
2	9.75	75	0	0	0.72	30.57±2.46	H30
3	10.5	75	0	0	0.72	14.54±3.65	H10
4	10.25	62.5	0	50	0.5	23.69±2.25	H20
5	12	75	8.7	0	1.08	34.33±1.16	H30
6	12	75	8.7	37.5	1.08	25.42±1.43	H25

Estas muestras se dejaron fraguar y se hidrataron regularmente cerca 3 semanas para su curado. La principal diferencia entre ellas está en la cantidad del material utilizado, es decir, si hay un equilibrio en la relación agua/cemento, se obtiene un hormigón resistente, mientras que al aumentar la cantidad de agua el hormigón tiende a disminuir su resistencia.



Figura 4.4 Proceso de construcción de bloques de hormigón.

(a) Proceso de construcción. **(b)** Resultado final.

A las muestras de hormigón se le realizó el mismo estudio que las muestras de roca para obtener su UCS, estos resultados se encuentran resumido en la tabla 4.2, además, en la misma tabla se encuentra la clasificación a partir de sus UCS. En la figura D.2 del Anexo D se indica la clasificación con respecto a su resistencia a compresión de acuerdo a las normas NCh1017 y

NCh1037 [21], al transcurso de 28 días.

El caso del hormigón gravilla (muestra 6) es especial, ya que, su fabricación está hecha de cemento y gravilla, siendo esta última piedra molida que están unidas al cemento y al realizar las pruebas para el cálculo de la UCS se obtienen valores del cemento (es el material que cede primero).

➤ **Peso y Fuerza de empuje perforadora**

Otro parámetro importante de la fuerza de empuje ejercida sobre las muestras durante la perforación. Para calcular esta fuerza se requiere conocer el peso de la estructura considerando motor, reductor y martillo. En la figura 4.5 se ve el montaje realizado para esta operación.

Obteniendo como resultado de todo el conjunto un total de 165.7 Kg (ver figura 4.6), que equivale a 1623.86 N de acuerdo a la segunda ley de Newton (ecuación 4.1).

$$F = m * g \quad (4.1)$$

Donde,

F: Fuerza (N)

m: masa del cuerpo (Kg)

g: aceleración de gravedad, 9,8 (m/s²)



Figura 4.5 Montaje para pesar la perforadora.



Figura 4.6 Medición peso de la perforadora para cálculo de fuerza de empuje.

4.3. Montaje Experimental

El Set-up es la parte fundamental de todo y se montará sobre una mesa de trabajo, en ella se encuentran los equipos necesarios, tales como, la Dspace MicroLabBox 1202, encargada de la adquisición de datos, las sondas de voltaje y corriente, que monitorean las variables mencionadas respectivamente. Además, de una fuente de poder DC, encargada de alimentar los sensores montados en todo el sistema (distancia y presión), y los computadores encargados de recibir toda la información con su respectivo software (tanto del VDF y la Dspace).

Una vez realizado todos los trabajos previos, se procede al montaje de los equipos, tal como se observa en la figura 4.7. La imagen a muestra los componentes dentro de la mesa de trabajo, en ella se encuentra el VDF (1), sondas de voltaje y corriente (2), consola de control neumática (3), MicroLabBox (4), fuente de alimentación dc (5), PC para utilización de Controldesk (6) y PC para utilización de DSELite (7). En la imagen b se presenta el área de trabajo seguro para realizar pruebas y en la imagen c se muestra el compresor utilizado.

Además, en la imagen se encuentra el VDF y la consola neumática. Ambos se encuentran resguardados detrás de los paneles protectores, con el fin de que no ocurran fallas al estar perforando y mantener los equipos bien resguardados.



(a)



(b)



(c)

Figura 4.7 Montaje área de trabajo.

(a) Mesa de trabajo. **(b)** Área segura para perforación. **(c)** Compresor.

4.4. Pruebas preliminares

Una vez montado el equipo y con un área protegida, se procede a realizar las pruebas preliminares. Como se mencionaron en capítulos anteriores los sistemas trabajaran en conjunto, recopilando los datos mientras se realiza la perforación.

La metodología a utilizar para las pruebas consiste en monitorear los datos desde que el bit penetra en la muestra, con una perforación constante ininterrumpida hasta lograr atravesar la muestra por completo. Las variables de interés son el tiempo de perforación, profundidad de perforación, tasa de penetración, presión del martillo, presión de empuje, torque del motor y la velocidad del motor.

Se realizarán 4 pruebas que incluye rocas de canteras de la región y hormigones preparados con distintas concentraciones (tabla 4.3), con el fin de aplicar el sistema MWD para que funcione sin problemas. Cabe destacar que los resultados de voltaje y corriente obtenidos en las pruebas se encuentran disponibles en Anexo E.1.

Tabla 4.3 Descripción de las muestras para pruebas preliminares.

Prueba	Tipo de muestra	Descripción
Prueba 1	Roca	Cantera Punta de Parra.
Prueba 2	Roca	Cantera Lonco.
Prueba 3	Hormigón	75Kg de hormigón, 10.5L de agua y 0.72L de acelerante.
Prueba 4	Hormigón	75Kg de hormigón, 12L de agua, 8.7Kg de cemento, 37.5Kg de gravilla y 1.08L de acelerante.

A continuación, se efectuará una breve descripción de cada perforación realizada y posteriormente mostrar los primeros resultados del sistema para realizar un análisis en la siguiente sección. Destacar que los resultados de velocidad y torque están referidos al lado de la carga esto debido a que todo el proceso de perforación se concentra en el martillo y bit de la máquina.

➤ Prueba 1

Para la primera prueba se realizará una perforación con una roca extraída de Cantera Punta de Parra. La muestra se ubica debajo del martillo, una vez que el bit penetra la roca comienza la perforación (figura 4.8a), esta ocurre de manera constante sin ningún inconveniente, se crean pequeñas grietas en la roca antes de terminar la prueba (figura 4.8b), pero no interfieren en la

perforación, continuando hasta que la roca se parte en dos sin lograr atravesarla completamente (figura 4.8c).



Figura 4.8 Perforación Roca Cantera Punta de Parra.

(a) Penetración bit/roca. **(b)** Perforación de Roca. **(c)** Resultado final.

A continuación, se presentarán los resultados, estos comienzan desde el momento en que el bit penetra la muestra hasta que la roca se rompe y se divide en dos, abarcando la totalidad de la perforación.

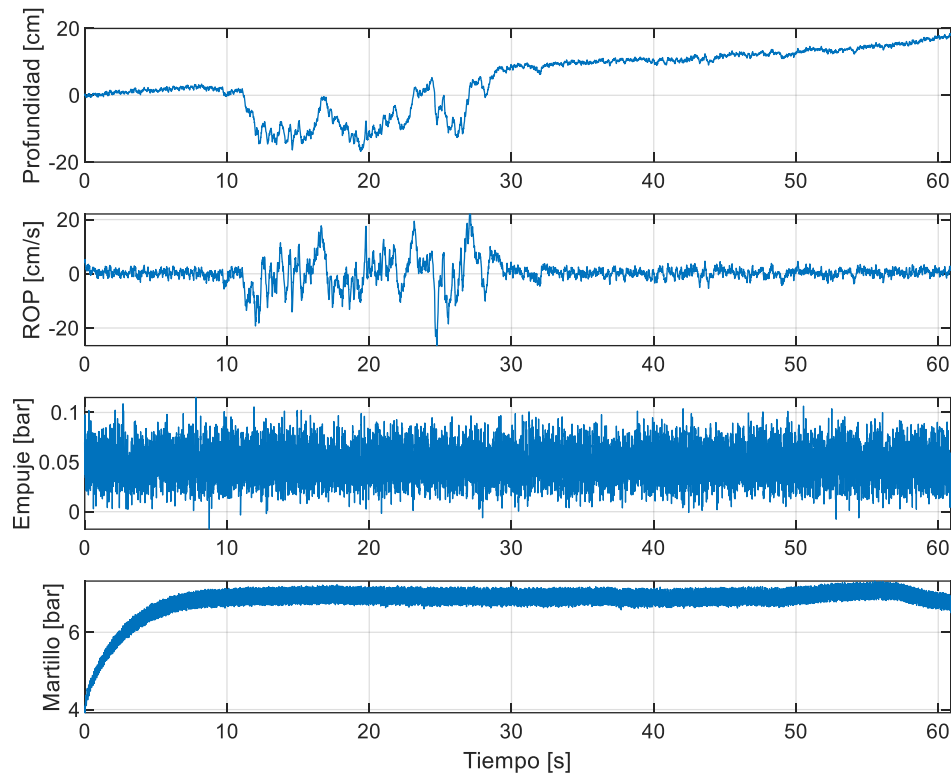


Figura 4.9 Monitoreo de sensores prueba 1.

De la figura 4.9, se tienen los datos entregados por los sensores, la primera gráfica nos muestra la profundidad de la perforación, tiene un comportamiento aproximadamente lineal, a excepción del tramo de 10s a 30s se observa perturbaciones, esto es debido al polvo que se generó mientras se trabajaba, provocando dichas lecturas erróneas en el sensor, que también se ve reflejada en la tasa de penetración en el mismo periodo de tiempo.

En el tercer y cuarto gráfico se tienen las mediciones de la presión de empuje y de percusión y barrido en el martillo. Como se mencionó en la sección 4.2 no utilizaremos presión de empuje por lo que es prácticamente cero en todo momento.

En cuanto a la presión del martillo, esta se ve que realiza un aumento a medida que avanza la perforación, hasta lograr una estabilidad y desde el instante 10s mantenerse constante. Finalmente, la perforadora tiende a fracturar la roca y produciendo una disminución en la presión.

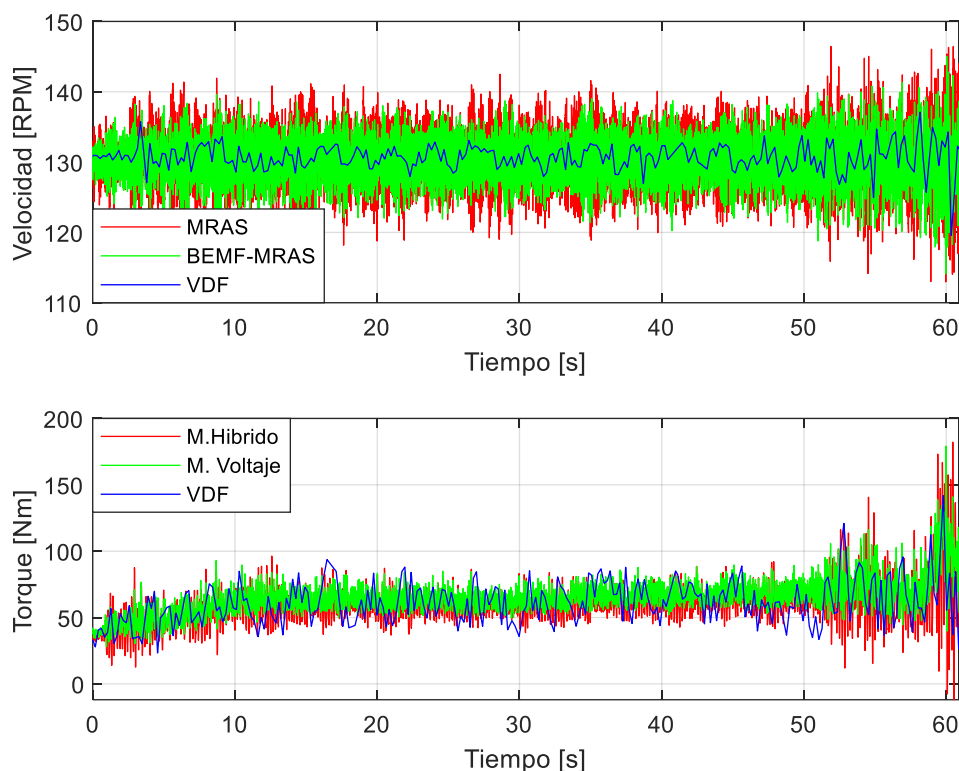


Figura 4.10 Monitoreo de observadores prueba 1.

En la figura 4.10 se tienen los datos de los observadores, en el primer gráfico tenemos la velocidad, se muestra ambos estimadores de velocidad y los datos entregados por el VDF, siendo similares en cuanto a su comportamiento en todo momento, sin variación alguna, a excepción de los últimos segundos que se produce un leve aumento producto de que la roca estaba al borde de romper.

En el segundo gráfico se tienen los torques de motor, con los dos estimadores utilizados y los datos obtenidos del VDF. Los modelos de voltaje e híbrido tienen el mismo comportamiento de VDF, aumentando su torque en los primeros instantes para luego estabilizarse en gran parte de la prueba, en los últimos segundos se ve un aumento de torque debido a lo explicado anteriormente, al encontrarse con una dureza mayor, el motor requirió más fuerza para lograr realizar la perforación hasta fracturar.

➤ Prueba 2

La segunda prueba se realizará una perforación con una roca extraída en Cantera Lonco. La muestra se ubica debajo del martillo, una vez que el bit penetra la roca comienza la perforación

(figura 4.11a), esta ocurre de manera constante sin ningún inconveniente (figura 4.11b), continua hasta atravesarla por completo (figura 4.11c).

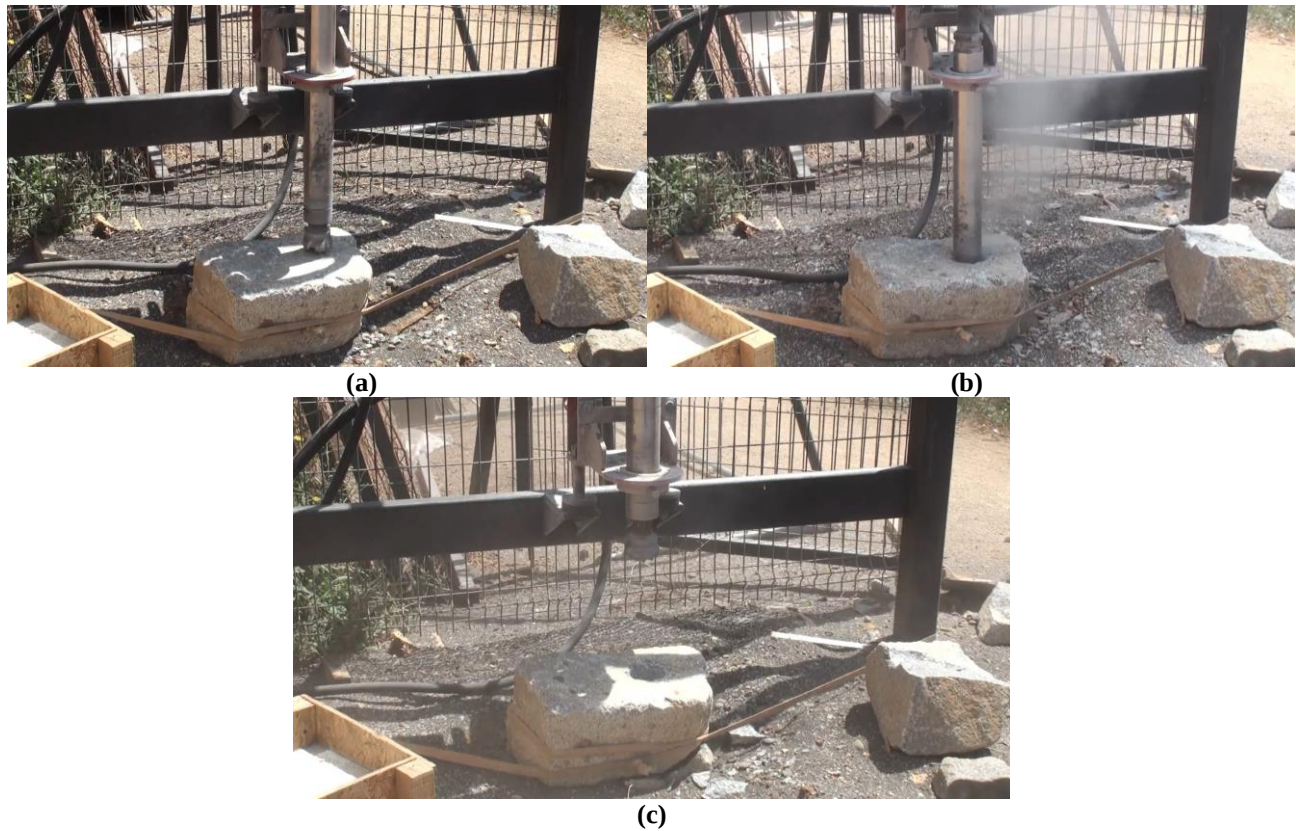


Figura 4.11 Perforación Roca Cantera Lonco.

(a) Penetración bit/roca. **(b)** Perforación de Roca. **(c)** Resultado final.

Los resultados obtenidos comienzan desde el momento en que el bit penetra la muestra hasta que la roca es totalmente atravesada por el martillo, abarcando la totalidad de la perforación.

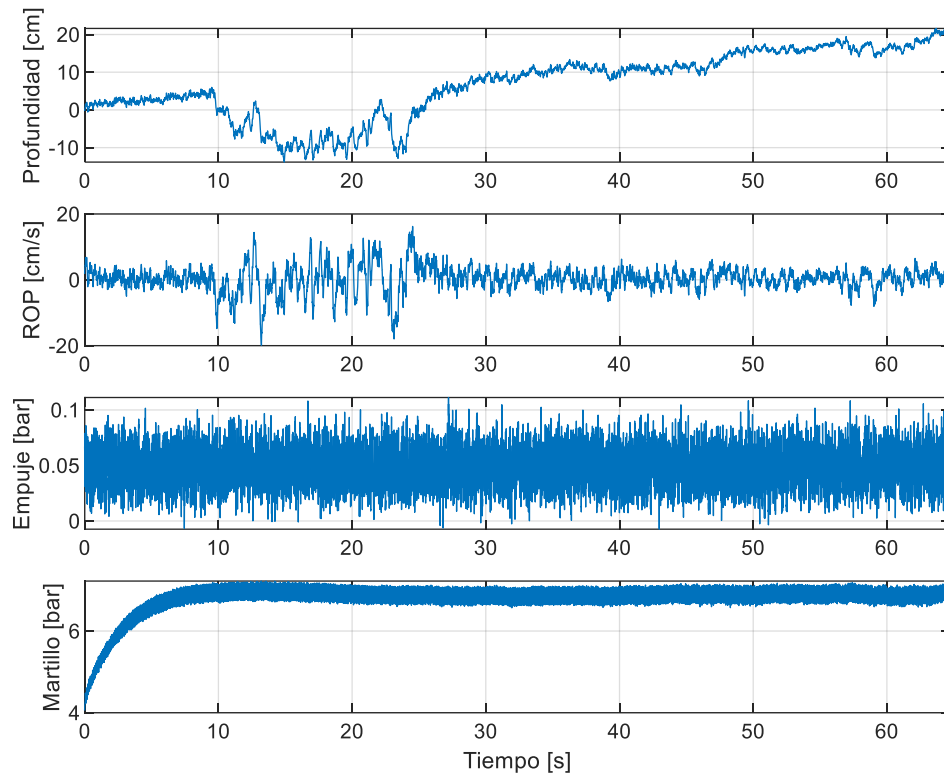


Figura 4.12 Monitoreo de sensores prueba 2.

