

Universidad Nacional de Ingeniería

Facultad de Ingeniería Mecánica



TESIS

Diseño de un dispositivo electrónico Kallpa para la medición de la energía de caída de martillo en los ensayos de penetración estándar usando procesamiento de señales

Para obtener el Título Profesional de Ingeniero Mecatrónico

Elaborado por

Roberto Freddy Raucana Sulca

 [0000-0002-9803-6794](https://orcid.org/0000-0002-9803-6794)

Asesor

Mag. Ing. José Fortunato Oviden Martínez

 [0000-0003-2643-327X](https://orcid.org/0000-0003-2643-327X)

LIMA - PERÚ

2024

Citar/How to cite	Raucana Sulca [1]
Referencia/Reference	[1] R. F. Raucana Sulca, "Diseño de un dispositivo electrónico Kallpa para la medición de la energía de caída de martillo en los ensayos de penetración estándar usando procesamiento de señales". [Tesis de pregrado]. Lima (Perú): Universidad Nacional de Ingeniería. 2024.
Estilo/Style: IEEE (2020)	

Citar/How to cite	(Raucana, 2024)
Referencia/Reference	Raucana Sulca, R. F. (2024). Diseño de un dispositivo electrónico Kallpa para la medición de la energía de caída de martillo en los ensayos de penetración estándar usando procesamiento de señales. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Ingeniería]. Lima, Perú.
Estilo/Style: APA (7ma ed.)	

Dedicatoria

A mis amados padres

Narda y Freddy por su confianza,

A mis hermanas

Camila y Valentina.

Agradecimientos

Antes que nada, es imposible expresar mi gratitud sin mencionar a mis padres, quienes han estado a mi lado desde mi etapa de preparatoria hasta mi graduación, y siguen brindándome su apoyo de manera inquebrantable. Su aliento y respaldo constante han sido el motor que me ha impulsado a perseverar, incluso en los momentos más desafiantes. Además, no puedo dejar de agradecer a mis hermanas, quienes han sido mi fuente de distracción en medio de la intensa preparación académica y, al mismo tiempo, un recordatorio constante de que la familia es el núcleo que realmente importa en la vida.

En lo que respecta al Centro de Investigación en Transformación Digital en Ingeniería (CITDI), estoy agradecido por la oportunidad de aprender y trabajar en un entorno tan enriquecedor y desafiante. Agradezco sinceramente la confianza que depositaron en mí, al darme la oportunidad de enfrentar desafíos reales en el campo de la ingeniería.

Resumen

El ensayo de penetración estándar SPT es ampliamente reconocido a nivel global para determinar las propiedades del suelo. En este ensayo, se cuenta el número de golpes necesarios para introducir una varilla de manera perpendicular al suelo de estudio. Esto se logra dejando caer una masa desde un martillo estándar sobre la varilla. A pesar de su utilidad, los ensayos SPT requieren correcciones precisas para garantizar su exactitud. Uno de los ajustes necesarios implica la corrección por energía, que se realiza a través de un analizador de energía. A nivel mundial, existen pocos analizadores de energía, siendo el analizador SPT el más destacado; sin embargo, este analizador tiene un costo muy elevado. Este contexto ha dado lugar a la necesidad de desarrollar un analizador de energía de bajo costo en Perú.

Para abordar este desafío, se siguió la norma ASTM D4633-10, que establece los requisitos mínimos de un analizador de energía, y se tomó como referencia el funcionamiento del analizador SPT. Como resultado, se diseñó y construyó el dispositivo Kallpa, capaz de calcular la energía de caída del martillo mediante sensores de aceleración y deformación.

Asimismo, se desarrolló el software Kallpa Processor para configurar el dispositivo, procesar y almacenar la información del ensayo SPT. En comparaciones realizadas entre el analizador Kallpa y el analizador SPT de la empresa Pile Dynamics, se observaron resultados altamente similares. En consecuencia, se puede concluir que el dispositivo Kallpa es eficaz en el cálculo de la energía en los ensayos SPT.

Palabras clave – Ensayo SPT, corrección por energía, analizador Kallpa, norma ASTM D4633-10.

Abstract

The Standard Penetration Test (SPT) is widely recognized globally for determining soil properties. In this test, the number of blows required to drive a rod perpendicular to the soil under study is counted. This is achieved by dropping a mass from a standard hammer onto the rod. Despite its utility, SPT tests require precise corrections to ensure accuracy. One necessary adjustment involves energy correction, which is carried out through an energy analyzer. Globally, there are few energy analyzers, with the SPT analyzer being the most prominent; however, this analyzer has a very high cost. This context has led to the need to develop a low-cost energy analyzer in Peru.

To address this challenge, the ASTM D4633-10 standard was followed, which establishes the minimum requirements for an energy analyzer, and the operation of the SPT analyzer was taken as a reference. As a result, the Kallpa device was designed and built, capable of calculating the hammer drop energy using acceleration and deformation sensors.

Furthermore, the Kallpa Processor software was developed to configure the device, process, and store SPT test information. Comparisons between the Kallpa analyzer and the Pile Dynamics SPT analyzer showed highly similar results. Consequently, it can be concluded that the Kallpa device is effective in calculating energy in SPT tests.

Keywords – SPT test, energy correction, Kallpa analyzer, ASTM D4633-10 standard.

Tabla de Contenido

	Pág.
Resumen	v
Abstract	vi
Introducción	xvi
Capítulo 1. Parte introductoria del trabajo	1
1.1 Generalidades	1
1.2 Descripción del Problema de Investigación	1
1.3 Objetivo del Estudio.....	2
1.3.1 Objetivo General	2
1.3.2 Objetivos Específicos	2
1.4 Hipótesis	3
1.4.1 Hipótesis General.....	3
1.4.2 Hipótesis Específicas	3
1.5 Antecedentes investigativos	4
1.6 Metodología de investigación	12
1.6.1 Tipos y diseño de la investigación	12
1.6.2 Unidad de Análisis	13
1.6.3 Matriz de Consistencia	14
Capítulo 2. Marcos teórico y conceptual	16
2.1 Marco teórico.....	16
2.1.1 Fundamentos de los ensayos de penetración estándar (SPT).....	16
2.1.2 Equipamiento y Herramientas	16
2.1.3 Procedimiento del Ensayo.....	18
2.1.4 Medición de la energía de caída de martillo en SPT	19
2.1.5 Sensores piezoresistivos.....	21
2.1.6 Procesamiento de señales	22

2.1.7	Procesamiento digital de señales	24
2.2	Marco Conceptual	27
2.2.1	Ensayo SPT	27
2.2.2	Medición de Energía SPT	27
2.2.3	Energía Relativa.....	27
2.2.4	Energía Real	27
2.2.5	Energía Teórica	27
2.2.6	Dispositivo Analizador de Energía	28
2.2.7	Método FV.....	28
2.2.8	Método F2	28
2.2.9	Strain Gauge	28
2.2.10	Acelerómetros	28
2.2.11	Sensores Piezoresistivos	29
2.2.12	Calibración por Comparación	29
2.2.13	Corrección de Señales	29
2.2.14	Filtrado de Señales	29
2.2.15	Filtro Pasa Baja	29
2.2.16	Dispositivo Kallpa	29
Capítulo 3. Desarrollo del trabajo de investigación		30
3.1	Diseño electrónico del dispositivo Kallpa	30
3.1.1	Productos comerciales	30
3.1.2	Requisitos del diseño electrónico	35
3.1.3	Selección de componentes electrónicos.....	36
3.1.4	Diseño de circuitos	42
3.1.5	Estructura de protección.....	47
3.1.6	Integración de los componentes	48
3.2	Desarrollo del software Kallpa Processor	49

3.2.1	Desarrollo del código en el dispositivo Kallpa	49
3.2.2	Software Kallpa Processor	60
3.2.3	Desarrollo del procesamiento de señales	78
3.3	Calibración del dispositivo Kallpa	93
3.3.1	Procedimiento de calibración.....	93
3.3.2	Recopilación de datos	94
3.3.3	Análisis de los datos.....	98
3.4	Desempeño del dispositivo Kallpa	101
3.4.1	Recolección de datos	102
3.4.2	Resultados de la prueba.....	103
3.4.3	Costos del dispositivo Kallpa	105
Capítulo 4. Análisis y discusión de resultados		107
Conclusiones		113
Recomendaciones		114
Referencias bibliográficas.....		116
Anexos		121