En la figura 4.12 se muestran los datos reportados por los sensores, en el primer gráfico tenemos el sensor de profundidad, del cual se ve un incremento prácticamente lineal en el tiempo, en el tramo de 10s a 25s se ven lecturas erróneas, esto debido al polvo provocado por la perforación, esto se replica en el segundo gráfico de la tasa de penetración.

En el tercer y cuarto gráfico se tienen los sensores de presión, como se mencionó en la sección 4.2 no utilizaremos presión de empuje por lo que es casi cero en todo momento, en cuanto a la presión del martillo, esta se ve que realiza un aumento a medida que se avanza en la perforación, hasta lograr una estabilidad y mantenerse constante hasta el final.

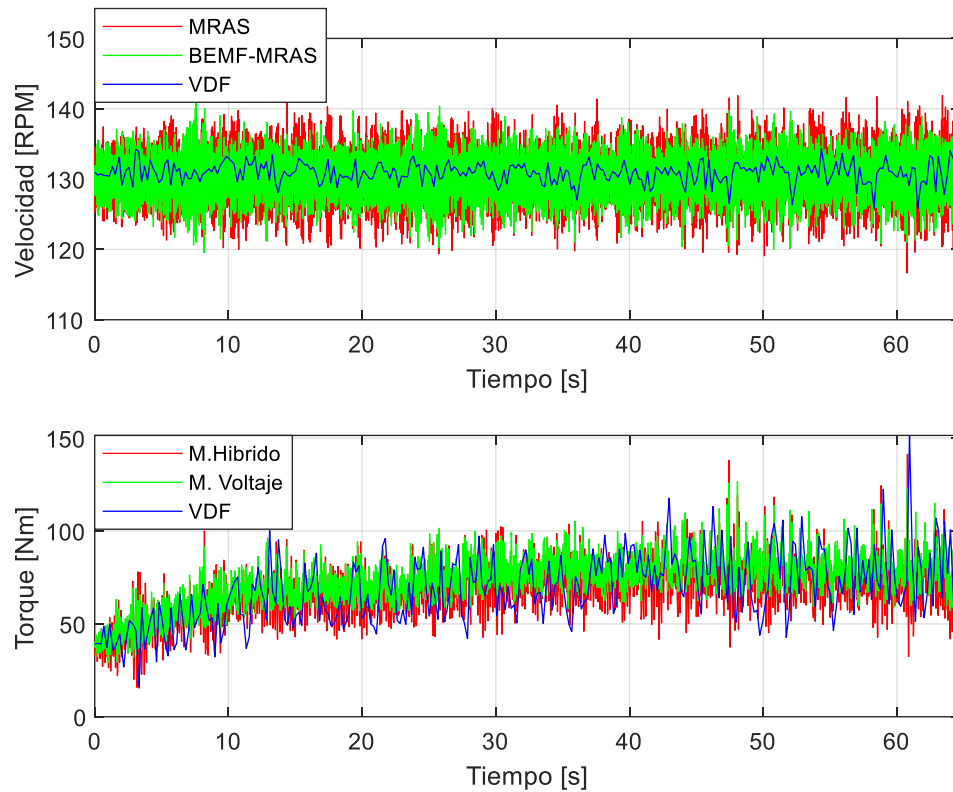


Figura 4.13 Monitoreo de observadores prueba 2.

En la figura 4.13 se tienen los datos de los observadores mientras se perfora, en el primer gráfico esta la velocidad donde se muestra ambos estimadores de velocidad y los datos entregados por el VDF, estos no sufren cambio alguno en toda la prueba realizada, manteniéndose constante en todo momento.

En el segundo gráfico se encuentran los torques de los dos estimadores utilizados y los datos del VDF. Los modelos (Voltaje e híbrido) se comportan de la misma forma que lo entregado por el VDF, aumentando el torque en los primeros instantes de la perforación hasta mantenerse constante gran parte de esta, se ve que en el último tramo ocurre una disminución, esto es a causa de que el martillo atraviesa la roca completamente.

➤ Prueba 3

La tercera prueba se realizará una perforación utilizando una muestra de hormigón, específicamente la muestra número 3 (ver tabla 4.1), la cual llamaremos como Hormigón Blando por sus características. La muestra se ubica debajo del martillo, una vez que el bit penetra la roca comienza la perforación (figura 4.14a), esta ocurre de manera constante sin ningún inconveniente

(figura 4.14b), continua hasta que en el tramo final de la muestra la fuerza que ejerce la perforadora destruye parte de la base, terminando inmediatamente la prueba (figura 4.14c).

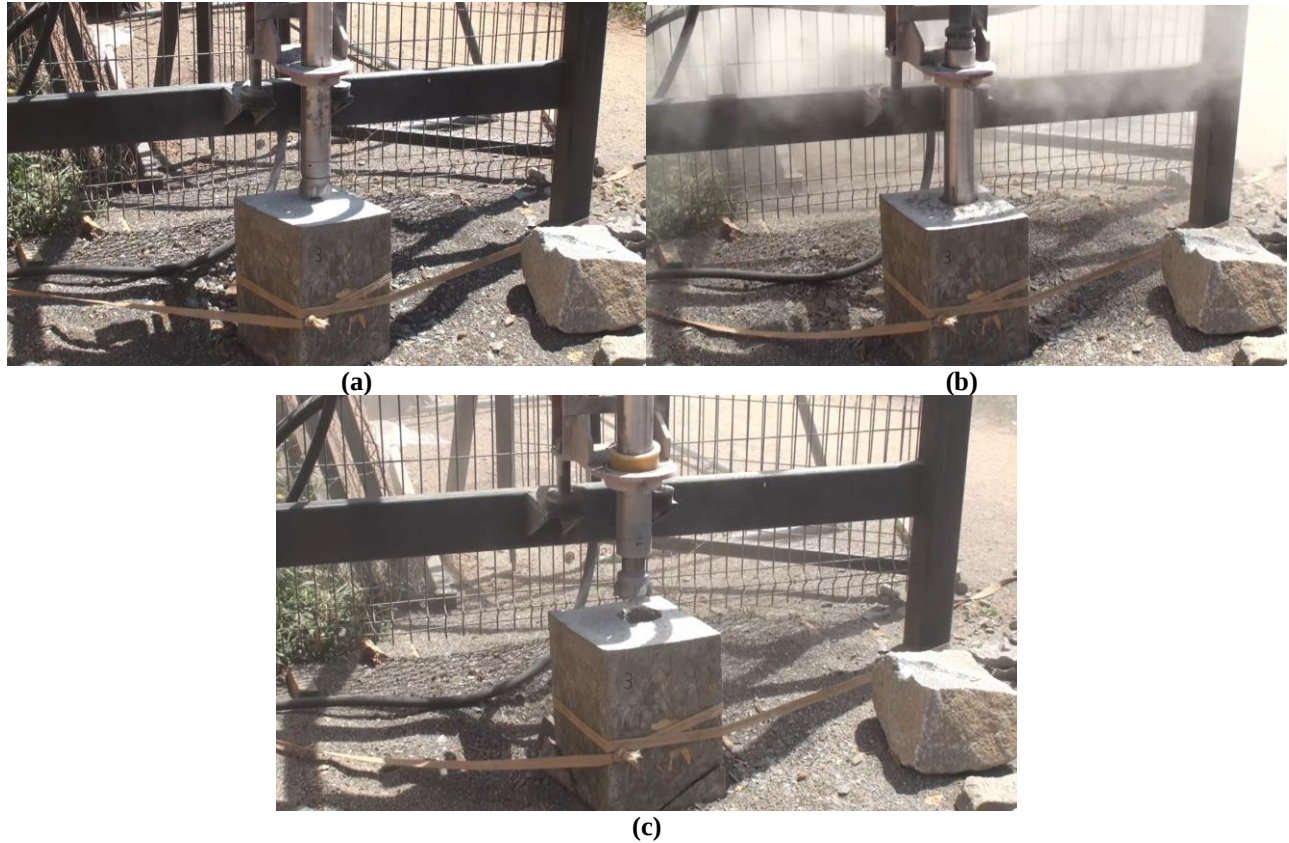


Figura 4.14 Perforación Hormigón Blando.

(a) Penetración bit/muestra. **(b)** Perforación de la muestra. **(c)** Resultado final.

A continuación, se presentan los resultados monitoreados de la perforación que comienzan desde el momento en que el bit penetra la muestra hasta se destruye parte de la base, abarcando la totalidad de la perforación.

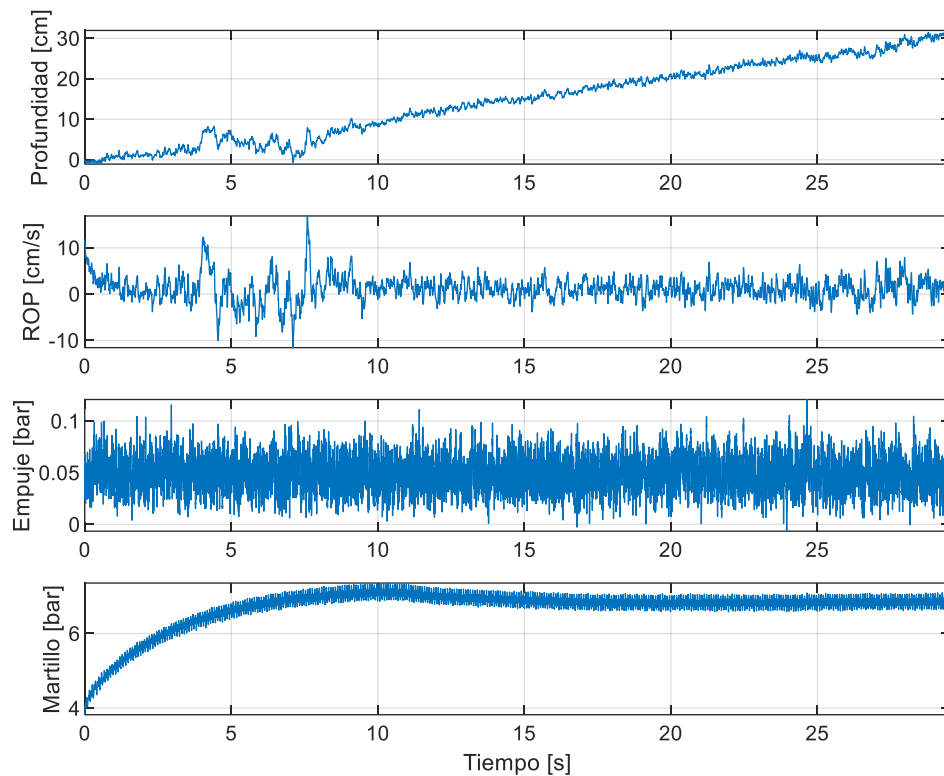


Figura 4.15 Monitoreo de sensores prueba 3.

En la figura 4.15 se grafican los datos obtenidos por los sensores, en el primer gráfico tenemos el sensor de profundidad, en el tramo entre aprox 4s a 8s se ven lecturas un poco distorsionadas, esto se replica en el segundo gráfico de la tasa de penetración, esto debido al polvo provocado por la perforación. El resto de la prueba el avance de la perforadora es de carácter lineal sin interrupción.

En el tercer y cuarto gráfico se tienen los sensores de presión, como se mencionó en la sección 4.2 no utilizaremos presión de empuje por lo que es casi cero en todo momento, la presión del martillo realiza un aumento al inicio para luego estabilizarse y tener una presión constante hasta finalizar la prueba.

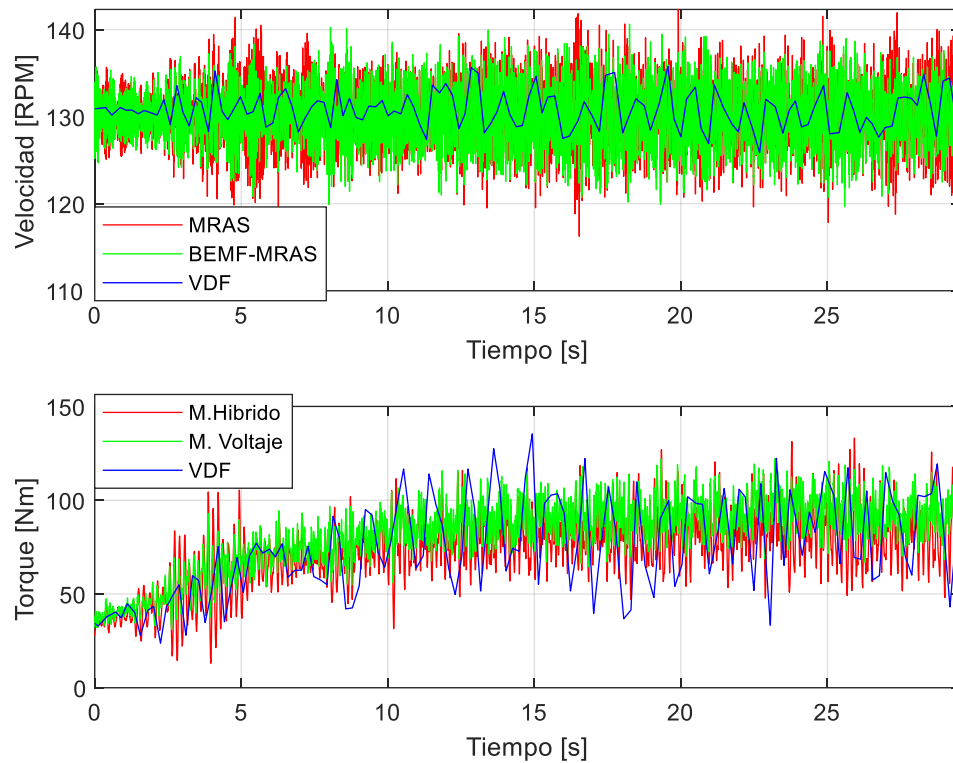


Figura 4.16 Monitoreo de observadores prueba 3.

En la figura 4.16 se encuentran los datos entregados por los observadores, en el primer gráfico esta la velocidad donde se muestra ambos estimadores de velocidad y los datos entregados por el VDF, en donde no se observan cambio de velocidad, manteniéndose constante en todo momento de la perforación.

En el segundo gráfico se encuentran los torques de los dos estimadores y los datos del VDF. Con respecto a los modelos (Voltaje e híbrido), tienen un comportamiento similar a lo que nos entrega el VDF, al inicio de la perforación se ve un aumento para luego mantenerse con un torque constante en lo que resta de la prueba.

➤ Prueba 4

La última prueba consta de la perforación de la muestra número 6 (ver tabla 4.1), por sus características la llamaremos como Hormigón Gravilla. La muestra se ubica debajo del martillo, una vez que el bit penetra la roca comienza la perforación (figura 4.17a), esta ocurre de manera constante sin ningún inconveniente (figura 4.17b), continua hasta que en el tramo final de la muestra la fuerza que ejerce la perforadora destruye parte de la base, terminando inmediatamente la prueba

(figura 4.17c).

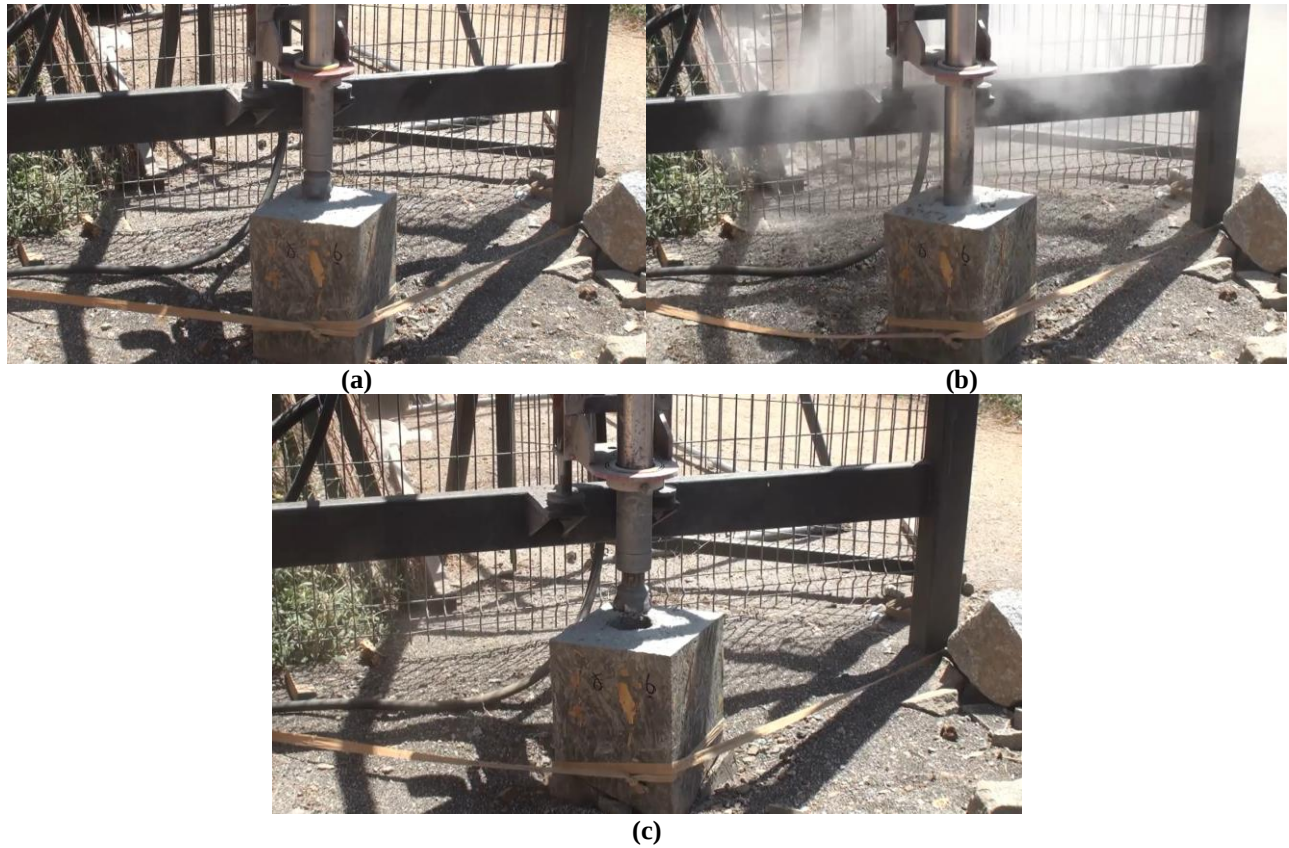


Figura 4.17 Perforación Hormigón Gravilla.

(a) Penetración bit/roca. **(b)** Perforación de Roca. **(c)** Resultado final.

A continuación, se muestran los resultados obtenidos del set de sensores implementados, estos comienzan desde el momento en que el bit penetra la muestra hasta que destruye parte de la base y es totalmente atravesada, abarcando la totalidad de la perforación.