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1 <i>Matriz de Consistencia</i>	14
Tabla 2 <i>Cálculo de la ganancia para el acelerómetro</i>	55
Tabla 3 <i>Cálculo de la ganancia para el deformímetro</i>	56
Tabla 4 <i>Offset de los sensores en cuentas</i>	80
Tabla 5 <i>Resumen de resultados 1 m-1.45 m</i>	103
Tabla 6 <i>Resumen de resultados 2 m-2.45 m</i>	103
Tabla 7 <i>Resumen de resultados 3 m-3.45 m</i>	103
Tabla 8 <i>Resumen de resultados 4 m-4.45 m</i>	104
Tabla 9 <i>Resumen de resultados 5 m-5.45 m</i>	104
Tabla 10 <i>Resumen de resultados 6 m-6.45 m</i>	104
Tabla 11 <i>Resumen de resultados 7 m-7.45 m</i>	104
Tabla 12 <i>Resumen de resultados 8 m-8.45 m</i>	104
Tabla 13 <i>Resumen de resultados 9 m-9.45 m</i>	105
Tabla 14 <i>Resumen de resultados 10 m-10.45 m</i>	105
Tabla 15 <i>Resumen de resultados 11 m-11.45 m</i>	105
Tabla 16 <i>Tabla de costos del dispositivo Kallpa</i>	106

Lista de figuras

	Pág.
Figura 1 <i>SPT Analyzer</i>	4
Figura 2 <i>Valores medidos de la relación de energía</i>	5
Figura 3 <i>Datos de eficiencia energética de los martillos SPT automáticos en el Reino de Arabia Saudi</i>	6
Figura 4 <i>Dibujo esquemático de un penetrómetro de cono instrumentado</i>	7
Figura 5 <i>SPT HEMA</i>	8
Figura 6 <i>Pile driving analyzer L-HPT</i>	9
Figura 7 <i>Diagrama de flujo de análisis de datos para ensayos dinámicas</i>	10
Figura 8 <i>Corrección triangular</i>	11
Figura 9 <i>Componentes de un ensayo SPT</i>	17
Figura 10 <i>Procedimiento del ensayo SPT</i>	18
Figura 11 <i>Barra instrumentada con sensores de aceleración y deformación</i>	19
Figura 12 <i>Dibujo esquemático de un puente completo</i>	21
Figura 13 <i>Señal analógica</i>	23
Figura 14 <i>Señal muestreada</i>	23
Figura 15 <i>Señal cuantizada</i>	24
Figura 16 <i>Señal filtrada con filtros pasa baja</i>	25
Figura 17 <i>Señal filtrada con ObsPy</i>	26
Figura 18 <i>Analizador SPT en funcionamiento</i>	30
Figura 19 <i>Componentes del analizador L-HPT</i>	34
Figura 20 <i>ADC MCP3564</i>	37
Figura 21 <i>Raspberry Pi 4 B+</i>	38
Figura 22 <i>Batería 12V</i>	39
Figura 23 <i>Diagrama de conexión del LM2940</i>	42
Figura 24 <i>Diagrama de conexión del LM1117</i>	43

Figura 25 <i>Diagrama de conexión del MCP1825S</i>	43
Figura 26 <i>Diagrama de conexión del MCP1754</i>	43
Figura 27 <i>Diagrama de conexión del BD90FD0</i>	43
Figura 28 <i>Diagrama de conexión del MIC29300</i>	44
Figura 29 <i>Diagrama de conexión del LT3045-7.5V</i>	44
Figura 30 <i>Diagrama de conexión del LT3045-6.4V</i>	44
Figura 31 <i>Diagrama de conexión del LT6657-1.2V</i>	44
Figura 32 <i>Diagrama de conexión del filtro pasa baja</i>	45
Figura 33 <i>Vista superior de la PCB</i>	45
Figura 34 <i>Vista inferior de la PCB</i>	45
Figura 35 <i>Placa PCB fabricada</i>	46
Figura 36 <i>Placa de adquisición de señales</i>	46
Figura 37 <i>Caja de protección AN-1321-AB</i>	47
Figura 38 <i>Componentes del dispositivo Kallpa</i>	48
Figura 39 <i>Dispositivo Kallpa</i>	48
Figura 40 <i>Registro CONFIG0</i>	51
Figura 41 <i>SINAD vs. AMCLK – BOOST 2x</i>	52
Figura 42 <i>Registro CONFIG1</i>	53
Figura 43 <i>Relación entre el sobre muestreo y la conversión de datos</i>	54
Figura 44 <i>SINAD vs. AMCLK – BOOST 1x</i>	55
Figura 45 <i>Registro CONFIG2</i>	56
Figura 46 <i>Selección del formato de salida del ADC</i>	57
Figura 47 <i>Registro CONFIG3</i>	58
Figura 48 <i>Registro MUX</i>	59
Figura 49 <i>Diagrama de flujo detección de impactos</i>	60
Figura 50 <i>Interfaz de inicio por defecto</i>	61
Figura 51 <i>Interfaz de inicio en modo oscuro</i>	61

Figura 52 Selección de archivo “.ct”	62
Figura 53 Visualización de impactos	63
Figura 54 Ventana Join Files	64
Figura 55 Ventana Collect Wire	64
Figura 56 Interfaz inicial Collect Wire	65
Figura 57 Detección de un sensor de aceleración y un sensor de deformación	66
Figura 58 Colocación de rango de profundidades, LE y LP.....	67
Figura 59 Información y/o cambio de datos del área y módulo de elasticidad de la varilla	67
Figura 60 Información y/o cambio de datos de la masa del martillo y altura de caída libre	68
Figura 61 Parámetros de muestreo y ruta de guardado	69
Figura 62 Pantalla de espera para inicio del ensayo	69
Figura 63 Botón play y stop para iniciar y detener el ensayo, respectivamente.....	70
Figura 64 Mensaje de alerta o confirmación para detener el recibimiento de datos	70
Figura 65 Pantalla de visualización dividida en 3 secciones	70
Figura 66 Menú lateral izquierdo junto a la ventana del significado de magnitudes	71
Figura 67 Sección central	72
Figura 68 Botón “DEL”	72
Figura 69 Botón “>” y “<”	73
Figura 70 Botón “>>” y “<<”	73
Figura 71 Botón “SYNC”	74
Figura 72 Botón “FIRST” y “LAST”	74
Figura 73 Botón “EXPORT”	75
Figura 74 Parámetros de exportación	75
Figura 75 PDF exportado parte superior	77
Figura 76 PDF exportado parte inferior	78

Figura 77 <i>Formato de datos por impacto</i>	79
Figura 78 <i>Función cuentas2magnitud</i>	80
Figura 79 <i>Datos de un impacto del analizador SPT</i>	81
Figura 80 <i>Fórmula de la fuerza en Python</i>	82
Figura 81 <i>Error de la fórmula fuerza</i>	83
Figura 82 <i>Velocidad sin ajuste triangular</i>	84
Figura 83 <i>Velocidad con ajuste triangular</i>	84
Figura 84 <i>Fórmula de velocidad método Obspy</i>	85
Figura 85 <i>Error de la fórmula velocidad Obspy</i>	86
Figura 86 <i>Velocidad obtenida por el método Obspy comparada con la velocidad obtenida del analizador SPT</i>	86
Figura 87 <i>Velocidad obtenida por el método Obspy comparada con la velocidad obtenida del analizador SPT</i>	87
Figura 88 <i>Función “velocidad_nuevo_metodo”</i>	88
Figura 89 <i>Función “corrección_triangular”</i>	89
Figura 90 <i>Error de velocidad a $g=9.81$ m/s²</i>	90
Figura 91 <i>Error de velocidad a $g=9.80665$ m/s²</i>	90
Figura 92 <i>Fórmula del desplazamiento</i>	91
Figura 93 <i>Error en la fórmula de desplazamiento</i>	91
Figura 94 <i>Fórmula de la energía</i>	92
Figura 95 <i>Error en la fórmula de la energía</i>	92
Figura 96 <i>Ensayo con el analizador SPY y el dispositivo Kallpa</i>	94
Figura 97 <i>Interfaz del software PDA-S</i>	94
Figura 98 <i>Código para extraer los datos del software PDA-S</i>	96
Figura 99 <i>Data de impactos en un Excel</i>	97
Figura 100 <i>Código para extraer las hojas de un Excel</i>	97
Figura 101 <i>Hojas csv extraídas del Excel</i>	98

Figura 102 Archivo “.ct”	98
Figura 103 Calibración del acelerómetro K16670	100
Figura 104 Calibración del deformímetro 590AW1	100
Figura 105 Calibración del acelerómetro K13548	101
Figura 106 Calibración del deformímetro 590AW2	101
Figura 107 Dispositivo Kallpa en la Universidad de Ica	102
Figura 108 Comparativa de volumen de analizadores de energía frente al dispositivo Kallpa	107
Figura 109 Prototipos de PCB elaborados durante el desarrollo del producto final	108
Figura 110 Error absoluto medio de la energía - Método Obspy y nuevo método	109
Figura 111 Coeficiente de determinación de los sensores (R^2)	110
Figura 112 Gráfica del ETR por rango de profundidad	111
Figura 113 Comparativa de precios entre los analizadores de energía	112

Introducción

En el ámbito de la construcción, la seguridad y la estabilidad de las estructuras son aspectos fundamentales que dependen en gran medida de la correcta evaluación del terreno sobre el cual se erigen. La interpretación precisa de las características del suelo, especialmente su capacidad para soportar cargas, es esencial para garantizar la integridad de cualquier proyecto edificatorio. En este contexto, el ensayo de penetración estándar (SPT) emerge como una técnica de vital importancia, ampliamente reconocida y empleada en el sector geotécnico.