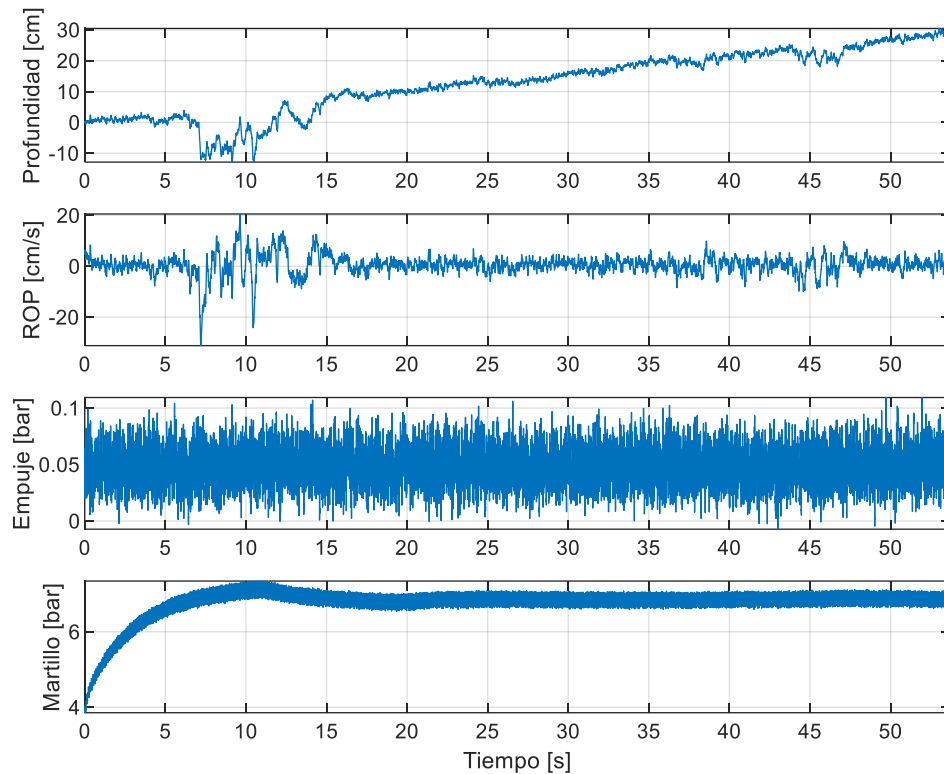


Figura 4.18 Monitoreo sensores prueba 4.

En la figura 4.18 se encuentran los datos obtenidos por los sensores, en el primer gráfico se tiene el sensor de profundidad, en el tramo entre 7s a 17s y 44s a 47s se generan se generan perturbaciones en la medición producto del polvo generado por la perforacion realizada, esto se replica en el segundo gráfico de la tasa de penetración. El resto de la prueba el avance de la perforadora es de carácter lineal sin interrupción.

En el tercer y cuarto gráfico se tienen los sensores de presión, como se mencionó en la sección 4.2 no utilizaremos presión de empuje por lo que es casi cero en todo momento, la presión del martillo realiza un aumento al inicio para luego estabilizarse y tener una presión constante hasta finalizar la prueba.

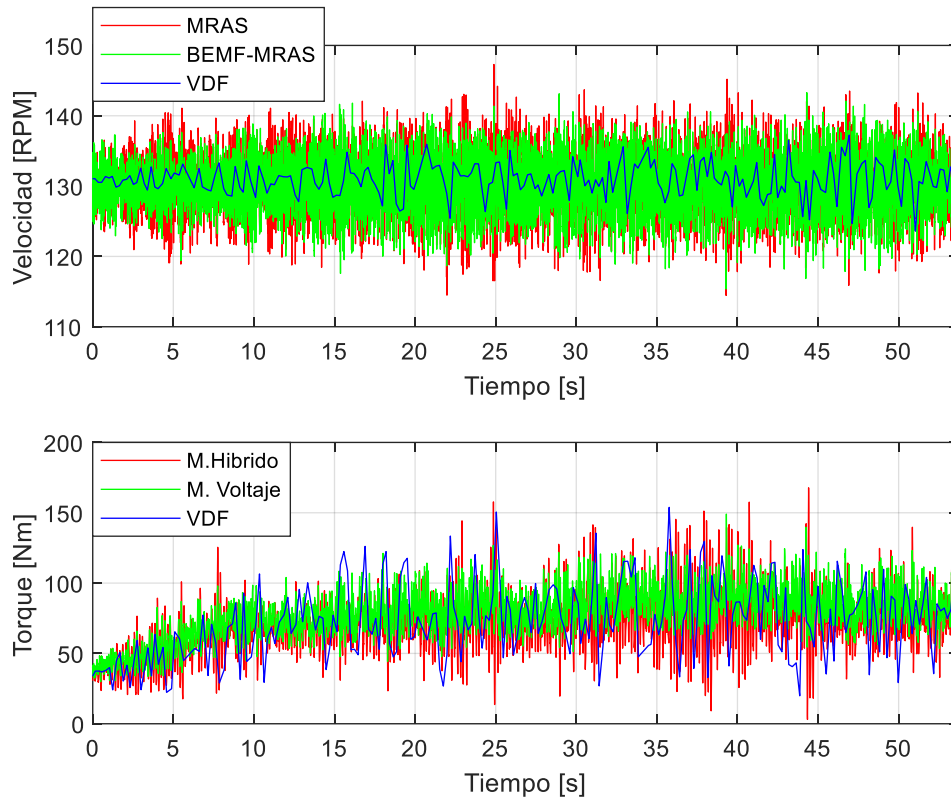


Figura 4.19 Monitoreo de observadores prueba 4.

En la figura 4.19 se encuentran los datos de los observadores, en el primer gráfico esta la velocidad donde se muestra ambos estimadores de velocidad y los datos del VDF, en donde no se observan cambio de velocidad, manteniéndose constante en todo momento de la perforación.

En el segundo gráfico se encuentran los torques de los tres estimadores utilizados y los datos que proporciona el VDF. Con respecto a los modelos de voltaje e híbrido, estos tienen un comportamiento similar a lo que nos entrega el VDF, aumentando su valor desde el inicio para posteriormente mantenerse constante por el resto de la perforación.

4.5. Análisis de resultados

A partir de los resultados obtenidos en las pruebas preliminares, se encontró un patrón que se reitera en las distintas pruebas. Esto será definido y analizado a continuación.

4.5.1 Etapas de perforación

De los datos obtenidos en las 4 pruebas, en las figuras 4.10, 4.13, 4.16 y 4.19, se observa que el torque tiene un comportamiento similar en todas las pruebas, en donde, se logra reconocer 4

etapas. En la figura 4.20 se presenta las etapas relacionadas a la perforación. En la etapa 1, se reconoce el torque más bajo de toda la gráfica, esto es debido a que el motor viene de un periodo en que gira en vacío y solo se observan las perdidas mecánicas por el reductor, siendo la etapa en que no se realiza una perforación. Esta etapa no entrega mayor información para la perforación.

La etapa 2 se produce desde el instante en que el bit hace contacto con la muestra, pasando de un estado en vacío a un estado con carga, generando un aumento de torque. Además, hay que agregar que el empuje producido por la perforadora es otra variable que genera este aumento de torque, ya que al perforar el bit y martillo comienza a sumergirse dentro de la muestra y roza las paredes de la roca u hormigón. En resumen, el periodo transitorio en que aumenta el torque, es generado tanto por el cambio de estado (vacío a carga), el empuje y el roce que se genera al sumergirse el martillo dentro de la muestra.

La etapa 3 consta de un periodo estacionario, donde la perforadora trabaja a un torque constante, con el martillo totalmente sumergido en la muestra.

Cuando la perforación llega al final del recorrido que tiene la muestra, se produce un cambio de capa, en nuestro caso es desde la muestra (roca u hormigón) al suelo, este cambio que se genera la llamamos etapa 4 y el torque entrega valores aleatorios, ya que, ambos estratos no se encuentran unidos uno al otro. Esta etapa no entrega información relevante, por ende, no se realizará un análisis.

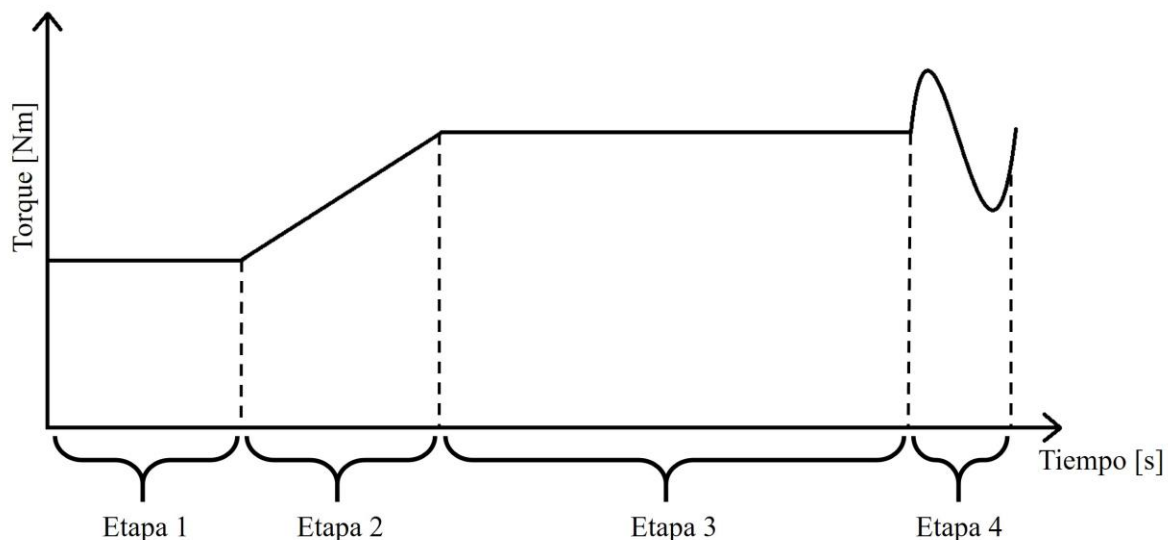


Figura 4.20 Etapas del torque en una perforación.

4.5.2 Análisis etapa 1 de perforación

En la etapa 1 los valores deben ser idénticos para las distintas pruebas, esto sirve para

proporcionar que las pruebas fueron realizadas bajo los mismos criterios, estos valores fueron tabulados en la tabla 4.4. En la tabla se observa que todos inician con valores similares, indicando que todas las perforaciones comienzan con los mismos valores, corroborando lo anteriormente mencionado.

La presión de empuje no estará considerada, ya que, es prácticamente cero en todas las pruebas. En las tablas las abreviaciones M.H representa el modelo híbrido y M.V. el modelo de voltaje.

Tabla 4.4 Valores referidos al lado de la carga en etapa 1.

Prueba	Presión martillo (bar)	Torque M.H. (Nm)	Torque M.V. (Nm)	Velocidad BEMF-MRAS (rpm)	Velocidad MRAS (rpm)
Prueba 1	3.459	32.822	35.640	130.182	130.164
Prueba 2	3.491	33.266	36.110	130.182	130.164
Prueba 3	3.459	33.209	35.968	130.182	130.164
Prueba 4	3.595	32.439	35.239	130.173	130.145

4.5.3 Análisis etapa 2 de perforación

Como se mencionó anteriormente, los valores de torque y, además, la presión, tienen variaciones entre la etapa 1 y la etapa 3 (motor y compresor, encendidos, trabajando a plena carga). Para el análisis ocuparemos valores del modelo híbrido y del BEMF-MRAS para obtener aumento que se generó en la etapa 2 de la perforación para las diferentes variables, estos valores se encuentran en la tabla 4.5. En ella observamos que la velocidad no ocurre una variación considerable por lo que se considera constante en todo momento de las pruebas.

En el torque ocurre un aumento para cada muestra, para la Roca P.P., se tiene un aumento del 89.74%, en la prueba Roca Lonco aumento 118.8%, en la prueba con hormigón blando hubo un aumento del 148.55% y en la prueba hormigón gravilla se generó un aumento del 135.95% indicando que el motor requiere de un torque superior a la que ya estaba trabajando en la etapa 1.

En cuanto a la presión del martillo se ve que, si ocurre un aumento en todas las pruebas, con un promedio de 3.36bar, se calculó el promedio por el simple hecho de que tanto los valores iniciales como finales son aproximadamente iguales, por lo que el aumento entre ellas es idéntico, esto se genera, ya que, el martillo busca la forma de trabajar a una presión constante. Como el martillo trabaja con presión de 5bar a 10bar se llega a la conclusión que la presión de operación del martillo es de aprox. 7bar y este va variando dependiendo de la dureza o algún inconveniente (cambio de dureza o fractura) que ocurra a medida que se perfora.

Tabla 4.5 Aumento de parámetros en etapa 2 de la perforación, referidos a la carga.

Prueba	Delta Presión martillo (bar)	Incremento Torque M.H. (Nm)	Variación Velocidad BEMF- MRAS (rpm)
Prueba 1	3.464	29.455	0.073
Prueba 2	3.372	39.522	0.109
Prueba 3	3.381	49.334	-0.082
Prueba 4	3.254	44.101	-0.073

4.5.4 Análisis etapa 3 de perforación

A continuación, la tabla 4.6 se presentan los resultados obtenidos de cada prueba realizada para la etapa 3. Destacar que, para la presión del martillo, velocidad y el torque se calcularon los promedios utilizando solo el periodo estacionario de cada prueba. Para determinar el estado estacionario en las pruebas, se detectó el intervalo en que las variables no varían en el tiempo por medio de los gráficos (etapa 3), una vez escogido dicho intervalo se procede a calcular su valor promedio en diversos tramos. Si el sistema se encuentra en estado estacionario estos promedios deben ser similares.

Las variables de tiempo de perforación, profundidad y ROP es el resultado desde que el bit realiza el contacto con la roca hasta la finalización de cada prueba.

Tabla 4.6 Resultados de las pruebas preliminares en estado estacionario (etapa 3).

Prueba	Tiempo de perforación (s)	Profundidad (cm)	ROP (cm/s)	Presión martillo (bar)	Torque M.H. (Nm)	Torque M.V. (Nm)	Velocidad BEMF- MRAS (rpm)	Velocidad MRAS (rpm)
Prueba 1	60.9	18.477	0.623	6.923	62.277	68.644	130.255	130.200
Prueba 2	64.8	21.554	0.454	6.864	72.788	79.916	130.291	130.236
Prueba 3	29.56	31.802	1.060	6.840	82.543	93.627	130.100	130.018
Prueba 4	53.75	29.218	0.554	6.849	76.540	86.933	130.100	130.027

De la tabla 4.6 se observan diferencias entre las distintas pruebas, las más destacables son el tiempo de perforación, la ROP y el torque. La velocidad no representa gran variación, la presión del martillo se mantiene con valores similares mientras se está perforando en todas las pruebas, por lo que su análisis solo permite verificar condiciones de presión similares.

Las rocas demoraron más tiempo en realizar una perforación de poca profundidad, mientras que los hormigones demoraron menos y con una profundidad mayor, ya que, los de hormigón son de

menor dureza en comparación a las rocas, por lo que la velocidad de perforación es mayor en los hormigones y se puede ver en los datos de la tasa de penetración, en donde las rocas tienen valores bajos, mientras que el hormigón blando tiene un valor superior a 1cm/s, dando a entender que entre mayor ROP mayor es el avance de perforación en menor tiempo, caso contrario, a menor ROP, menor es el avance y el tiempo tiende a dilatarse.

Como se mencionó en la sección 4.2, el caso del hormigón gravilla es particular. Con los resultados, se ve que al perforar se comporta como una roca debido a la grava, por esta razón los resultados tienden a estar cercanos a valores de las rocas y la tasa de penetración se encuentra como valor medio entre las dos muestras de rocas.

A continuación, se realizará el cálculo de la energía específica (SE) la cual se define como la energía necesaria para excavar un volumen unitario de cierto tipo de roca. Mediante la ecuación 1.2, mostrada en el primer capítulo, esta se divide en dos componentes, la componente de empuje y la componente rotativa. La ecuación contiene los parámetros obtenidos mediante el sistema MWD.

Antes de calcular, la tasa de penetración se encuentra en la tabla 4.10 con una unidad de medida en m/s. La fuerza de empuje fue calculada en la sección 4.2, siendo de 1623.86N para todas las pruebas. El área de sondaje depende de la broca usada, en nuestro caso se utilizó una de 9cm de diámetro, como se mencionó en la sección 2.2.4, obteniendo un área de sondaje de 0.006362m². Recordar que las variables de torque y velocidad de rotación se encuentran referidos al lado de la carga.

Con las conversiones mencionadas es posible obtener directamente la energía específica, en la tabla 4.10 se encuentran los valores de cada prueba realizada.

Tabla 4.7 Tasa de penetración y energía específica.

Prueba	ROP (m/s)	SE empuje (MPa)	SE rotatorio (MPa)	SE total (MPa)
Prueba 1	0.006228	0.26	21.44	21.70
Prueba 2	0.004543	0.26	34.36	34.63
Prueba 3	0.010598	0.26	16.68	16.94
Prueba 4	0.005535	0.26	29.61	29.87

A partir de los resultados de la tabla 4.7, se observa que la SE de empuje es una componente marginal con respecto a la SE total. Además, se puede realizar una relación entre energía específica y tasa de penetración, ya que, la energía específica aumenta mientras que la tasa de penetración es más lenta. Esto se corrobora con las pruebas de la roca lonco que tiene una baja tasa de penetración, pero un alto valor de energía específica. En cambio, el hormigón blando presenta una alta tasa de penetración, pero la energía específica es mucho menor, siendo inversamente proporcional ambas

variables.

A continuación, en la tabla 4.8 (ordenada de manera que la SE sea creciente) se presenta una tabla resumen con los resultados de las variables más relevantes en las distintas pruebas. En esta tabla se incluye el valor de la UCS realizada a cada muestra.

Tabla 4.8 Tabla resumen.

Prueba	Tiempo de perforación (s)	ROP (m/s)	Torque (Nm)	SE (MPa)	UCS (MPa)
Prueba 3	29.56	0.010598	82.543	16.935	14.54±3.65
Prueba 1	60.9	0.006228	62.277	21.695	92.64±42.89
Prueba 4	53.75	0.005535	76.540	29.87	25.42±1.43
Prueba 2	64.8	0.004543	72.788	34.618	161.51±11.54

La prueba de hormigón gravilla (prueba 4), como se explicó anteriormente, es un caso particular, ya que, presenta valores de una muestra de roca. Esto se ve en su tiempo de perforación, tasa de penetración y energía específica, el cual se encuentra en medio de los valores de la roca P.P. y Lonco (prueba 1 y prueba 2 respectivamente), que se tabulan en la tabla 4.8.

Lo anterior corrobora lo mencionado en el apartado 4.2 con respecto a su UCS, debido a que está hecha por piedras molidas unidas por el hormigón y al realizar las pruebas para el cálculo de la UCS se obtienen valores del material que cede primero a la compresión, que en este caso es el hormigón. Pero al contener gravilla (figura 4.21b), su materialidad se comporta como una roca al realizar una perforación.



Figura 4.21 Muestra hormigón gravilla después de la perforación, prueba 4.

(a) Vista superior. **(b)** Vista inferior.

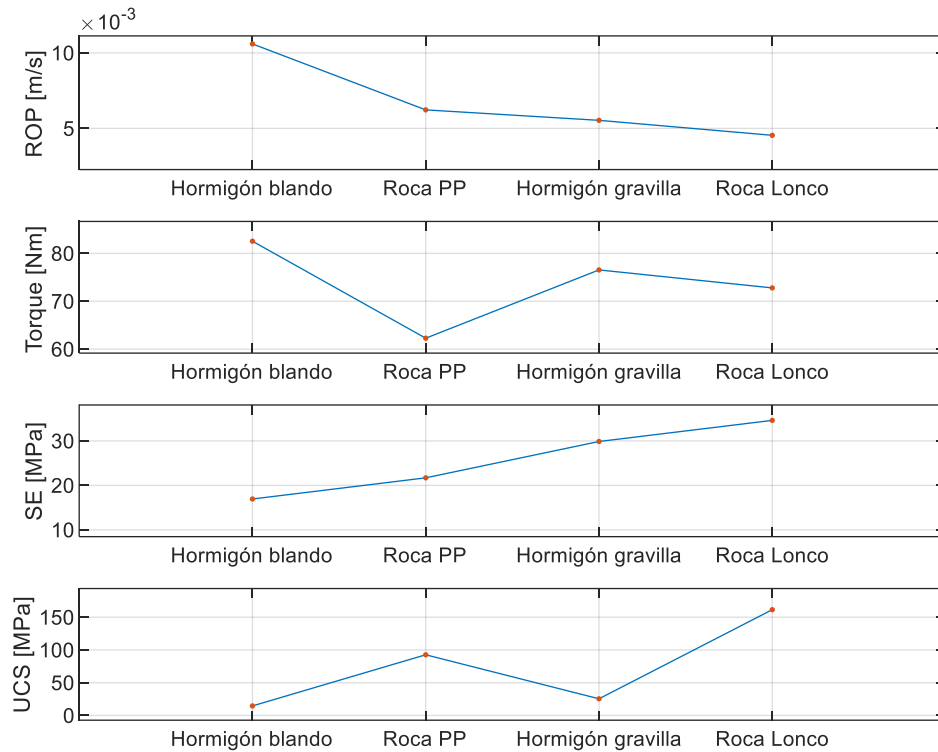


Figura 4.22 Gráfico resumen

Para concluir, en la figura 4.22 se grafican los valores que se tabularon en la tabla 4.8 y se observa a primera vista una relación inversa entre la ROP y la energía específica, ya que a medida que aumenta la SE, la ROP tiende a decaer.

Además, se ve una relación directa de la UCS con la energía específica, es decir, entre mayor es la UCS de la muestra, mayor es su energía específica, a excepción el caso de hormigón gravilla por lo explicado anteriormente.

Al observar la señal de torque vemos que existe una correlación inversa respecto a la UCS, es decir, a medida que aumenta el torque, disminuye la UCS y viceversa. Sin embargo, no se observa ninguna relación clara del torque con la SE y la ROP.

En resumen, las variables de tasa de penetración y energía específica, se pueden correlacionar con los resultados obtenidos en el cálculo de su resistencia a la compresión (UCS), sin embargo, en el caso del torque estas correlaciones no son tan claras, demostrando que analizar aisladamente esta señal no es una buena estrategia para caracterizar las muestras perforadas.

Capítulo 5. Conclusiones

5.1. Sumario

Para lograr realizar este proyecto fue necesario el conocimiento de los sistemas de perforación para entender las diferencias con respecto a la DTH y de sistemas de monitoreo en la perforación donde se debe comprender diversos conceptos como la energía específica, tasa de penetración, además, el control de accionamientos industriales (modelos dinámicos del motor, control vectorial, transformación de sistemas), necesario para el uso de estimadores de velocidad y torque y el concepto de MWD.

Durante el desarrollo de este trabajo se realizó la puesta en marcha del equipo de perforación DTH, el cual se incluye un sistema MWD. A lo largo del documento se describe todo el funcionamiento de la perforadora, se explican el set de sensores utilizados y su montaje en la perforadora para su respectivo uso. Además, este informe incluye la implementación de los estimadores de torque y velocidad, para que trabajen en conjunto y obtener el sistema MWD basado en observadores, finalizando con sus respectivas pruebas preliminares.

Hay que recalcar que se realizó una revisión bibliográfica actualizada, estas investigaciones presentadas por diversos autores realizan distintos métodos, teniendo todos en común el uso de un sistema MWD, donde, la mayoría de estos se tiene un monitoreo de la presión (empuje y martillo), profundidad, tasa de penetración, torque y velocidad en base a sensores. Paralelamente se reviso acerca de los modelos de estimación (torque y velocidad), en donde se incorporó un nuevo modelo de estimación de velocidad (BEMF-MRAS).

De estos documentos se rescatan hechos importantes que ayudaron al estudio como la realización de muestras para las pruebas preliminares, la obtención de la energía específica y la implementación de un nuevo estimador de velocidad.

El prototipo del Sistema de perforación DTH es totalmente eléctrico, operando con un compresor de tornillo lubricado, entregando energía suficiente para operar, siendo parte del sistema neumático. Se tiene un motor de inducción eléctrico generando la rotación, alimentado por un VDF, siendo ambas partes del sistema eléctrico.

Tanto el motor y el compresor producen la perforación roto-percusiva produciendo un sistema robusto de perforación DTH. Además, se solucionaron problemas de inestabilidad de operación tanto del sistema neumático agregando válvula de purga de aire, permitiendo una

perforación constante por tramos más largos de tiempo (ver figura 2.19) y de la maquinaria instalándola en una estructura firme para su uso.

La modificación en la estructura del sistema de perforación DTH, dejándola a 90° con respecto al suelo fue un gran acierto (figura 2.4), proporcionando que la maquina se mantenga estática y evitar problemas de operación a lo largo de la investigación, entregando resultados satisfactorios de estabilidad y una fácil manipulación en ella.

Para el sistema MWD se contemplan los siguientes sensores: Sensor de distancia, Sensor de presión y Strain Gauge. Estas fueron implementadas en la perforadora, ajustados y calibrados para la adquisición de datos mientras se realiza una perforación. Para la estimación de torque y velocidad se utilizaron algoritmos robustos, que solo requieren del monitoreo constante de corriente y voltaje.

En la aplicación del sistema MWD se realizaron dos pruebas por separado. La primera consistió en verificar el correcto funcionamiento del set de sensores montados en la perforadora (presión y profundidad), además, se le aplicaron filtros pasa bajo, obteniendo una mejor lectura de datos y la reducción del alto contenido de ruido presente. De estas pruebas experimentales se logró trabajar con todo el set de sensores montados entregando resultados satisfactorios y legibles.

Posteriormente los estimadores fueron probados antes de trabajar en la obtención de los resultados preliminares, con el fin de corroborar su funcionamiento en el sistema de perforación DTH. Destacar que se registraron datos de voltaje y corrientes de tal manera de trabajar con los estimadores de manera offline para efectos de mejora.

Posteriormente luego de obtener una buena prestación tanto de sensores y observadores, se realizó un trabajo en terreno, con el fin de obtener una perforación segura para operadores y equipos. Construyendo paneles protectores para obtener un ambiente seguro.

Se obtuvieron muestras de rocas para perforar de diferentes canteras y se fabricaron muestras de hormigones con diferentes materiales y relación, para obtener diferencias de resistencias entre ellas.

A todas las muestras se le realizaron pruebas para obtener el valor de la UCS que será crucial para el análisis de los datos. También se calculó la fuerza de empuje de la perforadora, siendo este dato importante para obtener la energía específica.

Se realizaron 4 pruebas perforando 4 materiales de diferente dureza, con el objetivo de obtener los primeros registros de datos mientras se perfora por medio de la Dspace MicrolabBox 1202, estas pruebas fueron con dos rocas de distintas canteras y dos muestras de hormigón que fueron fabricadas. Obteniendo resultados como el tiempo de perforación, profundidad, tasa de

penetración, presión de martillo y de empuje, torque y velocidad. Posteriormente con estos resultados fueron analizando, seleccionándose aquellos más representativos de las diferentes condiciones de operación consideradas.

5.2. Conclusiones

Respecto de los observadores de velocidad para el motor de inducción, el estimador de velocidad BEMF-MRAS presenta un mejor seguimiento, esto es visible en el periodo transitorio y estado estacionario (figura 3.25), por esta razón es el modelo a utilizar como referencia en los observadores de flujo requeridos para la estimación del torque.

Con respecto a los estimadores de torque, los modelos que requieren una velocidad de referencia (modelo híbrido y corriente) no presentaron inconveniente al utilizar el estimador de velocidad BEMF-MRAS, entregando resultados confiables. A pesar de eso, ocurre una gran diferencia entre ellos (figura 3.27).

El modelo híbrido se encuentra 0.1222Nm, es decir un 3.97% menos de lo entregado por el VDF, mientras que el modelo de corriente presenta una diferencia de 2.2972Nm, un 74.73% menos, presentando una diferencia bastante amplia, dejando en claro que el modelo de corriente es el que peores prestaciones nos entrega. Con respecto al estimador basado en el modelo de voltaje, en estado estacionario nos entregó un valor de 0.1327Nm sobre el VDF, un 4.32% superior al promedio del variador de frecuencia (valores se encuentran en tabla 3.8), por ende, el modelo híbrido y de voltaje son los más indicados a utilizar, entregando mejores resultados de torque.

Los resultados preliminares del MWD basado en observadores son alentadores, ya que, indican respuestas variadas con las muestras en un entorno controlado, siendo un progreso importante.

Se encontró un patrón similar para el torque en todas las pruebas (figura 4.20), siendo la etapa 2 y 3 las más importantes para este estudio, ya que se encuentra el cambio de un estado en vacío a un estado con carga (etapa 2) para posteriormente pasar a un estado estacionario donde las variables no se ven perturbadas hasta finalizar las pruebas (etapa 3).

Se observa que a partir de los resultados analizados la velocidad y la presión del martillo no son variables que se puedan considerar para una caracterización de muestras en estado estacionario, ya que, no existe cambio alguno, es decir, no se encontraron variaciones de dureza o fracturas a medida que se fueron perforando (tabla 4.6). Aun así, la presión pasa por un periodo transitorio, ajustándose hasta llegar a su valor de operación constante.

La variación de los parámetros monitoreados al realizar una perforación nos proporciona cierta cantidad de información casi instantánea de lo que está ocurriendo. Los datos que más resaltaron fue la energía específica (de fácil aplicación con los datos de perforación de estudio) y la tasa de penetración, la cual se pueden correlacionar. Aunque estas pruebas preliminares no son suficientes para establecer una correlación entre los parámetros monitoreados y las propiedades mecánicas de la roca, se observa que la energía específica es directamente proporcional a la UCS de las muestras.

Un caso particular fue la muestra hormigón gravilla, debido a que su valor de UCS indica poca resistencia a la compresión debido al cemento, caso contrario ocurre cuando se perfora, donde se comporta como un bloque completo de gravilla y hormigón, obteniendo una tasa de penetración más lenta, por esta razón es inviable realizar una correlación.

Para finalizar, en este informe se comprobó de manera experimental que un sistema MWD basado en observadores que solo requieren de variables eléctricas (voltaje y corriente) permite realizar un análisis y caracterización de los materiales que se perfora de distintas durezas. Esta innovación no se había visto antes en la literatura técnica especializada.

Si bien estos resultados son preliminares, el sistema MWD basado en observadores permite prescindir de algunos sensores, creando un sistema más económico y confiable, proporcionando un terreno fértil para seguir profundizando en el desarrollo de sistema MWD basado en observadores.

Además, el sistema propuesto se puede integrar al concepto Mine To Mill (definido como la optimización de la integración de la mina a las plantas concentradoras), siendo capaz de obtener información del material rocoso en una perforación de manera rápida, mejorando la eficiencia de operación.

5.3. Trabajo Futuro

- Diseñar sistema que permita bloquear polvo en el sensor de profundidad.
- Evaluar espectro de frecuencia de las señales obtenidas por medio del MWD que nos permita correlacionar con la frecuencia de percusión que se desarrolla en el martillo.
- Analizar resultados de vibraciones y observar si aporta alguna información adicional a la máquina para el análisis de diferentes muestras de rocas.
- Realizar nuevas pruebas variando el diámetro de la broca de percusión.

- Experimentar con brocas en condición de falla, para observar variación en las variables eléctricas y así lograr relacionarlas entre sí.

Bibliografía

- [1] Servicio Nacional de Geología y Minería. (2021). *Anuario de la Minería de Chile 2020*. https://www.sernageomin.cl/pdf/anuario_de_%20la%20Mineria_de_Chile_2020_290621.pdf
- [2] Torres Campos, J. N. M. (2021) “*Implementación de un Sistema de Registro de Variables Electromecánicas para Equipos de Perforación DTH*” [Tesis para optar al Título de Ingeniero Civil Eléctrico]. Universidad Católica de la Santísima Concepción.
- [3] Khanal, M., Qin, J., Shen, B. & Dlamini, B. (2020). Preliminary Investigation into Measurement While Drilling as Means to Characterize the Coalmine Roof. *Resource*, 9,10.
- [4] Khorzoughi, M. B. & Hall, R. (2016). Processing of measurement while drilling data for rock mass characterization. *International journal of mining science and technology* 26, 989-994.
- [5] Vezhapparambu, V. S., Eidsvik, J. & Ellefmo, S. L. (2018). Rock Classification Using Multivariate Analysis of Measurement While Drilling Data: Towards a Better Sampling Strategy. *Minerals*, 8,384.
- [6] Kadkhodaie-Ilkhchi, A., Monteiro, S. T., Ramos, F. & Hatherly, P. (2010). Rock Recognition From MWD Data: A Comparative Study of Boosting, Neural Networks, and Fuzzy Logic. *IEE Geoscience and Remote sensing Letters*, 7, 4.
- [7] Basarir, H., Wesseloo, J., Karrech, A., Pasternak, E. & Dyskin, A. (2017). The use of soft computing methods for the prediction of rock properties based on measurement while drilling data. *Deep Mining 2017: Proceeding of the Eighth International Conference on Deep and High Stress Mining*, 537-551.
- [8] Manzoor, S., Liaghat, S., Gustafson, A., Johansson, D. & Schunnesson, H. (2020). Establishing relationships between structural data from close-range terrestrial digital photogrammetry and measurement while drilling data. *Engineering Geology*, Vol 267.
- [9] Haron, A. R. & Idris, N. R. N. (2006). Simulation of MRAS-based Speed Sensorless Estimation of Induction Motor Drives using MATLAB/SIMULINK. *IEE International Power and Energy Conference*, 411-415.
- [10] Agrebi Zorgani, Y., Koubaa, Y. & Boussak, M. (2010). Simultaneous Estimation of Speed and Rotor Resistance in Sensorless ISFOC Induction Motor Drive Based on MRAS Scheme.

The XIX International Conference on Electrical Machine – ICEM 2010, 1-6.

- [11] Vas, P. (1998). *Sensorless Vector and Direct Torque Control*, Oxford University Press.
- [12] Bose, B. K. (2002). *Modern Power Electronics and AC Drivers*, Prentice Hall.
- [13] Mundo compresor. *Como funciona un Compresor de tornillo lubricado*.
<https://www.mundocompresor.com/articulos-tecnicos/como-funciona-compresor-tornillo-lubricado>
- [14] MICRO-MEASUREMENT. (2013). *Shunt Calibration of Strain Gage Instrumentation* (TN-514). <http://www.vishaypg.com/docs/11064/tn514.pdf>
- [15] Hibbeler, R. C. (2013). *Mecánica de Materiales*. Prentice Hall.
- [16] ASM international. (1961). *ASM handbook: Volume 1. Properties and Selection: Irons Steels and High Performance Alloys*. Materials Park, OH: ASM International.
- [17] Feijoo E. & Padrón J. (2020). La Resistividad de Rocas y su Relación con la Resistencia a Compresión Simple en Mina. *Universidad, Ciencia y Tecnología*. Vol. 24, 61-67.
- [18] Instituto Nacional de Normalización. (2016). *NCh 170 Of.2016: Hormigon: requisitos generales (NCh 170)*.

Anexo A. Sensor de deformación angular

A.1. Sistema de adquisición de datos

La SG-LINK-200 es un nodo de sensor de entrada analógica de tres canales pequeños, inalámbricos y de bajo costo para la integración del sistema, permite la recopilación de datos de alta resolución y bajo ruido a frecuencias de muestreo de hasta 1kHz, además tiene una función para calibrar de forma automática las galgas extensiométrica mediante Shunt resistors (resistencia de derivación). Para adquirir los datos del sensor el SG-LINK-200 se usa en conjunto con la puerta de enlace WSDA-BASE-101-LXRS, este último permite un muestreo de alta velocidad $\pm 32\mu s$ de nodo a base, sincronización y rendimiento de datos sin pérdidas en la mayoría de sus condiciones de operación.

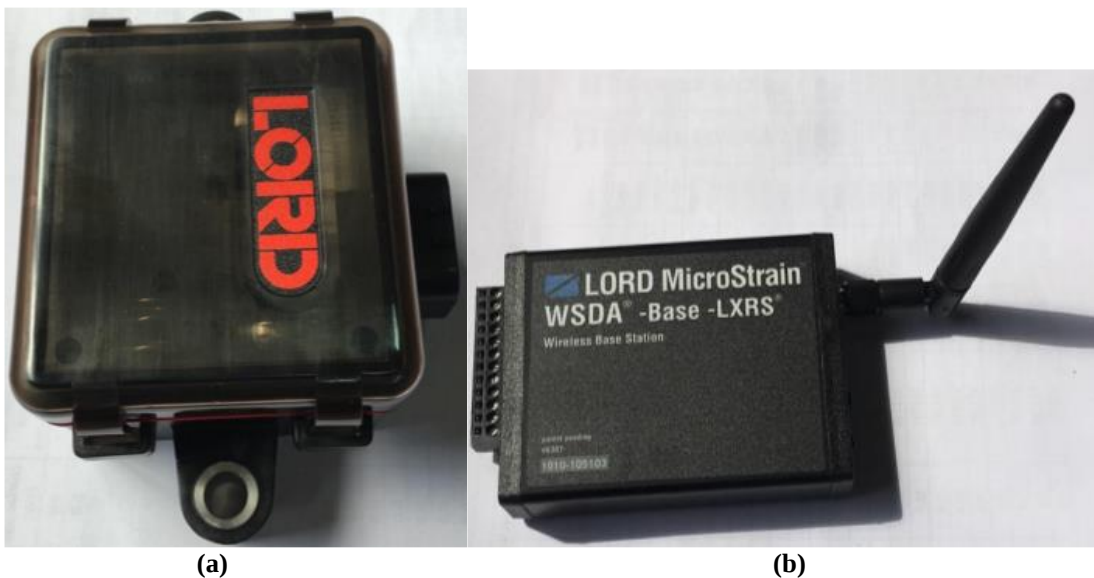


Figura A.1 Equipo de emisión y recepción de datos de la Strain Gauge.

(a) Nodo de sensor analógico inalámbrico SG-LINK-200. **(b)** Puerta de enlace WSDA-BASE-101-LXRS.

Tabla A.1 Características SG-LINK-200.