El ensayo SPT implica la inserción perpendicular de una varilla en el suelo, utilizando la caída de un martillo sobre ella. La medición de los golpes necesarios para penetrar el suelo proporciona información crucial sobre su resistencia. Sin embargo, la precisión de estos resultados puede verse comprometida por variaciones en la energía del martillo, que a su vez pueden ser influenciadas por el equipo utilizado y la destreza del operador. Esta discrepancia puede conducir a una subestimación o sobreestimación de la resistencia del suelo, lo cual representa un riesgo significativo para la seguridad de las estructuras y puede resultar en costos innecesarios.

Para abordar este desafío, surge la necesidad de desarrollar un dispositivo de medición de la energía de caída de martillo que sea accesible en términos de costos y adaptable a las necesidades específicas de los ensayos de penetración estándar. Este dispositivo no solo debe garantizar mediciones precisas y consistentes, sino también ser versátil para su uso en diferentes contextos geotécnicos. En este sentido, esta investigación se propone diseñar un dispositivo electrónico de medición de energía de bajo costo, denominado Kallpa, que permita una evaluación precisa de la energía de caída de martillo en los ensayos SPT.

Capítulo 1. Parte introductoria del trabajo

1.1 Generalidades

En el sector de la construcción, garantizar la seguridad y robustez de una estructura comienza desde el suelo sobre el que se edifica. Una correcta interpretación de las características del terreno es crucial, especialmente su capacidad para soportar cargas. Para evaluar esta capacidad, se recurre al ensayo de penetración estándar, conocido como SPT, una técnica ampliamente reconocida y empleada en el sector geotécnico.

El ensayo SPT consiste en insertar perpendicularmente al suelo una varilla SPT. La varilla penetra al suelo mediante la caída de martillo sobre ella. Se contabilizan los golpes hasta que la varilla haya sido introducida unos 45 cm. Estos golpes se administran con un equipo que puede variar en complejidad, desde versiones manuales hasta máquinas automáticas. Aunque pueda parecer simple, este proceso es vital para medir la resistencia del suelo a la penetración a través del conteo de golpes.

Sin embargo, algo tan esencial como la energía con la que se golpea puede variar según el equipo o el operador. Así, con una energía elevada, se necesitará de menos impactos para introducir la varilla al suelo, dando la impresión de que el suelo tiene una resistencia menor a la real. En cambio, cuando la energía del martillo es menor, se proyectará la idea de un suelo más robusto de lo que realmente es. Subestimar la resistencia del suelo compromete la seguridad de la estructura, mientras que sobreestimarla puede elevar innecesariamente los costos. Para garantizar resultados consistentes y precisos, es crucial realizar ajustes de energía en los datos obtenidos del SPT.

1.2 Descripción del Problema de Investigación

Por lo ya mencionado, para realizar correctamente el ensayo SPT es necesario conocer el valor real de la energía de caída de martillo que absorbe la varilla, para así obtener la eficiencia energética del ensayo SPT y poder aplicar a los datos la corrección por energía.

Para realizar esta medición de la energía absorbida, procesar y almacenar los datos de impacto de un ensayo SPT se utilizan los analizadores de energía. (Vermont Agency of Transportation, 2009).

El analizador de energía más conocido mundialmente es el analizador SPT de la empresa Pile Dynamics. Para el cálculo de la energía utiliza 2 acelerómetros y 2 deformímetros (instalados en la varilla); integrando la señal de aceleración se obtiene la velocidad y con la señal de deformación se puede obtener la fuerza. Con estos valores medidos durante el impacto es posible calcular la energía como la integral del producto de la fuerza y la velocidad. (Likins et al., 2008).

No obstante, aunque este analizador es confiable, tiene un elevado precio y limitada disponibilidad en el Perú debido a su origen estadounidense. Lo que implica que sea muy costoso realizar las mediciones de energía y obtener correctos datos en los ensayos de penetración estándar. Además, este analizador SPT es exclusivo para ensayos SPT, sin considerar el hecho que en la actualidad existen otros ensayos de penetración (DPT, CPTu, etc.) en los cuales también es necesario realizar una medición de energía. Por lo que, es en este contexto que surge el principal problema de esta investigación:

¿Cómo desarrollar un equipo de medición de la energía de caída de martillo de bajo costo, con capacidades de personalización, para los ensayos de penetración estándar (SPT)?

1.3 Objetivo del Estudio

1.3.1 Objetivo General

Diseñar un dispositivo electrónico de medición de energía de caída de martillo de bajo costo, con capacidades de personalización, para los ensayos de penetración estándar SPT usando procesamiento de señales.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Diseñar un dispositivo electrónico Kallpa que permita una medición precisa de la

energía en los ensayos de penetración estándar.

- Identificar y seleccionar los componentes fundamentales necesarios para garantizar una medición precisa de la energía de caída del martillo en el dispositivo Kallpa.
- Validar el funcionamiento adecuado del dispositivo Kallpa mediante la utilización de sensores de aceleración y deformación, con el propósito de obtener mediciones confiables de energía durante el desarrollo del equipo Kallpa.
- Determinar la técnica de integración más eficiente y precisa que permita optimizar el diseño del dispositivo electrónico Kallpa y lograr mediciones precisas de la energía de caída del martillo en los ensayos de penetración estándar.

1.4 Hipótesis

1.4.1 Hipótesis General

Se plantea que es factible diseñar un dispositivo electrónico de medición de energía de caída de martillo de bajo costo y con capacidades de personalización para los ensayos de penetración estándar SPT, lo cual permitirá obtener mediciones precisas y confiables durante dichos ensayos.

1.4.2 Hipótesis Específicas

- El diseño del dispositivo electrónico Kallpa utilizando los parámetros y especificaciones propuestos permitirá una medición precisa de la energía en los ensayos de penetración estándar.
- La inclusión de los componentes identificados en el diseño del dispositivo Kallpa resultará en una medición precisa de la energía de caída del martillo en los ensayos de penetración estándar.
- Al validar el funcionamiento del dispositivo Kallpa con los sensores de aceleración y deformación, se obtendrán mediciones confiables de energía durante el diseño del equipo Kallpa, mejorando así la precisión y confiabilidad de las pruebas realizadas.

- La aplicación de la técnica de integración identificada en la construcción del dispositivo Kallpa mejorará la eficiencia y precisión de las mediciones de la energía de caída del martillo en los ensayos de penetración estándar.

1.5 Antecedentes investigativos

Likins et al. (2008) realizaron el artículo llamado “PDA Testing: 2008 State of the art” que tiene como objetivo mostrar los avances en las pruebas dinámicas de alta tensión en pilotes, destacando los avances en equipos de campo, software de análisis y estándares. En esta investigación mencionan el proceso del cambio del analizador de energía (ver figura 1) de la empresa Pile Dynamics desde 1974 hasta la fecha de publicación del artículo, indicando que este producto incluye una varilla instrumentada con dos sensores de deformación y dos acelerómetros calibrados, una interfaz, cable y terminales correspondientes. Esta investigación proporciona evidencia del tiempo de desarrollo de los analizadores de energía utilizados en los ensayos de penetración estándar, asimismo, mencionan el hecho de que en sus inicios este analizador fue desarrollado para realizar pruebas dinámicas de carga en pilotes llamado “Pile Driving Analyzer (PDA)”. Sin embargo, la posición de liderazgo de Pile Dynamics en este mercado, al ser una de las pioneras y la empresa más grande, resulta en un aumento en el costo de los equipos analizadores de energía.