Parámetros	Magnitud
Alimentación	3.6VDC
Canales de entrada de sensores	3 diferenciales
Salida de excitación del sensor	1.5/2.5 VDC (100mA)
Alcance inalámbrico	1 km
Tiempo de sincronización	$\pm 50\mu s$
Peso	326g

Una vez el receptor de datos se conecta al PC mediante cable USB se podrán visualizar las

mediciones obtenidas por el sensor en conjunto con el software SensorConnect.

A.2. Montaje y calibración sensor

En este estudio, se cuenta con una galga extensiométrica Full-Bridge, este dispositivo contiene cuatro resistencias, cada una de ellas forman un ángulo de 45° con respecto al eje principal, sus parámetros se encuentran tabulados en la Tabla A.2, la Strain gauge se encuentra confinado en papel metálico y consiste en un papel aluminio dispuesto en forma de grilla (figura 3.3).

Tabla A.2 Parámetros principales Strain Gauge.

Parámetros	Magnitud
Modelo	CEA-XX-250USA-350
Resistencia	350 Ω
Gage Factor	2.04
Tolerancia de resistencia	$\pm 0.4\%$

Para la instalación de la galga extensiométrica se requirió realizar una serie de pasos, los materiales utilizados fueron: lijas, gasa (elemento de limpieza), esmalte de silicona (para impermeabilizar todo el montaje), acetona (ayuda a mantener la superficie limpia sin ningún residuo), cinta adhesiva y pegamento (para adherir el elemento a la superficie).

A continuación, se expondrá un breve resumen del procedimiento de instalación de la galga extensiométrica:

- En primer lugar, se debe escoger la superficie en que se va a instalar el sensor, esto es importante, ya que, una vez instalada no se podrá remover.
- Para la instalación de la Strain gauge en cualquier superficie o estructura, se debe tener el sector a ocupar totalmente lisa sin ninguna imperfección, implementando manualmente el proceso de lijado
- El paso siguiente es el proceso de limpieza, para eso se ocupará la acetona y la gasa, este procedimiento se debe realizar en una sola dirección las veces que sea necesario hasta que el ojo humano determine que la superficie no tenga ninguna suciedad al pasar la gasa.
- Con ayuda de la cinta adhesiva, se emplea el proceso de pegado ayudando a no contaminar y pre-tensionar el sensor, este procedimiento se debe realizar con mucho cuidado, colocando la Strain gauge en el sector de la superficie correcta. Una vez ya hecho se despegua una parte de la cinta con el dispositivo y adicionando el pegamento, en el punto y área de ubicación del sensor, dejándolo así adherido a la superficie,

logrando retirar la cinta adhesiva.

El lugar en donde se montará la strain gauge será en un sector de la perforadora que se encuentra entre el reductor y el acople del martillo, se optó por este sitio, ya que, es el lugar más cercano al martillo, además, se evitara cualquier inconveniente o accidente con el dispositivo a la hora de realizar una perforación. Realizando los pasos mencionados anteriormente para la instalación de la galga extensiométrica, se logró fijar de buena forma en la superficie (Figura A.2) el cual está hecho de acero carbonizado SAE 1030, es decir, un acero con alto contenido de carbono y tiene una resistencia y dureza moderada.



Figura A.2 Strain gauge adherida en superficie de perforadora DTH.

Una vez montada en la superficie, se realiza el proceso de soldadura en las lengüetas, para realizar esto, hay que tener conocimientos sobre el puente de Wheatstone para que las lecturas sean las correctas.

El circuito general del puente de Wheatstone, consiste en cuatro brazos resistivos con una excitación de voltaje, que se aplica a través del puente (Figura A.3), este tiene como voltaje de salida del puente V_o igual a:

$$V_o = \left[\frac{R_3}{R_3 + R_4} - \frac{R_2}{R_2 + R_1} \right] * V_{EX} \quad (1)$$

Donde,

V_o : Voltaje de salida (V).

V_{EX} : Voltaje de alimentación (V).

R_1, R_2, R_3, R_4 : Resistencia eléctrica (Ω).

De la ecuación 1 se da que cuando $\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_4}{R_3}$ el voltaje de salida es nulo. Bajo estas condiciones, se dice que el puente de wheatstone se encuentra balanceado. Cualquier cambio de resistencia sobre cualquier brazo del puente, resultara en una salida de voltaje no nula.

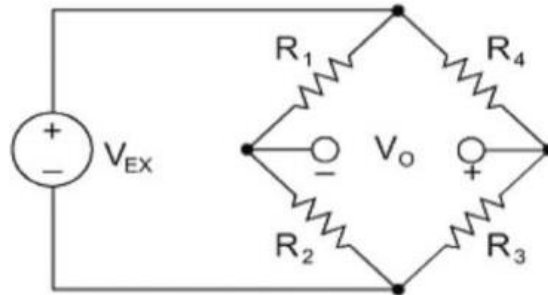


Figura A.3 Puente de Wheatstone.

Una vez entendido lo anterior, se procede a soldar realizando el puente de wheatstone en la galga extensiométrica, tal como se muestra en la Figura A.4. se ve que entre las lengüetas 2 y 4 se hace un puente, obteniendo así la salida de este en las lengüetas 2 y 3 que es la cual nos enviara los datos obtenidos ($\pm$ SEN) y la alimentación del dispositivo en las lengüetas 1 y 5 ($\pm$ EXC).

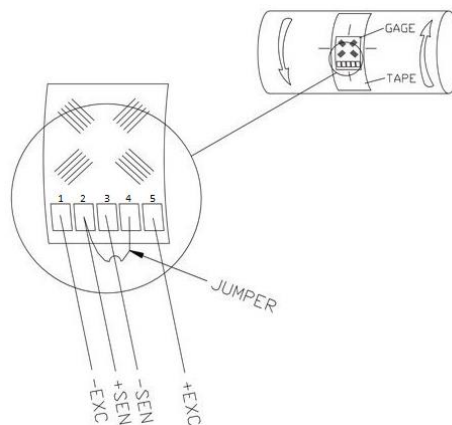


Figura A.4 Guía de conexiones Strain Gauge Full-Bridge

La figura A.5 se muestra el resultado final de la conexión en dirección a la SG-LINK-200, que es el encargado de transmitir los datos que se obtengan al realizar la perforación. El emisor de señal se debió modificar para adaptarlo al espacio en que se va a montar en la perforadora, reemplazándola por una caja plástica, sellada, para evitar que entre aceite o partículas que pueda dañar los circuitos internos, en la figura A.6 se observa el resultado final.

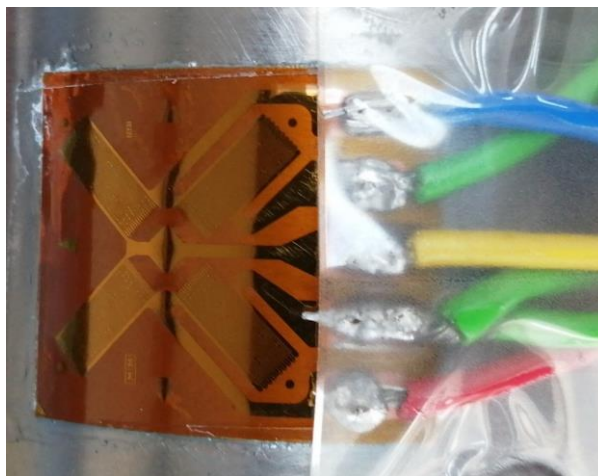


Figura A.5 Strain Gauge y sus conexiones.



Figura A.6 SG-LINK-200 modificada.

(a) Pines de conexión sensor. **(b)** Conexión para batería.

Ya terminada la instalación de la Strain gauge y la modificación del SG-LINK-200, se procede a montar todo en la perforadora, de tal manera que se encuentre cercana ambas partes para evitar problemas, el montaje del dispositivo emisor y su batería será simple, con cinta americana, ya que, la perforadora permanece en la intemperie y para evitar problemas externos tales como el robo de los dispositivos, el clima, entre otras, no habrá mayor inconveniente. En la figura A.7 se puede observar el montaje final de la Strain gauge y el emisor de señal, dejando sin obstrucción la salida de aire que se puede llegar a generar en esa parte y sin dar mayor problema a la hora de trabajar con la perforadora DTH.



Figura A.7 Montaje final Strain gauge y SG-LINK-200.

Con el montaje del sensor y emisor de señal se da paso a la configuración del dispositivo receptor WSDA-BASE-101-LXRS, este se debe conectar al PC, una vez conectado se debe realizar los ajustes pertinentes en el software SensorConnect (software de adquisición de dato con una interfaz de usuario simple e intuitivo, que se puede usar simultáneamente para recopilar y ver datos en tiempo real, ver figura A.8), en donde, los dispositivos que se conectan por USB se registran automáticamente en el sí están en la misma frecuencia operativa, una vez que se establezca conexión entre emisor y receptor, el software mostrara las opciones de configuración disponible.

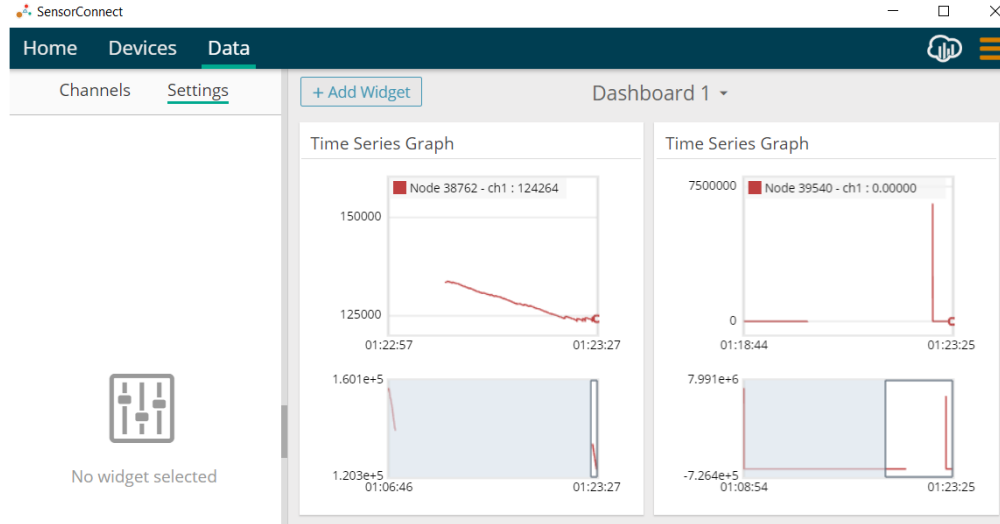


Figura A.8 Plataforma SensorConnect para visualizar datos.

Las configuraciones utilizadas están disponibles en Anexo A.4, en este apartado se configura el voltaje de alimentación de la Strain gauge, el amplificador de ganancia programable para limitar el rango de entrada del sensor y el filtro pasa bajo digital para reducir el ruido. Para la calibración del sensor, el software ofrece realizarla por medio de Shunt Resistance.

La Shunt Calibration Resistance o la calibración por resistencia de derivación de una galga extensiométrica se realiza de tal manera que para afectar su medición de deformación indicada para hacer que su lectura converja con una deformación simulada. Esto se logra conectando temporalmente una resistencia de precisión en paralelo con un brazo del puente de wheatstone para estimular la respuesta del instrumento a una disminución de resistencia correspondiente a una deformación conocida (figura A.9). Esta calibración es el enfoque más común utilizado para verificar el funcionamiento de un sistema de medición de deformación. según la nota técnica TN-514 [17], para calibrar la galga extensiométrica para obtener dicha resistencia, se calcula a partir de la ecuación 2.

$$R_C = \frac{R_G * 10^6}{F_G * N * \epsilon_{(\mu)}} - R_G \quad (2)$$

Donde,

R_C : Resistencia de calibración de derivación (Shunt calibration resistors, Ω).

R_G : Resistencia nominal de la strain gauge (Ω).

F_G : Factor Galga.

N : Numero activo de instrumentos activos

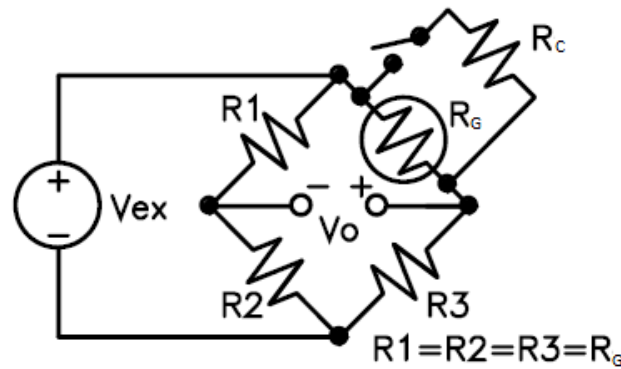


Figura A.9 Calibración por resistencia de derivación.

Como la strain gauge que ocuparemos es Full-bridge, el número activo de instrumentos activos $N=4$, con $R_G=350\Omega$, un factor de galga de 2.04 (parámetro clave de la galga extensiométrica, ya que, es su sensibilidad a la deformación equivalente a su cambio fraccionario en la resistencia al cambio fraccionario en la deformación), nos faltaría el valor de la deformación unitaria.

Para comprender la deformación unitaria se tiene que ir a una rama de la mecánica, la mecánica de materiales, que estudia las relaciones entre las cargas externas aplicadas a un cuerpo deformable y la intensidad de las fuerzas internas que actúan dentro del cuerpo, en otras palabras, es el análisis de las deformaciones que se relaciona con los cambios en la forma de la estructura que generan las cargas aplicadas.

Los conceptos fundamentales de la mecánica de materiales son el esfuerzo y la deformación unitaria. Se entiende por Strain o deformación unitaria al alargamiento o contracción de un segmento de línea por unidad de longitud [18], en términos matemáticos se define como la tasa de cambio de longitud.

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} \quad (3)$$

Donde,

ΔL : Cambio en la longitud del objeto (m).

L : Longitud inicial del objeto (m).

ε : Deformación unitaria.

El parámetro de Strain suele ser positivo o negativo (tensión y compresión respectivamente). En la práctica la magnitud de Strain es muy pequeña por lo que se expresa como μstrain (microstrain) que es $\varepsilon \times 10^{-6}$.

Ahora suponiendo que la barra está sometida a una deformación uniforme constante, entonces esta deformación es causada por un esfuerzo [18], entonces matemáticamente nos queda:

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (4)$$

Donde,

σ : Esfuerzo aplicado a la barra (N/m^2).

P: Tensión, Fuerza, Peso, Carga (N).

A: Área transversal de la barra (m^2).

La relación lineal entre el esfuerzo y la deformación unitaria en una barra sometida a tensión o compresión se denomina ley de Hooke [18].

$$\sigma = E * \varepsilon \quad (5)$$

Donde,

E: Modulo de elasticidad del material (N/m^2).

Lo importante de la ley de Hook es que predice el cambio que tendrá la longitud de un objeto en función de la tensión aplicada. De esta manera, si por algún medio se mide la variación de longitud, se puede medir en forma directa la tensión aplicada.

Es así como muchos materiales se comportan elásticamente y linealmente en las primeras etapas de carga (región lineal), ejemplo de esto se ve en el diagrama de esfuerzo deformación unitaria para el acero estructural en tensión (figura A.10), este diagrama grafica el comportamiento de un espécimen de acero o probeta, sometido en laboratorio a esfuerzos gradualmente crecientes hasta la rotura, en tracción o compresión en ausencia de pandeo. Esta prueba se conoce como Prueba de Tensión y permite conocer sus propiedades mecánicas.

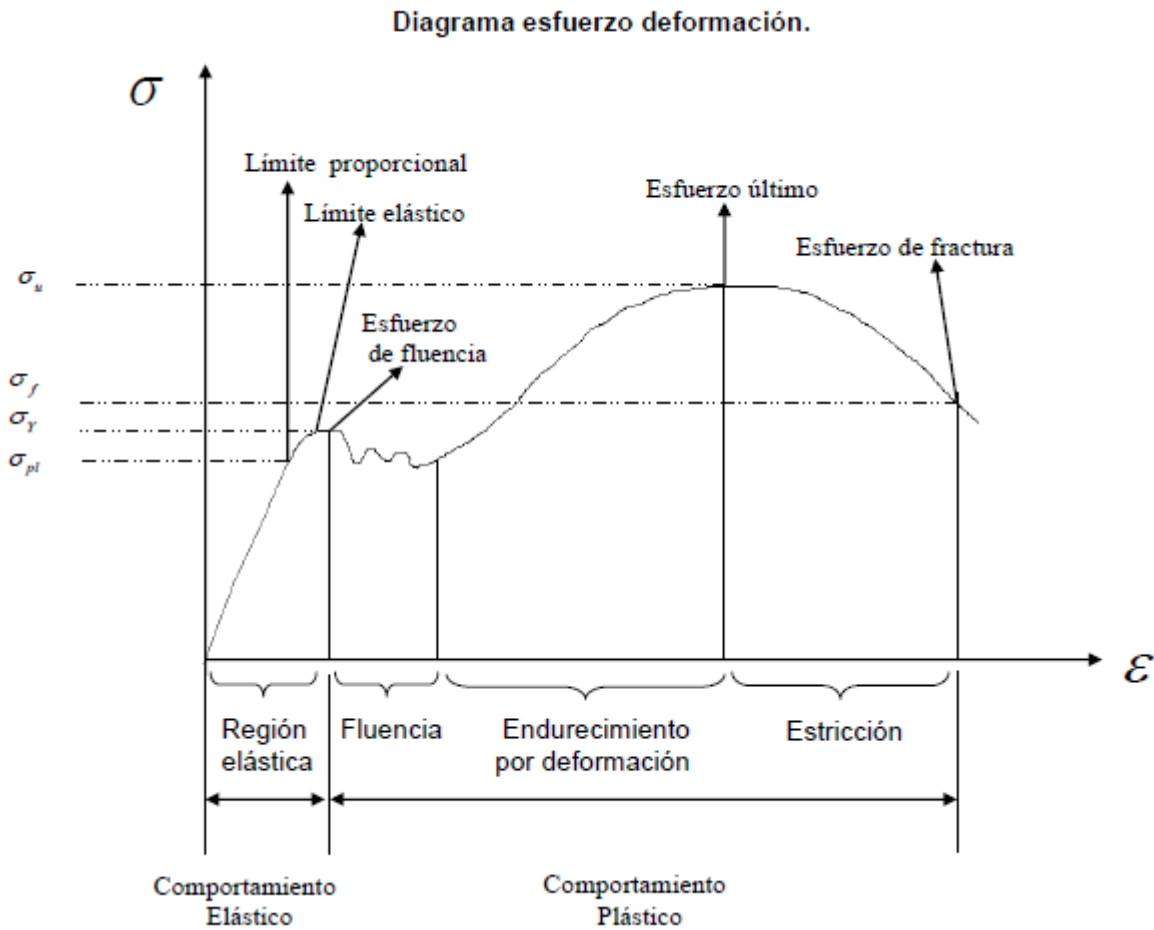


Figura A.10 Diagrama esfuerzo deformación.

Las propiedades mecánicas de los aceros dependen de su composición química, de sus aleaciones, de sus procesos de laminación, forma de enfriamiento, entre otras. Las propiedades comunes en todos los aceros son el Peso específico, Módulo de elasticidad, Módulo de corte y Coeficiente de Poisson ($\nu=0.3$, rango elástico y $\nu=0.5$, rango inelástico).

En la tabla A.3 se tabulan valores típicos obtenidos experimentalmente a partir de los resultados de las pruebas de tensión uniaxial hechos por ASM International (1990, p. 1593) [19].

Tabla A.3 Propiedades mecánicas acero SAE 1030.

Parámetros	Magnitud
Resistencia máxima a la tensión	454 MPa
Módulo de elasticidad	206 GPa
Coeficiente de Poisson	0.3

Con los valores de la tabla A.3 y despejando la deformación unitaria en la ecuación 5, se

tiene:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} = \frac{454 * 10^6}{206 * 10^9} = 2203.8 * 10^{-6}$$

Por lo tanto, la deformación máxima unitaria del material es de 2203.8µstrain, con este dato tenemos lo necesario para obtener la resistencia de derivación requerida, ahora reemplazamos en la ecuación 2:

$$R_C = \frac{350 * 10^6}{2.04 * 4 * 2203.8} - 350 = 19113\Omega$$

Obteniendo una resistencia de derivación de 19113Ω. Ya con todos los datos, se procede a la calibración de la strain gauge en el software SensorConnect. La ventana Shunt Calibration se agregan los datos que tiene relación con los elementos del sensor a utilizar (figura A.11), al agregar la resistencia de calibración automáticamente en el apartado “simulated strain” (deformación simulada) debe darnos la deformación máxima unitaria que hemos calculado anteriormente, una vez teniendo los datos correctos el programa nos entregara información de los valores de Slope y Offset de la calibración.

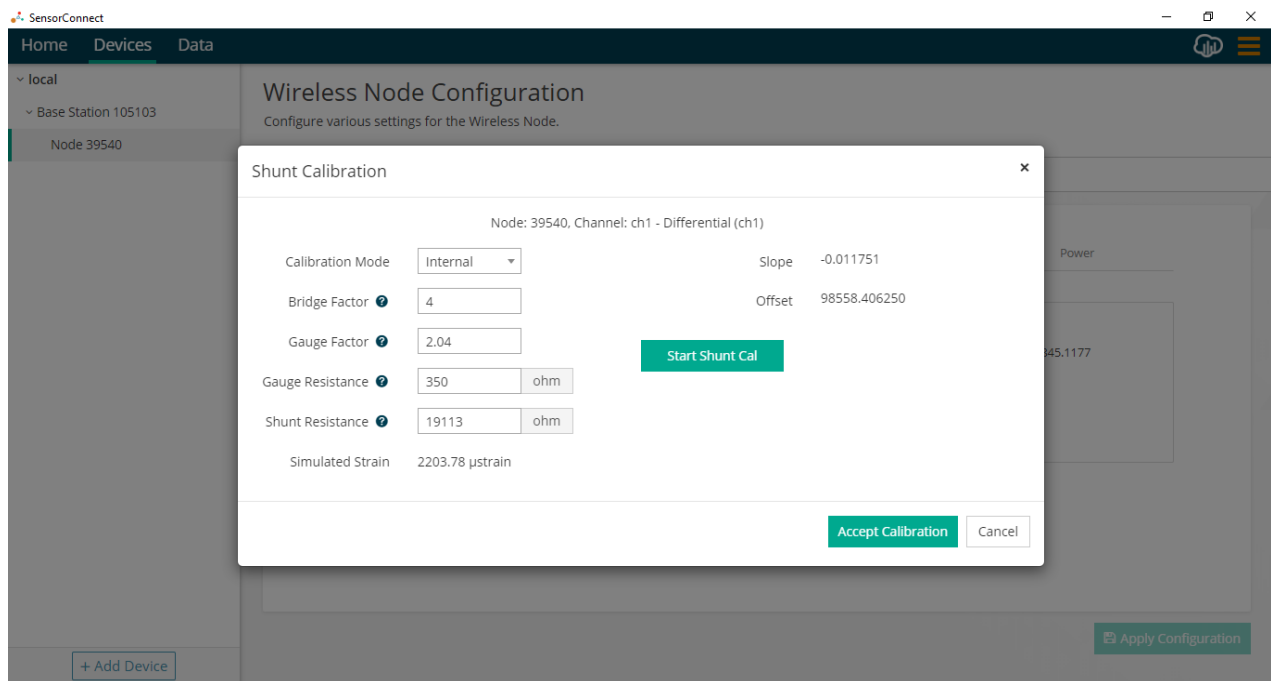


Figura A.11 Ventana Shunt Calibration del software SensorConnect.

Una vez que está todo listo se presiona “Accept Calibration” la cual cerrara la ventana dando

por terminada la calibración de la strain gauge, finalizando así los procedimientos de calibración.

Con la calibración terminada, solo nos queda transmitir los datos y verlos en tiempo real, el software nos da la opción a escoger el tiempo de muestreo y de monitoreo, en nuestro trabajo realizaremos una tasa de muestreo de 1024Hz, siendo la más alta que proporciona SensorConnect y el tiempo en que se va a monitorear se ira ajustando a medida que se vaya requiriendo en cada prueba, una vez configurado estas opciones se está en condición de comenzar las mediciones de deformaciones

A.3. Prueba de sensor

Para la prueba de la strain gauge, que se realizó de forma diferente, debido a que se usa otro sistema de adquisición de datos. La prueba constó en realizar una fuerza a la estructura, generando una tracción en sentido horario y sentido antihorario, obteniendo de esta forma la deformación en el material donde fue adherido el sensor, en la figura A.12 se observa el resultado de la prueba, dándonos deformaciones positivas al realizar una tensión de tracción en sentido horario y una deformación negativa en sentido antihorario, esta medición ya viene filtrada por el mismo software.

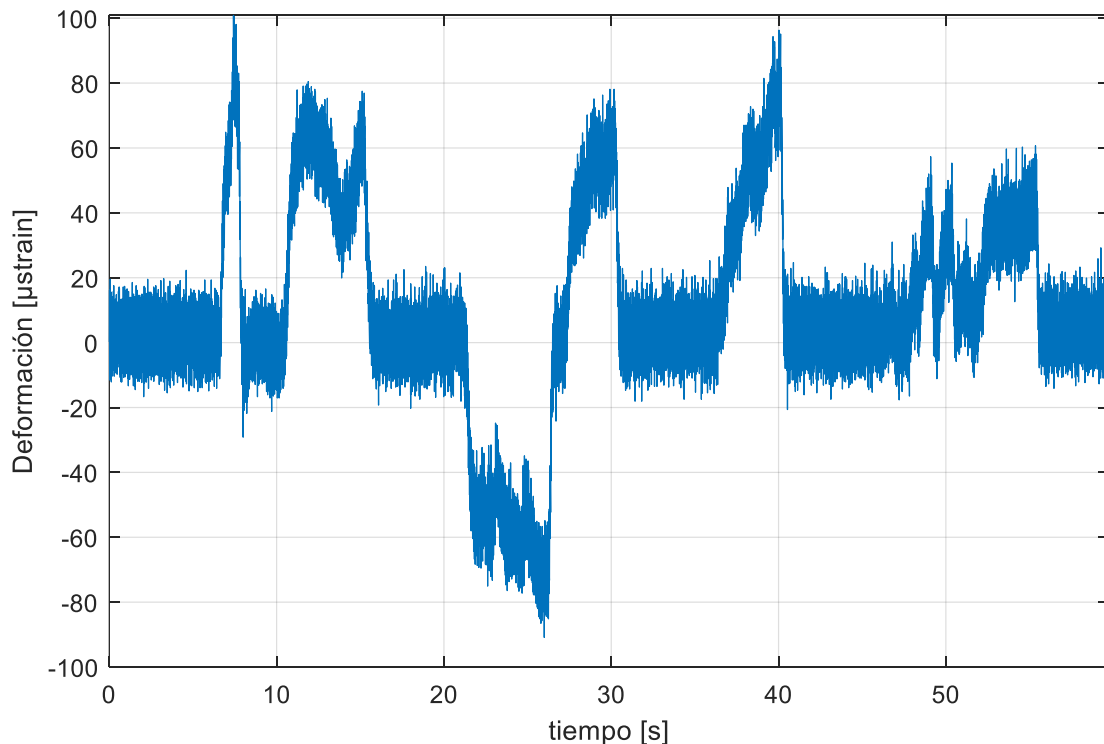


Figura A.12 Prueba Strain gauge, deformación del material.

A.4. Configuración SensorConnect

Hardware

Calibration

Sampling

Power

Excitation Voltage ⓘ

2.5 V

Input Range ⓘ

Channel(s)	Input Range
Differential (ch1)	±19.532 mV
Differential (ch2)	±19.532 mV
Differential (ch3)	±19.532 mV

Low Pass Filter ⓘ

Channel(s)	Filter Cutoff
Differential (ch1-ch3)	4,416 Hz

Figura A.13 Menú de configuración de hardware.

Hardware

Calibration

Sampling

Power

Lost Beacon Timeout ⓘ

On

2

minute(s)

Diagnostic Info Interval ⓘ

On

30

second(s)

Storage Limit Mode ⓘ

Overwrite

Sensor Warmup Delay ⓘ

600

μ sec(s)

☐ Sensor Always On

Figura A.14 Menú de configuración de muestreo.

Hardware

Calibration

Sampling

Power

Default Operation Mode ⓘ

Idle

User Inactivity Timeout ⓘ

On

7200

second(s)

Check Radio Interval ⓘ

10

second(s)

Transmit Power ⓘ

10 dBm

Figura A.15 Menú de energía de configuración de nodo.

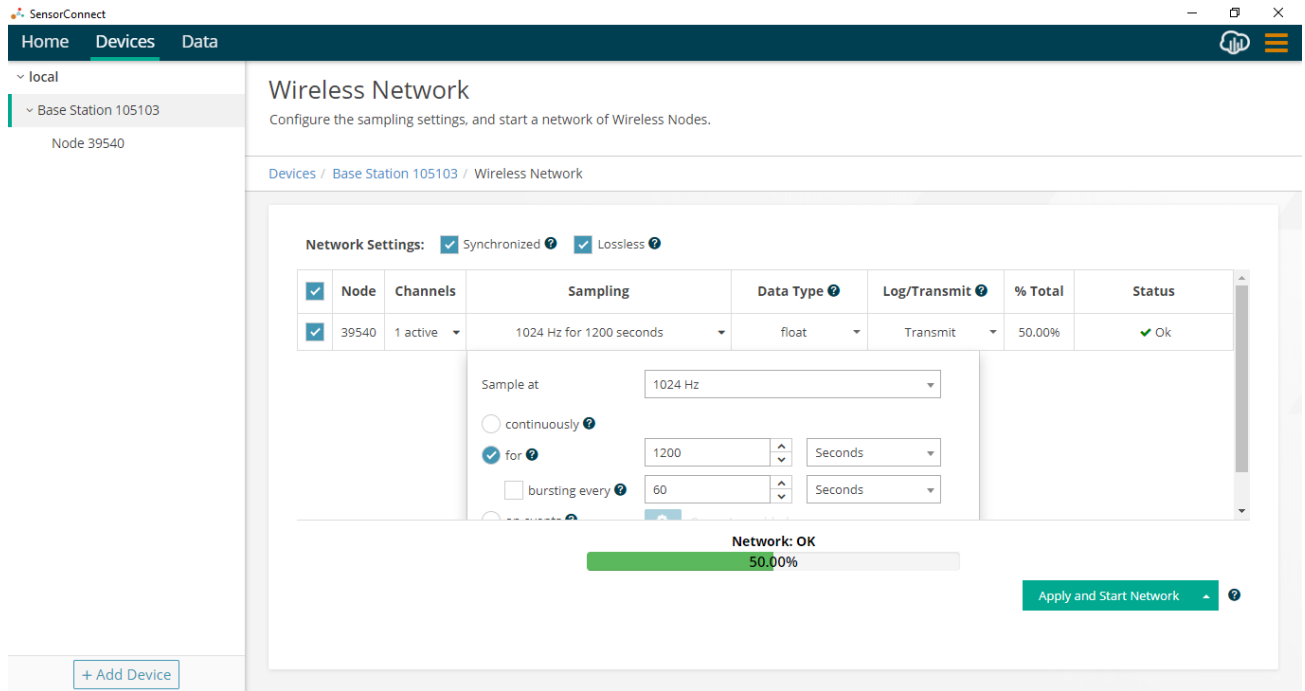


Figura A.16 Muestreo de un solo nodo.

Anexo B. Diagrama de Bode

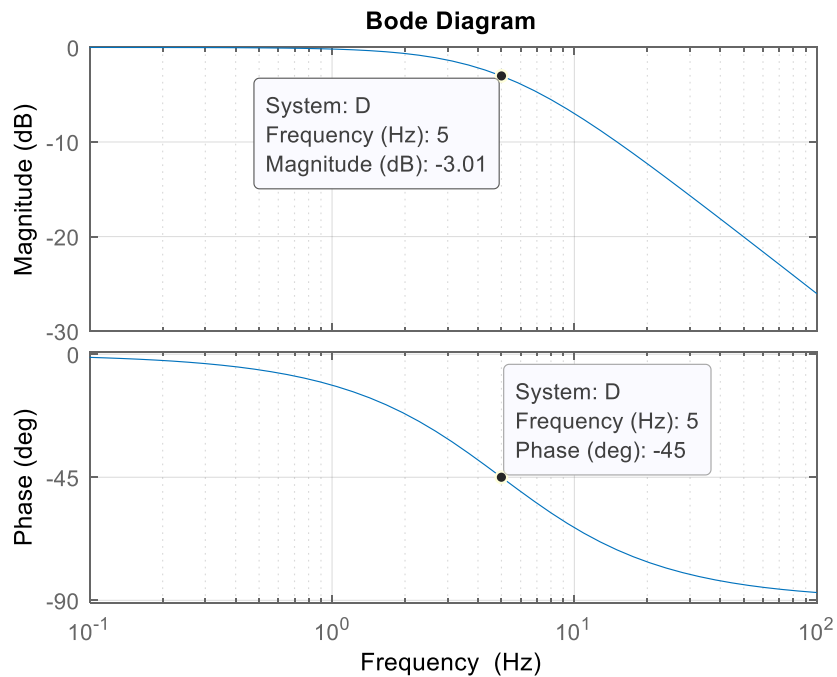


Figura B.1 Diagrama de bode filtro pasa bajo con frecuencia de corte 5Hz.

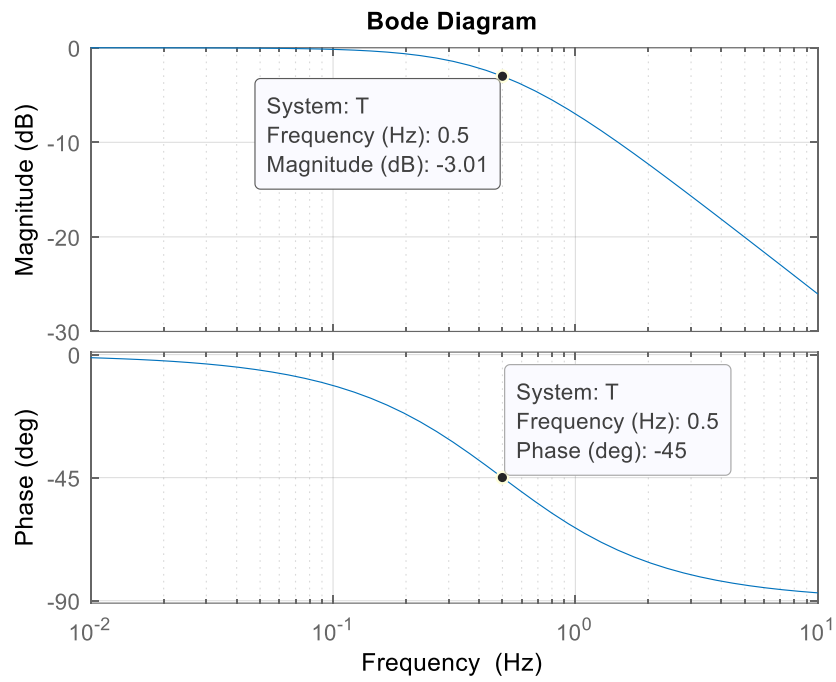


Figura B.2 Diagrama de bode filtro pasa bajo con frecuencia de corte 0.5Hz.

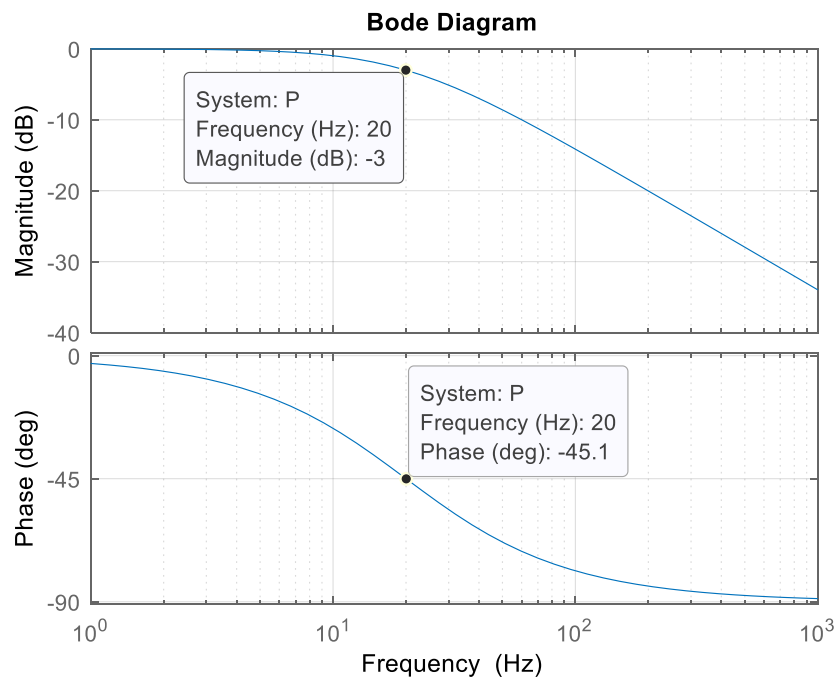


Figura B.3 Diagrama de bode filtro pasa bajo con frecuencia de corte 20Hz.

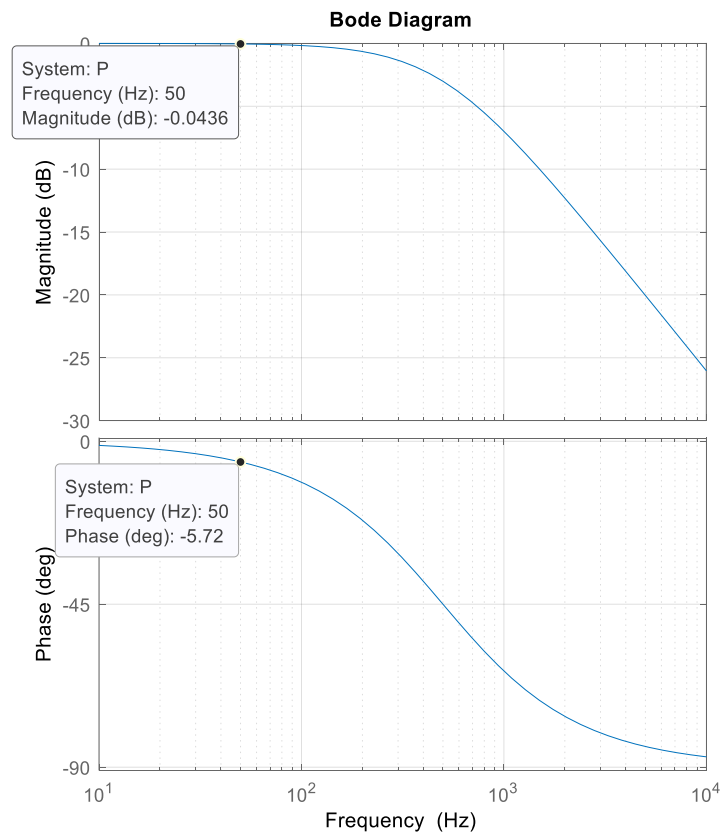


Figura B.4 Diagrama de bode filtro pasa bajo con frecuencia de corte 500Hz.