Figura 1

SPT Analyzer

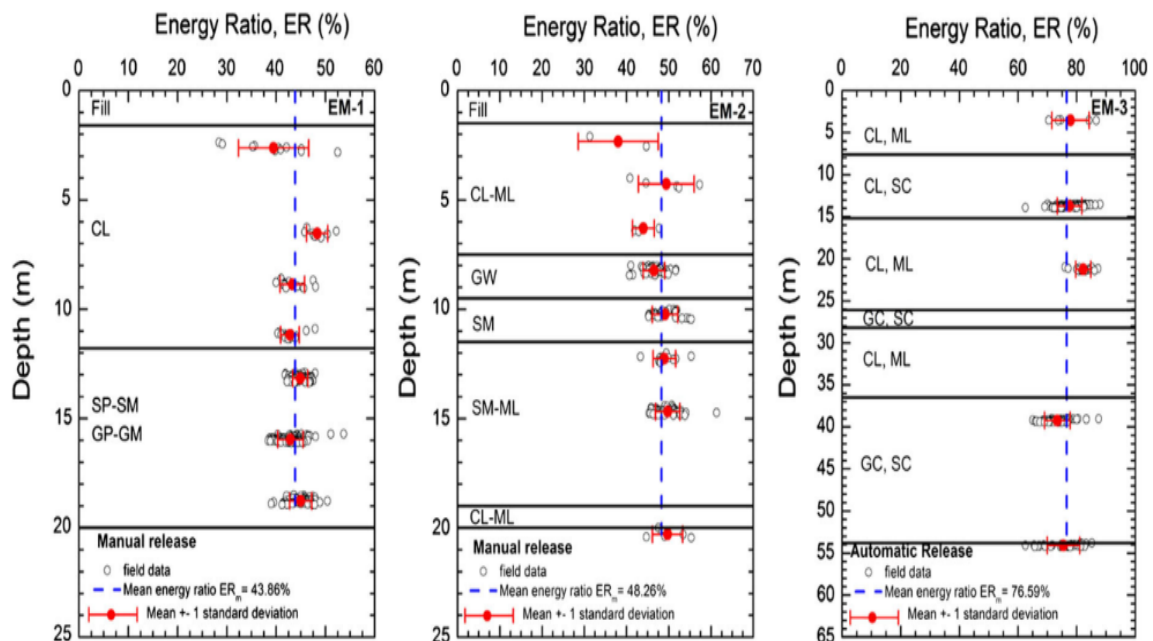


Nota. Adaptado de SPT Analyzer, de Pile Dynamics, Inc. [Fotografía], Pile (<https://www.pile.com/products/spt/>).

Batilas et al. (2016) presentaron el artículo denominado “SPT Energy Measurements: Manual vs. Automatic Hammer Release”. El objetivo de la investigación fue comparar los ensayos SPT realizados mediante máquinas automáticas y manuales. Para ello, se llevaron a cabo mediciones SPT en cinco pozos exploratorios en Grecia utilizando el SPT Analyzer de la empresa Pile Dynamics para medir la relación de energía. La base de datos resultante incluyó un total de 900 mediciones de relación de energía. Las conclusiones más destacadas revelaron que la liberación automática del martillo SPT produjo un valor de eficiencia energética aproximadamente el doble del valor obtenido con la liberación manual. Se propusieron valores de eficiencia energética para su aplicación práctica, siendo de $46 \pm 3,8\%$ y $77 \pm 4,6\%$ (ver figura 2) para la liberación manual y automática del martillo, respectivamente. No obstante, es importante señalar que estos valores no son aplicables a otras pruebas SPT manuales o automáticas. Por lo tanto, se sugiere llevar a cabo mediciones de la relación de energía en cada máquina, ya sea manual o automática, y considerar estos valores únicamente como una guía de referencia.

Figura 2

Valores medidos de la relación de energía

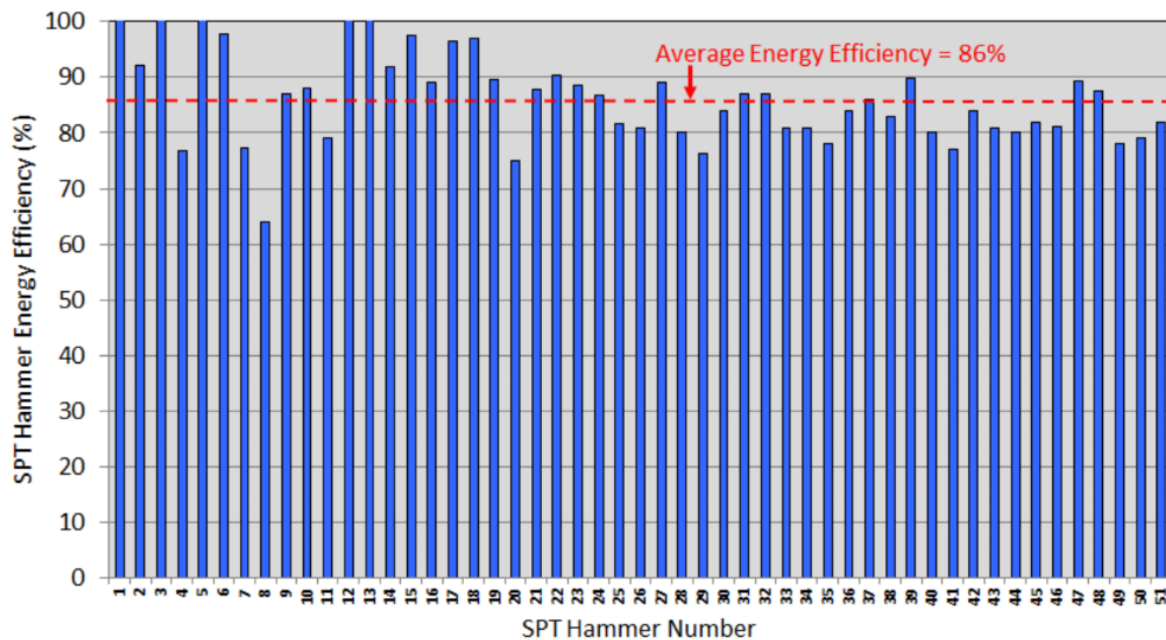


Nota. Adaptado de “SPT Energy Measurements: Manual vs. Automatic Hammer Release” (p. 6), por Batilas et. al, 2016. Geotechnical and Geological Engineering. Springer International Publishing Switzerland. DOI: 10.1007/s10706-016-0138-z

Idrasenan et al. (2017) se propusieron examinar el impacto de la eficiencia energética de los martillos SPT en la evaluación de la capacidad de carga en arenas. Los autores destacan la importancia de la eficiencia energética para obtener datos precisos en los ensayos SPT, señalando que los martillos SPT manuales antiguos tienen una eficiencia cercana al 60%, mientras que los martillos SPT más nuevos o automáticos presentan una eficiencia mucho mayor. Realizaron pruebas con más de 50 martillos SPT automáticos en el Reino de Arabia Saudita, obteniendo una eficiencia energética en promedio del 86% (ver figura 3). Al corregir estos datos mediante la eficiencia energética, es posible lograr ahorros significativos en costos y tiempo durante la fase de construcción. Los autores llegaron a la conclusión de que asumir una eficiencia energética del 60% para el martillo de SPT automático al evaluar la capacidad de carga resultará en una predicción insuficiente de la capacidad de carga del suelo. Este error de estimación puede dar lugar a aumentos innecesarios en los costos y el tiempo de los proyectos, especialmente debido a mejoras no requeridas en el suelo y a la necesidad de cimientos más grandes.

Figura 3

Datos de eficiencia energética de los martillos SPT automáticos en el Reino de Arabia Saudi

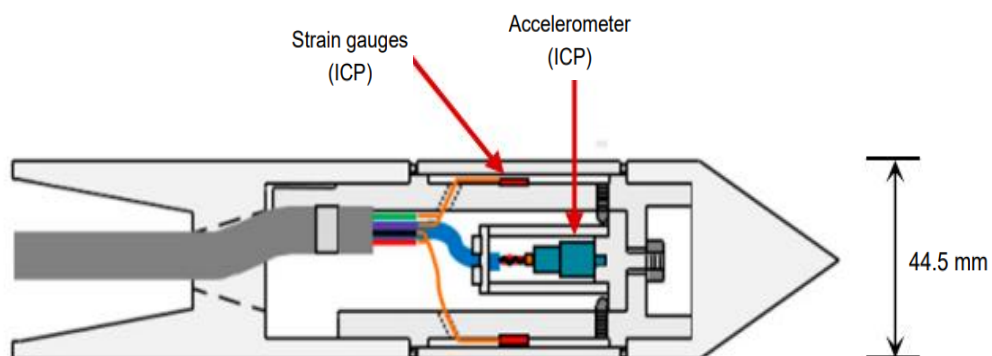


Nota: Adaptado de "Effect of SPT Hammer Energy Efficiency in the Bearing Capacity Evaluation in Sands" (p. 123-3), por Idrasenan et al.,2017. In Proceedings of the 2nd World Congress on Civil, Structural, and Environmental Engineering (CSEE'17). DOI: 10.11159/icgre17.123

En el artículo titulado "Instrumented Cone Penetrometer for Dense Layer Characterization", Lee et al. (2020) se proponen utilizar un penetrómetro de cono instrumentado para caracterizar capas densas y comparar los datos obtenidos con una prueba estándar de penetración con el analizador SPT. Para instrumentar la punta del cono, se emplearon un acelerómetro y cuatro galgas extensiométricas. El acelerómetro es capaz de medir la aceleración en un rango de frecuencia de 1 a 10,000 Hz con un valor máximo de hasta 100,000 g's, lo que permite calcular la velocidad y el desplazamiento mediante integración y doble integración de la aceleración medida en la punta del cono. Para medir la fuerza, se utilizaron las cuatro galgas extensiométricas en la punta del cono. El sistema de adquisición de datos puede muestrear simultáneamente hasta una frecuencia de muestreo de 96 kHz por canal. Los autores concluyeron que existe una correlación muy sólida entre la resistencia total del cono obtenida con el penetrómetro de cono instrumentado y los valores de otras pruebas estándar. Esto sugiere que el penetrómetro de cono instrumentado puede ser utilizado como referencia en futuros proyectos de medición de energía. Los investigadores introdujeron un enfoque novedoso para equipar el penetrómetro de cono (ver figura 4), el cual podría ser empleado en pruebas SPT. No obstante, se utilizó el SPT Analyzer como analizador de energía, el cual solo tiene una frecuencia máxima de 100 kHz.

Figura 4

Dibujo esquemático de un penetrómetro de cono instrumentado



Nota: Adaptado de "Instrumented Cone Penetrometer for Dense Layer Characterization" (p. 3), por Lee et al., 2020. Sensors. DOI: 10.3390/s20205732

El SPT Analyzer es el analizador de energía para ensayos SPT más distinguido, sin

embargo, esto no significa que sea el único que exista. Hay algunos analizadores de energía no tan comerciales como el caso del analizador SPT-HEMA de origen indio, el cual se verá su uso en el siguiente artículo. Panjamani et al. (2022) publicaron el artículo “Effective Use of SPT: Hammer Energy Measurement and Integrated Subsurface Investigation” que tiene como objetivo resaltar la importancia de la energía del martillo en la corrección del valor N en el ensayo de penetración estándar (SPT), y estudiar el efecto de la energía del martillo en las propiedades del suelo. Para ello, realizaron una prueba en un depósito de suelo residual en Bangalore. La energía del martillo en cada golpe se midió utilizando el SPT HEMA conectando sensores debajo del yunque y encima del muestreado de cuchara partida. Los resultados del SPT HEMA se validaron de forma cruzada con el instrumento de medición de energía SPT Analyzer. El SPT HEMA (ver figura 5) es un analizador de energía fabricado en la India con características similares al SPT Analyzer incluso superando en ciertos apartados al analizador de la empresa Pile Dynamic Inc. llegando a una frecuencia de muestreo máxima de 250 KS/s superando los 100 KS/s del SPT Analyzer. Sin embargo, este equipo presenta las mismas restricciones que el analizador SPT, ya que solo puede funcionar durante un máximo de 6 horas, lo cual es un factor crítico considerando que un ensayo SPT puede llevar todo el día. Además, su disponibilidad en el mercado se limita al país de origen, India, lo que dificulta su adquisición desde el continente americano.

Figura 5

SPT HEMA



Nota. Adaptado de Standard Penetration Test Hammer Energy Measurement Apparatus, de SYSCON [Fotografía], SYSCON (<https://sysconinstruments.com/spt-hema.html>).

En China, disponen de un analizador (ver figura 6) utilizado para el análisis de diversos ensayos, incluido el SPT. Este analizador chino, del tipo L-HPT (Low and High Strain

Integrated Dynamic Pile Tester), se emplea en el estudio "Energy Measurement in Standard Penetration Tests" realizado por Ji et al. (2023). En este trabajo, se lleva a cabo una comparación entre los métodos F2 y FV para determinar la energía en un ensayo SPT. Para ello, se registran las señales de aceleración y deformación utilizando el analizador L-HPT. Después de contrastar la energía obtenida por ambos métodos y analizar las señales, se concluye que el método F2 (Fuerza al cuadrado) no logra medir con la misma precisión la energía transmitida por el sistema de caída de martillo en comparación con el método FV (Fuerza velocidad), debido a la presencia de ondas de reflexión que provocan discrepancias en las curvas de tiempo de Fuerza y Velocidad. Por lo tanto, se recomienda el uso del método FV para la medición de energía en ensayos SPT. Este estudio respalda la eficacia del método Fuerza Velocidad en el cálculo de la energía. Además, demuestra el uso de un analizador diferente al SPT Analyzer, el L-HPT.

Figura 6

Pile driving analyzer L-HPT



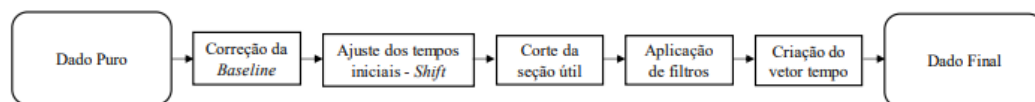
Nota: Adaptado de "Energy Measurement in Standard Penetration Tests" (p. 4), por Ji et al., 2023. Sustainability. DOI: 10.3390/su15064763

Perotti (2021) defendió su tesis titulada "PERFORACIÓN DINÁMICA DEL MUESTREADOR SPT CON ENERGÍA CRECIENTE" como parte de su candidatura al título

de Maestro en Geotecnia. Su objetivo principal fue introducir y evaluar un nuevo procedimiento para la realización del ensayo SPT. Para ello, llevó a cabo pruebas de SPT variando las alturas de caída del martillo. Durante estas pruebas, instaló acelerómetros y células de carga justo debajo de la cabeza del martillo y encima del muestreador para recopilar datos de aceleración y fuerza durante el impacto. Los resultados indicaron la viabilidad de estimar la eficacia del ensayo mediante este método, concluyendo que la relación entre la energía entregada al sistema y la altura de caída del martillo sigue una tendencia lineal. Un aspecto destacado de esta investigación fue el método utilizado para corregir las señales de aceleración y deformación, el cual se detalla en la figura 7.

Figura 7

Diagrama de flujo de análisis de datos para ensayos dinámicas



Nota: Adaptado de “CRAVAÇÃO DINÂMICA DO AMOSTRADOR SPT COM ENERGIA CRESCENTE” (p. 63), por Perotti, 2021. Universidad de Sao Paulo.

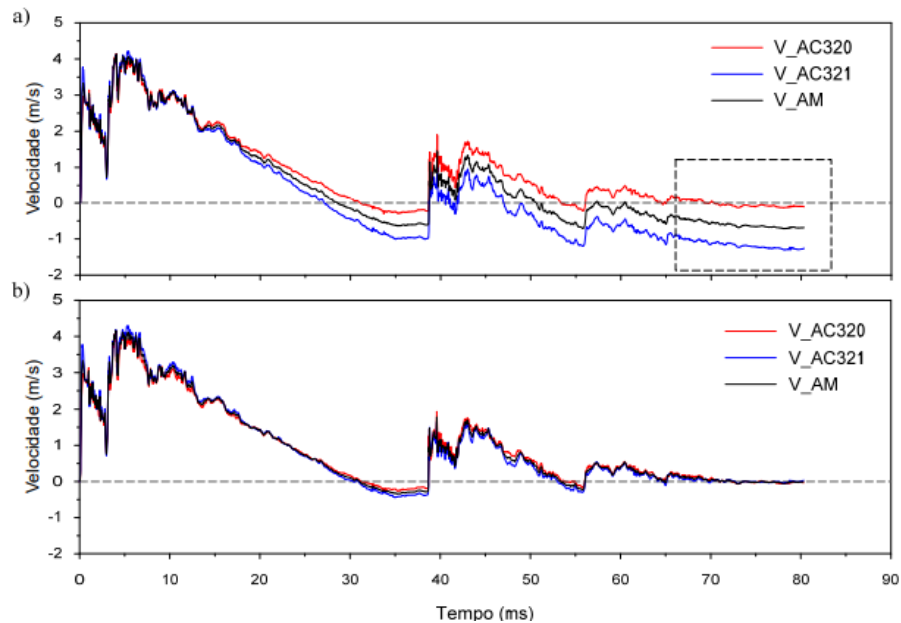
La corrección de la línea base implica ajustar el punto de referencia de los datos, calculando la media de los datos anteriores al impacto y restando este valor de todos los datos de la señal. Se garantiza que las señales de los acelerómetros y la célula de carga comiencen simultáneamente, aunque pueden presentar un ligero desplazamiento en el tiempo, corregido mediante un ajuste temporal para su sincronización. Debido a la ubicación de los acelerómetros en la varilla, las señales de aceleración se invierten, lo que requiere una corrección. El recorte de la sección no pertinente implica eliminar datos antes y después del impacto que no se utilizarán en los cálculos posteriores. La aplicación de filtros es necesaria para eliminar ruido no relacionado con las señales de impacto.