Anexo C. Modelos de estimación implementados en Simulink

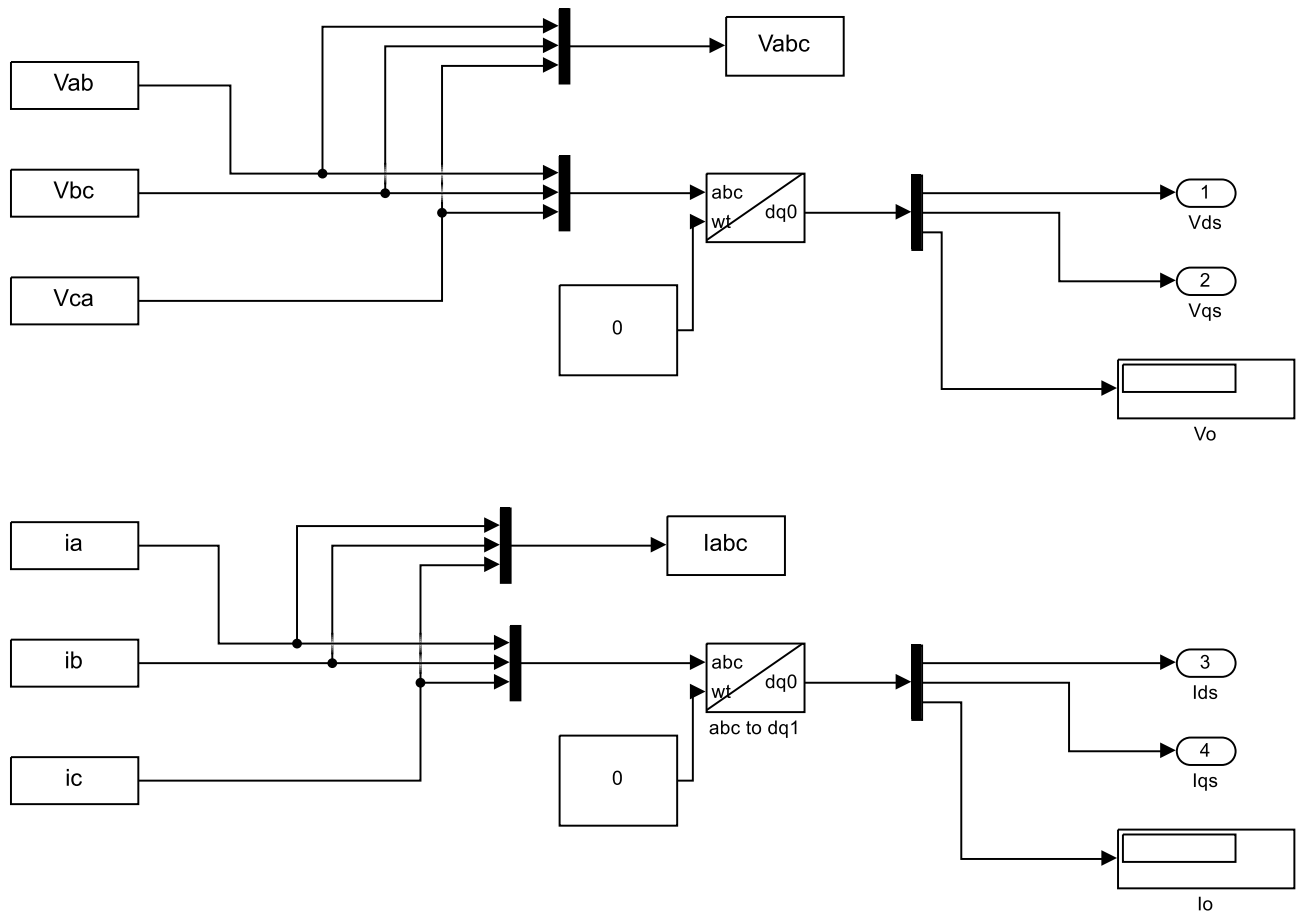


Figura C.1 Transformación de coordenadas abc a dq0.

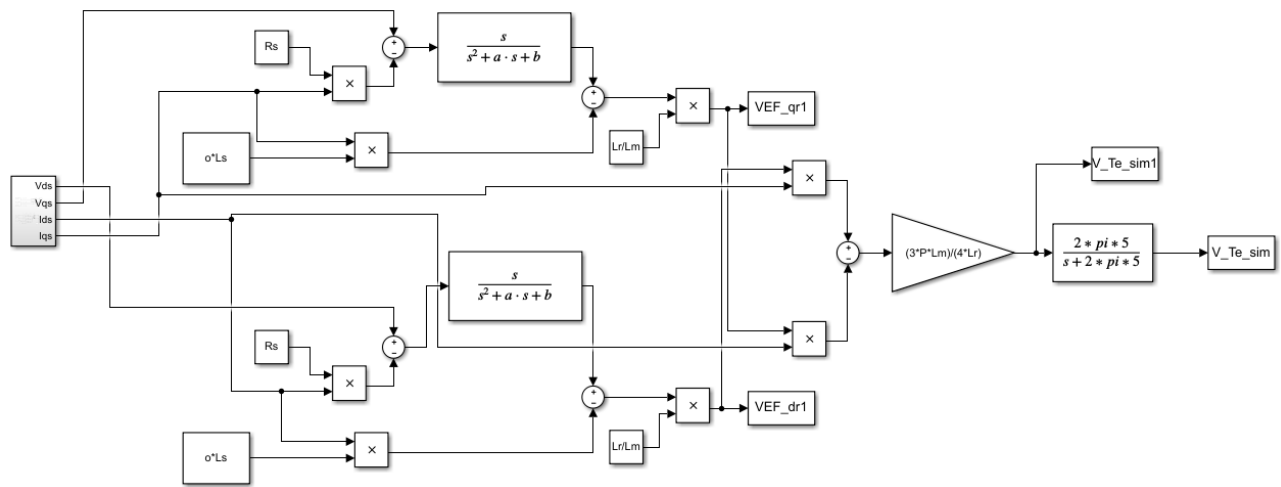


Figura C.2 Modelo de Voltaje implementado en Simulink.

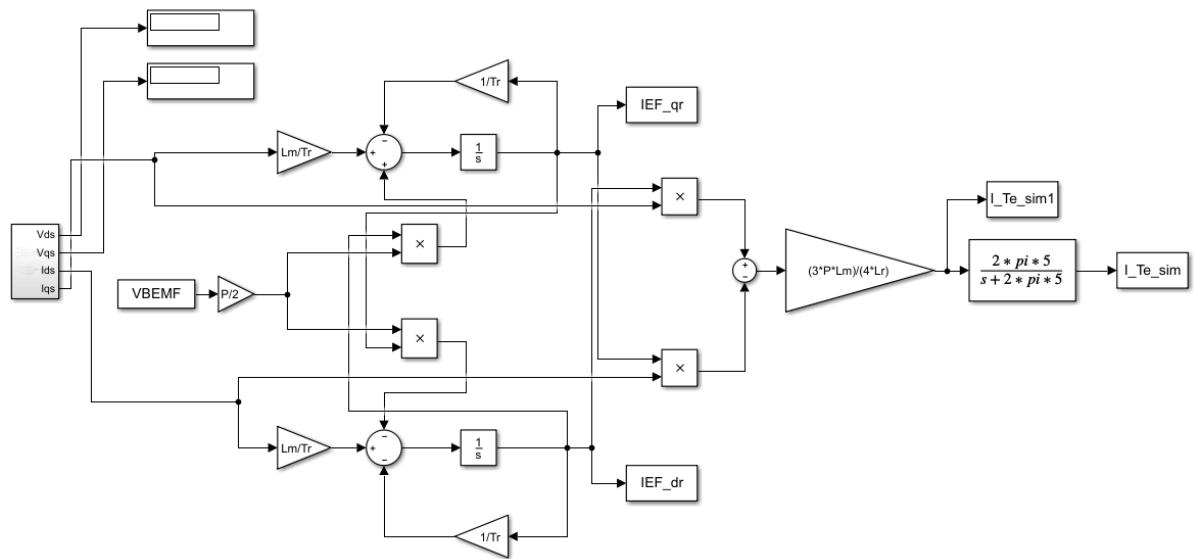


Figura C.3 Modelo de corriente implementado en Simulink.

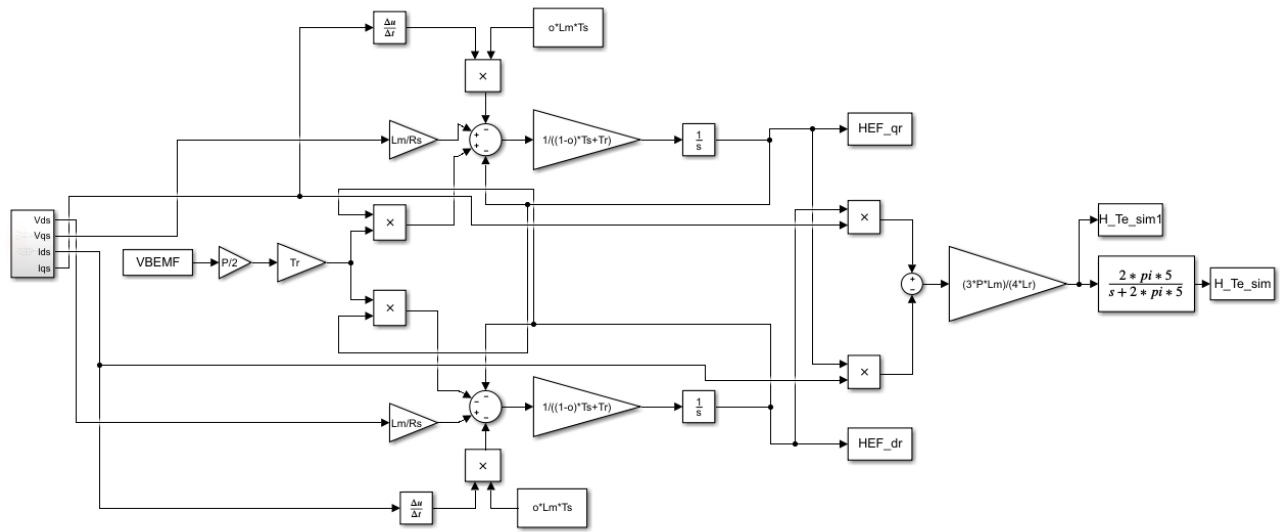


Figura C.4 Modelo híbrido implementado en Simulink.

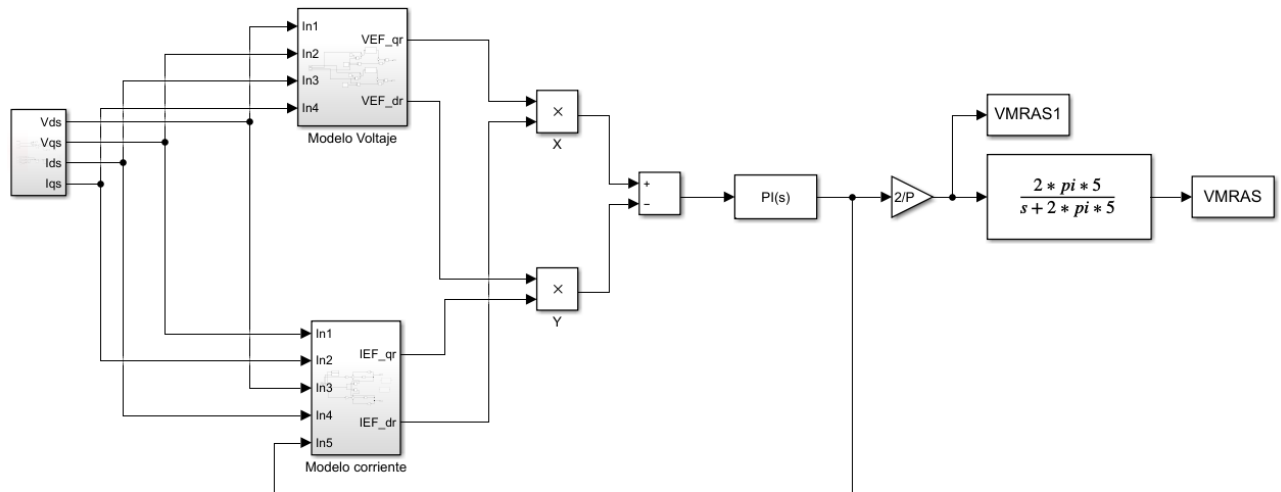


Figura C.5 MRAS implementado en Simulink.

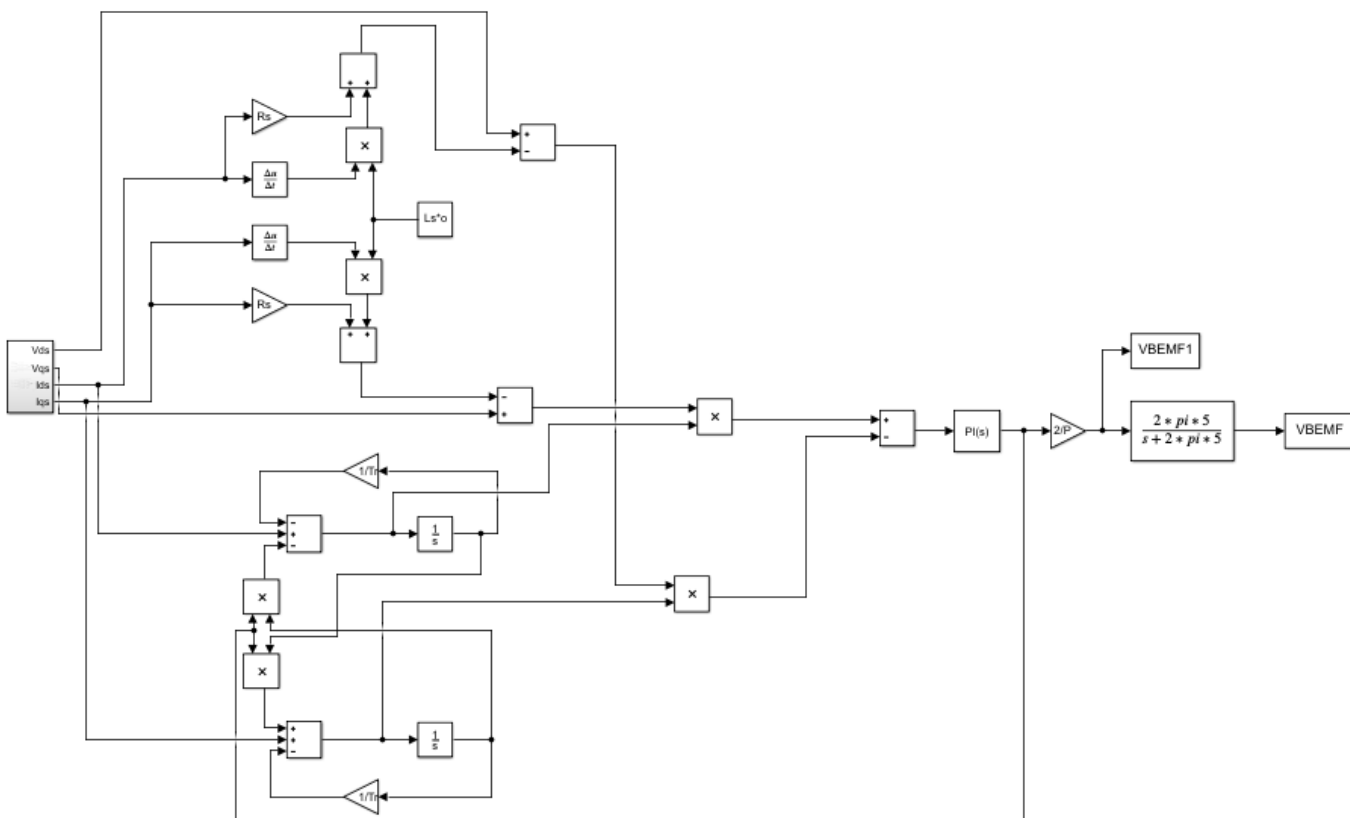


Figura C.6 BEMF-MRAS implementado en Simulink.

Anexo D. Clasificación de muestras

Descripción	Resistencia a la Compresión (MPa)
Extremadamente blanda	< 1
Muy blanda	1-5
Blanda	5-25
Moderadamente blanda	25-50
Dura	50-100
Muy dura	100-250
Extremadamente dura	250

Figura D.1 Clasificación de la roca en base a la resistencia a la compresión según la ISRM.

Grado	Resistencia específica, f'_c
	MPa
G05	5
G10	10
G15	15
G17	17
G20	20
G25	25
G30	30
G35	35
G40	40
G45	45
G50	50
G55	55
G60	60
NOTA Pueden existir grados mayores a los indicados en la presente tabla.	

Figura D.2 Clasificación de los hormigones por resistencia a compresión.

Anexo E. Gráficos de interés pruebas preliminares

E.1. Voltaje y Corriente

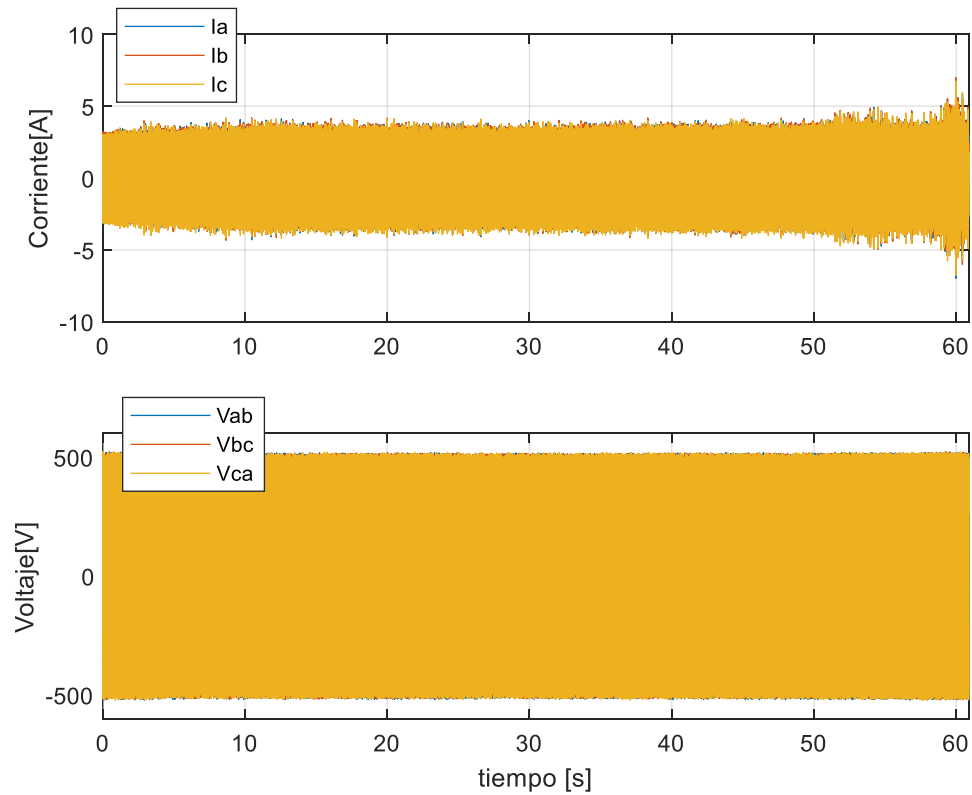


Figura E.1 Voltaje y corriente prueba Roca Punta de Parra.