Asimismo, para calcular las velocidades y desplazamientos, se integran las señales de aceleración respecto al tiempo. Dado que el sistema está en reposo al inicio y al final del evento, la velocidad inicial y final deberían ser cero, pero pueden observarse desviaciones en la curva de velocidad al final del evento, lo que se atribuye a errores acumulativos durante la

integración. Para corregir esto, se determina el coeficiente angular de la recta formada al final de los datos (corrección triangular).

Figura 8

Corrección triangular



Nota: Adaptado de "CRAVAÇÃO DINÂMICA DO AMOSTRADOR SPT COM ENERGIA CRESCENTE" (p. 65), por Perotti, 2021. Universidad de Sao Paulo.

En su tesis doctoral titulada "CALIBRACIÓN DE ACCELERÓMETROS PARA LA MEDIDA DE MICROACELERACIONES EN APLICACIONES ESPACIALES", Santiago (2000) se propone desarrollar técnicas de calibración de acelerómetros dirigidas a aplicaciones en el ámbito espacial, como la microgravedad o las micro vibraciones estructurales. En este trabajo, el autor lleva a cabo una revisión exhaustiva de las técnicas de calibración, las cuales clasifica en tres categorías desde una perspectiva metrológica: calibración absoluta, calibración por comparación y calibración por reciprocidad. En la calibración absoluta, se mide la excitación mediante un patrón de medida trazable, y la entrada determinada se relaciona con la salida del dispositivo bajo prueba para obtener la función de respuesta correspondiente al nivel de entrada. Por otro lado, en la calibración por comparación, la señal de referencia se obtiene midiendo otro dispositivo previamente calibrado y de calidad igual o superior, en lugar de emplear patrones directamente. Este enfoque simplifica las operaciones y reduce costos,

razón por la cual se utilizará este método para calibrar el analizador de energía Kallpa, tomando como referencia el SPT Analyzer.

1.6 Metodología de investigación

1.6.1 Tipos y diseño de la investigación

a) Tipo de investigación:

Esta investigación es principalmente de tipo aplicada. Se centra en el diseño de un dispositivo concreto (el analizador de energía Kallpa) y su posterior validación y prueba en un entorno real. Aunque se utilizan componentes técnicos y se realizan pruebas comparativas con un equipo de referencia (SPT Analyzer), el enfoque principal es la aplicación práctica del dispositivo desarrollado. Sin embargo, también incluye elementos de investigación cuantitativa en términos de diseño electrónico y procesamiento de señales, ya que se realizan mediciones y análisis para validar la precisión del dispositivo. Por lo tanto, podría decirse que es una investigación aplicada con elementos cuantitativos.

b) Diseño de investigación:

El diseño de la investigación sigue una metodología principalmente experimental. Se parte de un propósito claro: desarrollar un analizador de energía para ensayos SPT. A partir de este propósito, se seguirán una serie de pasos secuenciales y estructurados para alcanzar los objetivos específicos:

Investigación de requisitos y características de productos comerciales disponibles. Consistió en una revisión de normativas y productos existentes para determinar los requisitos mínimos que debía cumplir un analizador de energía. Durante este proceso, se llevó a cabo una evaluación exhaustiva.

Diseño electrónico del equipo (hardware). se procedió a la selección de los componentes electrónicos necesarios para el funcionamiento del dispositivo, basándose en

la investigación previa realizada. Además, se elaboró el esquemático y PCB donde se integrarían estos componentes.

Integración de componentes y desarrollo del software. Se ensambló la PCB, junto con los terminales y otros componentes, para formar el dispositivo Kallpa. Asimismo, se elaboró el software requerido para su operatividad y la transmisión de datos hacia una computadora.

Validación de fórmulas y calibración del dispositivo. Se verificaron las fórmulas necesarias para calcular magnitudes como velocidad (mediante integración), fuerza, desplazamiento y energía, utilizando los resultados obtenidos del SPT Analyzer como referencia. Se aseguró la recolección correcta de datos de los sensores y se utilizó un enfoque comparativo para calibrar el dispositivo Kallpa, utilizando el SPT Analyzer como equipo de referencia.

Pruebas en entorno real y presentación de resultados. Una vez completado el proceso de diseño, integración y calibración, el dispositivo se sometió a pruebas en un entorno real para demostrar su correcto funcionamiento.

1.6.2 Unidad de Análisis

La unidad de análisis en esta tesis se enfoca en el diseño del equipo Kallpa para el cálculo de la medición de energía en los ensayos de penetración estándar SPT. Se analizarán en detalle todos los aspectos relacionados con el diseño, desarrollo, implementación y funcionamiento del equipo Kallpa en el contexto específico de los ensayos de penetración estándar SPT. Esto incluirá examinar aspectos técnicos como el diseño electrónico, la integración de componentes, el desarrollo de software, la calibración del dispositivo, las pruebas en entornos reales y la validación de resultados. Este estudio se llevará a cabo en el Centro de Investigación en Transformación Digital en Ingeniería (CITDI – UNI) en Lima, Perú.

1.6.3 Matriz de Consistencia

Tabla 1

Matriz de Consistencia

PROBLEMA	OBJETIVO	HIPÓTESIS	VARIABLES	DIMENSIONES	INDICADORES
PROBLEMA GENERAL	OBJETIVO GENERAL	HIPÓTESIS GENERAL			Complejidad del diseño
¿Cómo diseñar un equipo de medición de la energía de caída de martillo de bajo costo, con capacidades de personalización, para los ensayos de penetración estándar SPT que sea personalizable?	Diseñar un dispositivo electrónico de medición de energía de caída de martillo a bajo costo, con capacidades de personalización, para los ensayos de penetración estándar SPT que sea personalizable.	Se plantea que es factible diseñar un dispositivo electrónico de medición de energía de caída de martillo de bajo costo y con capacidades de personalización para los ensayos de penetración estándar SPT, lo cual permitirá obtener mediciones precisas y confiables durante dichos ensayos.	Dispositivo electrónico Kallpa (Variable independiente)	Diseño del dispositivo.	Capacidad de adaptación a diferentes ensayos.
					Funcionalidad
				Selección de componentes.	Compatibilidad de los componentes electrónicos
PROBLEMAS ESPECÍFICOS	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	HIPÓTESIS ESPECÍFICAS			Costo de los componentes electrónicos
¿Cuál es el diseño óptimo del dispositivo electrónico Kallpa que permite una medición precisa de la energía en los ensayos de penetración estándar?	Diseñar un dispositivo electrónico Kallpa que permita una medición precisa de la energía en los ensayos de penetración estándar.	El diseño y desarrollo del dispositivo electrónico Kallpa utilizando los parámetros y especificaciones propuestos permitirá una medición precisa de la energía en los ensayos de penetración estándar.			Disponibilidad de los componentes electrónicos
				Ensamblaje y montaje del dispositivo.	Calidad del ensamblaje
					Tiempo de montaje