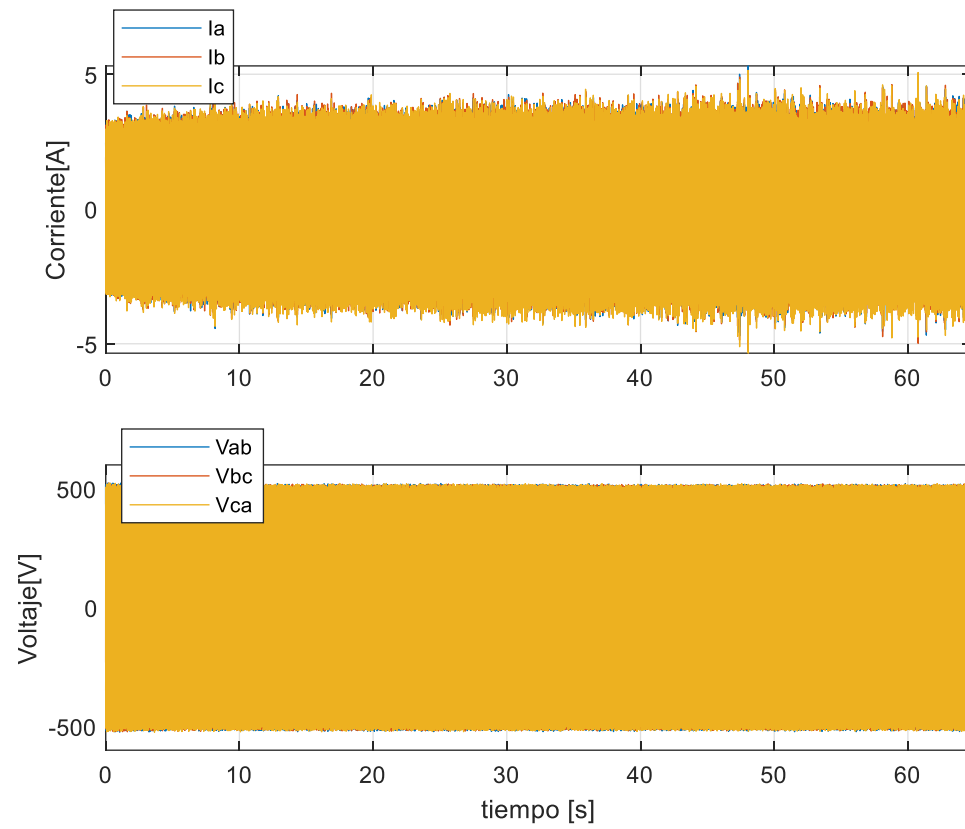


Figura E.2 Voltaje y corriente prueba roca Lonco.

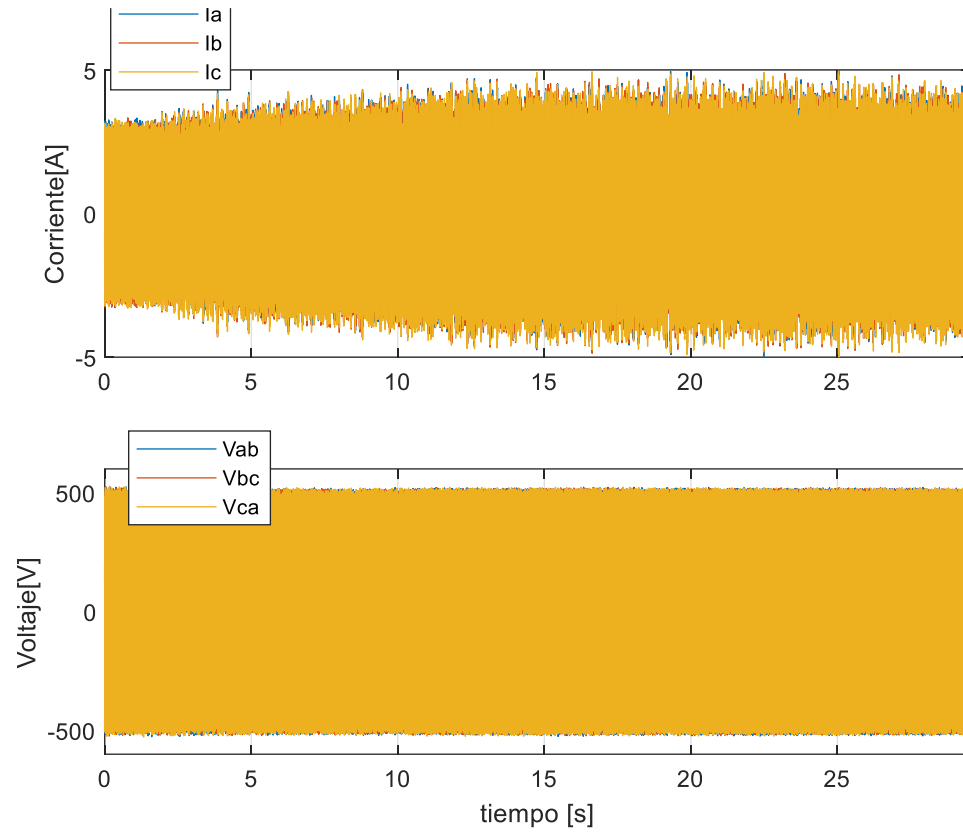


Figura E.3 Voltaje y corriente prueba hormigón blando.

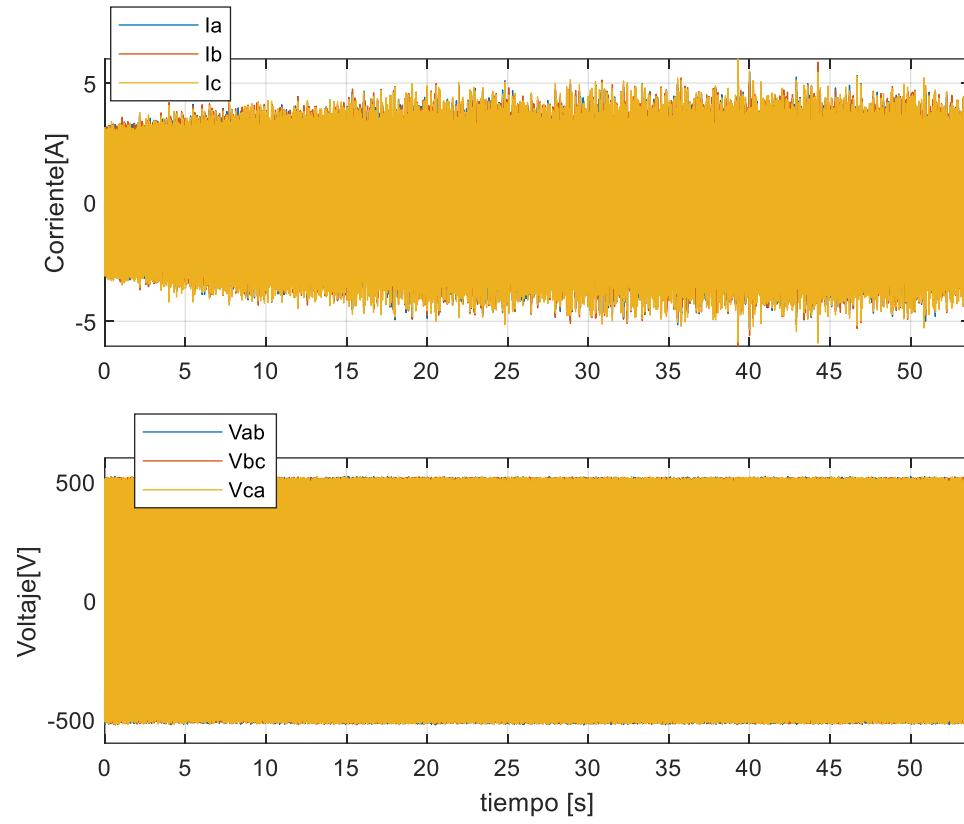


Figura E.4 Voltaje y corriente prueba hormigón gravilla.

E.2. Deformación angular

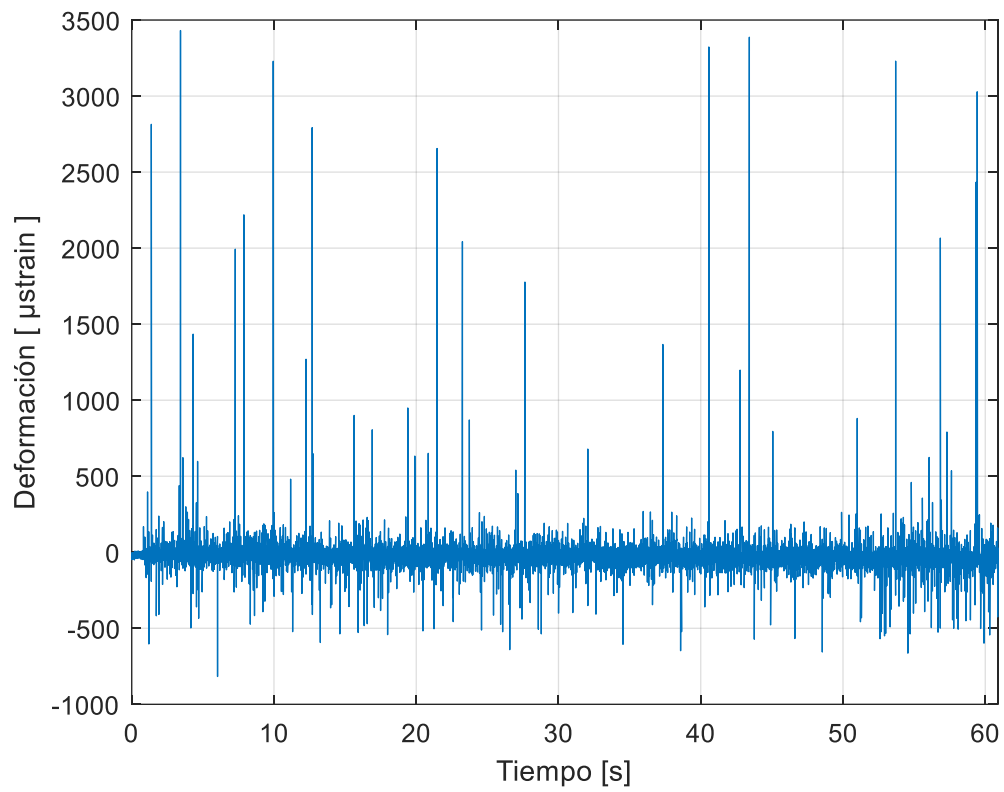


Figura E.5 Monitoreo de deformación angular prueba roca P.P.

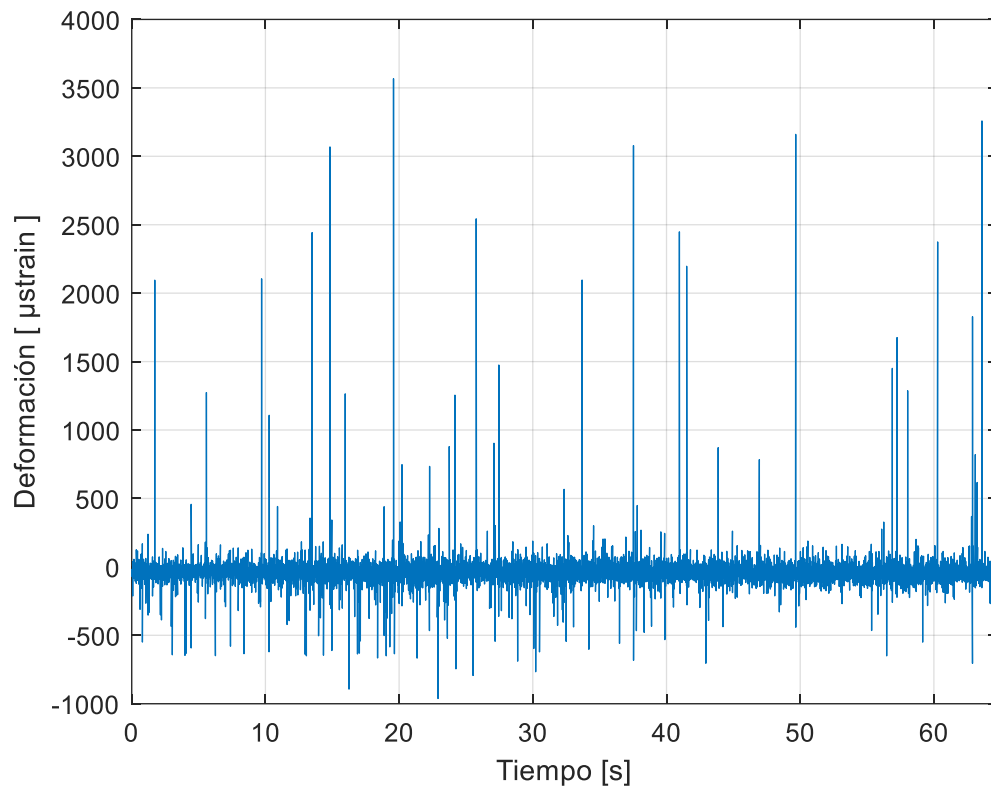


Figura E.6 Monitoreo de deformación angular prueba roca Lonco.

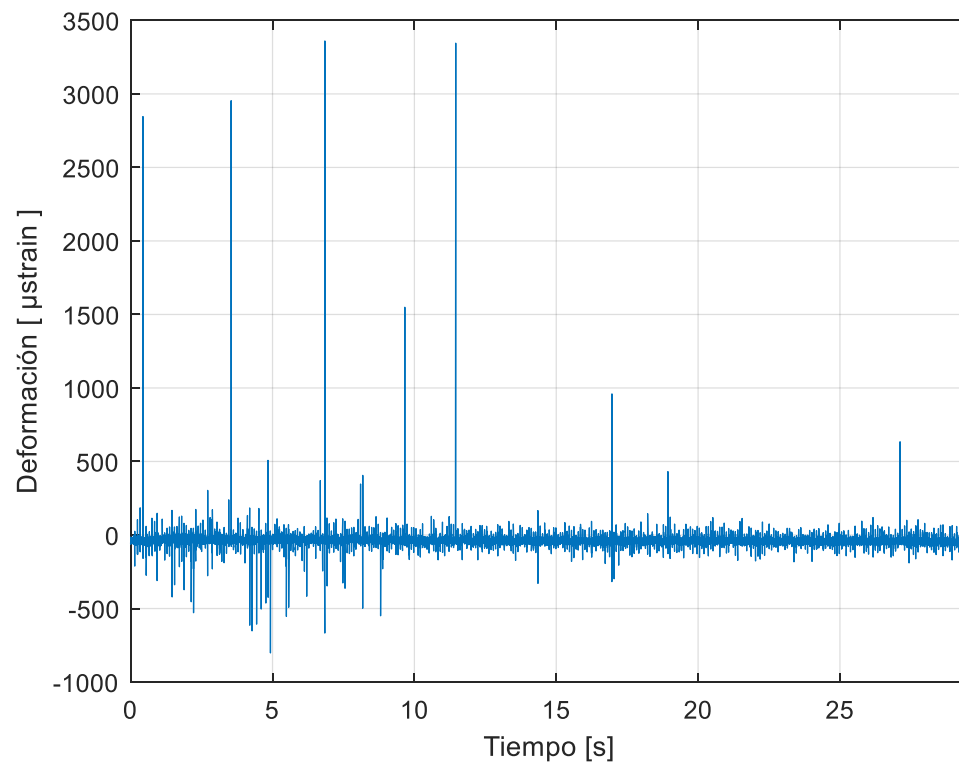


Figura E.7 Monitoreo de deformación angular prueba hormigón blando.

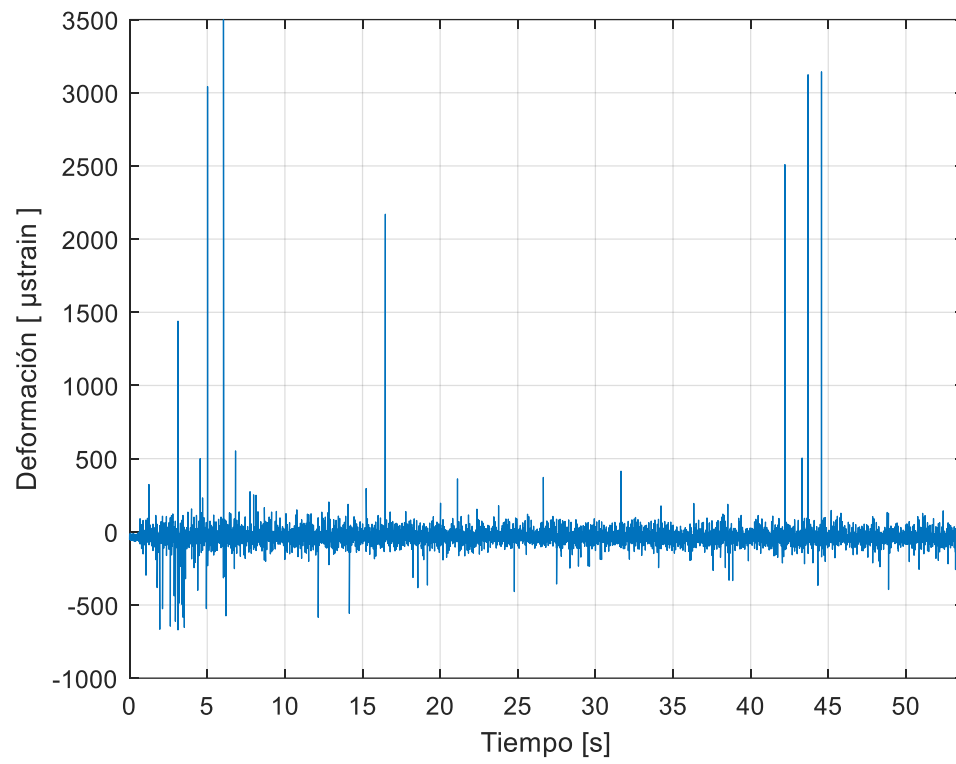


Figura E.8 Monitoreo de deformación angular prueba hormigón gravilla.