Matriz de Consistencia

<p>¿Cuáles son los componentes fundamentales que deben incluirse en el desarrollo del dispositivo Kallpa para garantizar una medición precisa de la energía de caída del martillo?</p>	<p>Identificar y seleccionar los componentes fundamentales necesarios para garantizar una medición precisa de la energía de caída del martillo en el dispositivo Kallpa.</p>	<p>La inclusión de los componentes identificados en el desarrollo del dispositivo Kallpa resultará en una medición precisa de la energía de caída del martillo en los ensayos de penetración estándar.</p>	<p>Seguridad del dispositivo</p>
<p>¿Cómo se puede validar el funcionamiento adecuado del dispositivo Kallpa al utilizar los sensores de aceleración y deformación para obtener mediciones confiables de energía durante el desarrollo del equipo Kallpa?</p>	<p>Investigar sobre los sensores específicos que sean adecuados para obtener mediciones confiables de energía en la construcción del equipo Kallpa.</p>	<p>Al validar el funcionamiento del dispositivo Kallpa con los sensores de aceleración y deformación, se obtendrán mediciones confiables de energía durante el desarrollo del equipo Kallpa, mejorando así la precisión y confiabilidad de las pruebas realizadas.</p>	<p>Sensores</p>
<p>¿Cuál es la técnica de integración más eficiente y precisa para optimizar el desarrollo del dispositivo electrónico Kallpa y lograr mediciones precisas de la energía de caída del martillo en los ensayos de penetración estándar?</p>	<p>Determinar la técnica de integración más eficiente y precisa que permita optimizar el desarrollo del dispositivo electrónico Kallpa y lograr mediciones precisas de la energía de caída del martillo en los ensayos de penetración estándar.</p>	<p>La aplicación de la técnica de integración identificada en la construcción del dispositivo Kallpa mejorará la eficiencia y precisión de las mediciones de la energía de caída del martillo en los ensayos de penetración estándar.</p>	<p>Técnicas de integración</p>
			<p>Energía de caída de martillo en los ensayos SPT (Variable dependiente)</p>
			<p>Sensores piezoeléctricos</p>
			<p>Regla del trapecio</p>
			<p>Regla de Simpson 3/8</p>
			<p>Regla de los puntos medios</p>

Capítulo 2. Marcos teórico y conceptual

2.1 Marco teórico

2.1.1 *Fundamentos de los ensayos de penetración estándar (SPT)*

El ensayo de penetración estándar (SPT) es un método geotécnico crucial utilizado en la ingeniería civil para evaluar las propiedades mecánicas del subsuelo, especialmente en suelos granulares. La norma ASTM D1586 guía la realización de este ensayo, ampliamente empleado en proyectos de construcción, túneles y presas.

Este procedimiento es esencial para obtener muestras representativas del suelo y medir su resistencia a la penetración. Su relevancia radica en la capacidad de proporcionar datos sobre la resistencia y características del suelo, permitiendo a los ingenieros tomar decisiones informadas en el diseño de cimentaciones, muros de contención y otros aspectos de la ingeniería civil.

El SPT es ampliamente utilizado en exploración geotécnica, proporcionando información crucial sobre el comportamiento del suelo. Los datos obtenidos, como el número de golpes (valor N), se correlacionan con el comportamiento del suelo, facilitando la predicción de la capacidad portante, la evaluación de la posibilidad de licuación durante eventos sísmicos y la toma de decisiones fundamentadas en el diseño de cimentaciones. Su popularidad se debe a su versatilidad y fiabilidad, convirtiéndolo en una herramienta esencial en la ingeniería geotécnica y en la toma de decisiones en proyectos de ingeniería civil. (ASTM D1586, 2011).

2.1.2 *Equipamiento y Herramientas*

Para llevar a cabo un ensayo de penetración estándar (SPT) de manera manual, se hace necesario contar con un conjunto específico de herramientas y equipos fundamentales. En este proceso, el martillo estándar de 140 libras (63.5 kg) desempeña un papel central; al

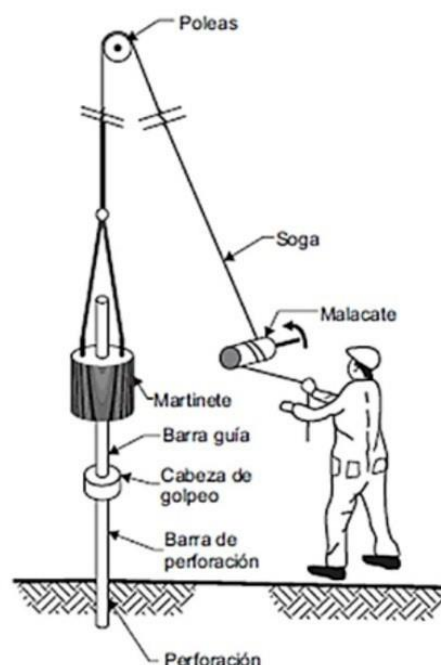
ser soltado desde una altura definida de 30 pulgadas (762 mm), suministra la energía necesaria para que el tubo de pared delgada penetre en el suelo. Este tubo, guiado por barras de perforación, recoge una muestra perturbada del suelo.

En la figura 9, se observan elementos adicionales como el malacate, utilizado para la elevación de herramientas, y la soga, que facilita la operación del equipo. La barra guía proporciona dirección y estabilidad a las barras de perforación durante el proceso de penetración en el suelo. Por otro lado, la cabeza de golpeo transmite la energía del martillo al conjunto de barras de perforación.

Es importante señalar que, aunque estas herramientas han sido efectivas en ensayos manuales, en la actualidad, existen equipos más avanzados, como máquinas automáticas, que han mejorado la eficiencia y precisión del SPT. No obstante, las herramientas mencionadas siguen siendo relevantes, sirviendo como la base de los primeros ensayos SPT y evidenciando la evolución tecnológica en la exploración geotécnica.

Figura 9

Componentes de un ensayo SPT



Nota. Adaptado de Equipos para Sondaje con Ensayo de Penetración Estándar o Ensayo SPT [Imagen], de ABC Geotechnical Consulting, 2023. (<https://geotecniaymecanicasuelosabc.com/wp-content/uploads/2021/08/SPT-2.jpg>).

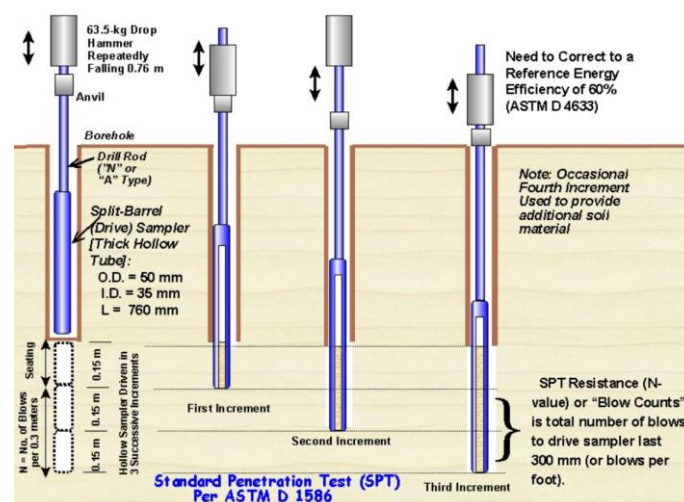
2.1.3 Procedimiento del Ensayo

El ensayo inicia con la perforación de un agujero en el suelo hasta alcanzar la profundidad deseada. Una vez completada la perforación, se posiciona el cilindro partido en el fondo del agujero. Es en este punto donde entra en acción el martillo o martinete, que se deja caer desde una altura estandarizada de 76.2 cm. La función de este martillo es golpear el cilindro, induciendo su penetración en el suelo hasta que este se introduzca 45 cm. (ASTM D1586, 2011).

Se registra el número de golpes necesarios (valor N) para que el cilindro alcance los primeros 15 cm de penetración, aunque este valor no se emplea para determinar la resistencia a la penetración del suelo. La razón de este registro inicial es evaluar la estabilización del suelo en los primeros 15 cm, proporcionando información sobre su consistencia inicial antes de la penetración efectiva del cilindro. La determinación del valor "N" se realiza considerando los golpes necesarios para los siguientes 30 cm de penetración, los cuales se suman para obtener el valor total de "N". Es importante destacar que, según el tipo de maquinaria utilizada (manual, automática, semi automática), el número de golpes puede variar, lo que destaca la necesidad de corregir el valor de N. (Aggour & Radding, 2001).

Figura 10

Procedimiento del ensayo SPT



Nota. Adaptado de Ensayos "in situ" [PowerPoint], de Suarez Diaz, 2023, Geología y geotecnia.

(https://www.fceia.unr.edu.ar/geologiaygeotecnia/0955_ENSAYOS_DE_SUELOS_IN_SITU-%20Colombia.pdf).

2.1.4 Medición de la energía de caída de martillo en SPT

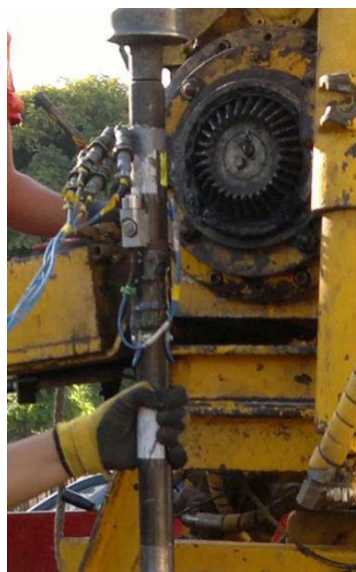
La Norma ASTM D4633 especifica que el método de integración de fuerza por velocidad (EFV) debe ser implementado para calcular la energía transferida a las barras de perforación. Este enfoque implica la medición de la máxima energía transmitida mediante la fuerza $[F(t)]$ y la velocidad $[V(t)]$, considerando la variación en el tiempo. Este procedimiento se lleva a cabo mediante la aplicación de la ecuación (1), donde la energía se calcula como el máximo valor de la integración del producto de la fuerza y velocidad mientras dure el impacto. (Figuroa Flores & Jaramillo Bopp, 2014).

$$EFV = \max \left[\int \int F_{(t)} V_{(t)} dt \right] \quad (1)$$

Para medir estas magnitudes (fuerza y velocidad), se utilizan sensores de aceleración y deformación, los cuales deben ser instalados en la varilla, como se ilustra en la figura 11. La velocidad se calcula mediante la integración de la aceleración, mientras que la fuerza se determina como el producto de la deformación, el módulo de elasticidad y el área de la sección transversal de la varilla. (ASTM D4633, 2010). Tal como se muestran en las ecuaciones (2) y (3).

Figura 11

Barra instrumentada con sensores de aceleración y deformación



Nota: Adaptado de “Medición de energía en ensayos SPT” (p. 4), por Figuroa & Jaramillo, 2014. Actas del VIII Congreso Chileno de Ingeniería Geotécnica.

$$V_{(t)} = \int a_{(t)} dt \quad (2)$$

$$F_{(t)} = A_c E \varepsilon \quad (3)$$

Donde:

$V_{(t)}$: Velocidad durante el impacto A_c : Área de la sección transversal de la varilla

$a_{(t)}$: Aceleración durante el impacto ε : Deformación

$F_{(t)}$: Fuerza durante el impacto E: módulo de elasticidad

La cantidad de energía transferida efectivamente a las barras de perforación por el martillo SPT generalmente se expresa como la Transferencia de Energía (ETR). Esta medida representa el porcentaje de la energía teórica transferida por la caída del martillo. (Biringen & Davie, 2008). La ETR es definida como la relación entre la energía calculada (EFV) con respecto a la energía potencial teórica del martillo SPT (PE). (Lee, An, & Lee, 2013).

$$ETR = \frac{EFV}{PE} \quad (4)$$

El valor de energía teórica (PE) con una altura de 0.76 m y una masa de 63.5kg, se calcula:

$$PE = 9.8 \times 0.76 \times 63.5$$

$$PE \cong 473 J$$

La mayoría de los ensayos SPT desarrollan aproximadamente el 60% de la energía teórica. Por lo tanto, se propone la normalización de los valores de N (número de golpes) a N₆₀, según la Norma ASTM D6066, esta normalización puede realizarse a través de la ecuación (5) El término N₆₀ se conoce como el número de golpes normalizado al 60% de eficiencia. (ASTM D6066, 1996).

$$N_{60} = N \times \frac{ETR}{0,60} \quad (5)$$

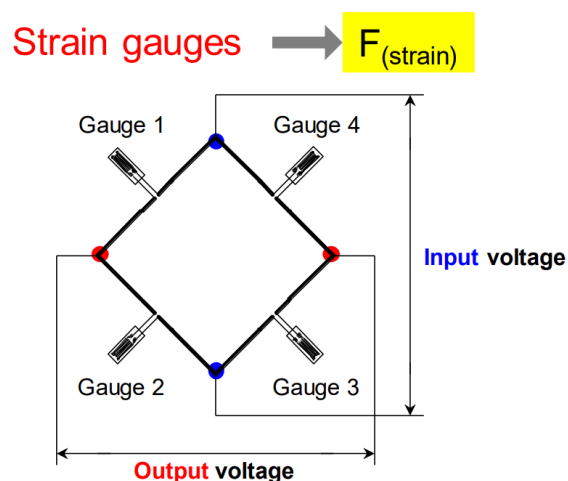
2.1.5 Sensores piezoresistivos

Un sensor piezoresistivo es un tipo de sensor que experimenta cambios en su resistencia eléctrica cuando se somete a tensiones mecánicas, como la aceleración o la deformación. Estos cambios en la resistencia eléctrica se pueden medir y utilizar para determinar la magnitud de la tensión mecánica experimentada por el sensor. (De Fazio et al., 2021).

Los sensores que se emplearán en este estudio son piezoresistivos; por esta razón, es importante comprender su operación. Internamente, estos sensores se configuran como un puente completo para facilitar su medición, como se ilustra en la figura 12.

Figura 12

Dibujo esquemático de un puente completo



Nota: Adaptado de "Application of Energy Monitoring Module for Evaluation of Transferred Energy into SPT Sampler" (p. 2), por Park et al., 2020. In Proceedings of the 6th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ISC2020-356).

Se emplea el sistema de puente completo debido a la escasa variación en la resistencia eléctrica de cada sensor, lo cual dificulta la lectura individual. Al disponerlos en una configuración de puente completo, se simplifica el proceso de medición y, adicionalmente, se logra la compensación de ciertas variaciones debidas a cambios de temperatura. (Park et al., 2020).

Los sensores piezoresistivos utilizados para medir aceleración y deformación requieren una señal de entrada de voltaje para su operación, generando a su vez dos señales

de salida (OUT+ y OUT-). La diferencia de estas salidas, exhiben una variación lineal con respecto a la aceleración y deformación, siendo estas las magnitudes que se deben medir para calcular la energía del ensayo SPT.

2.1.6 Procesamiento de señales

El procesamiento de señales es una disciplina esencial en el ámbito de la ingeniería eléctrica que se centra en la manipulación, análisis y transformación de señales. Desde sus inicios en la teoría de la comunicación hasta su aplicación en sistemas modernos, el procesamiento de señales ha evolucionado para abordar una variedad de desafíos tecnológicos. (Ambardar, 2002).

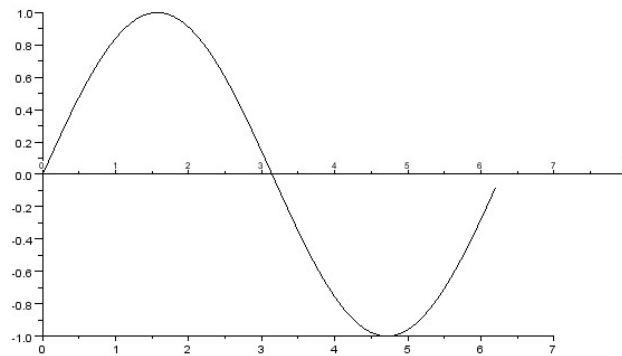
a) Digitalización de señales

La digitalización de señales es el proceso de convertir una señal analógica continua en una representación digital discreta. En otras palabras, implica muestrear la señal en intervalos regulares y asignar un valor digital a cada muestra. Este proceso es realizado por un dispositivo llamado convertidor analógico-digital (ADC). (Proakis & Manolakis, 1996). A continuación, se describen los pasos clave en el proceso de digitalización de señales:

Muestreo. La señal analógica, caracterizada por su variación continua en el tiempo, experimenta el proceso de muestreo a intervalos específicos. Cada muestra adquiere el valor de la señal en un punto determinado. El tiempo requerido para tomar cada muestra se denomina periodo de muestreo, y su inverso constituye la frecuencia de muestreo. Ilustrativamente, en la figura 13 se presenta la representación de la señal analógica sujeta a digitalización. La figura 14, por otro lado, exhibe la señal muestreada a una frecuencia de muestreo específica. En esta etapa, es esencial determinar una frecuencia de muestreo apropiada para evitar el fenómeno de aliasing. Por ende, se debe cumplir con el teorema de Nyquist, que establece que la frecuencia de muestreo debe ser al menos el doble de la frecuencia de la señal.

Figura 13

Señal analógica

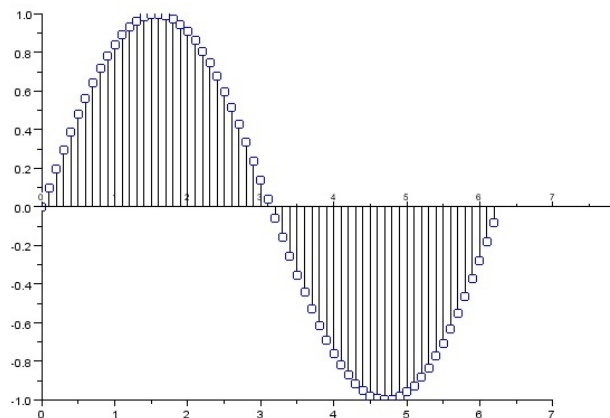


Nota. Adaptado de Muestro, cuantificación y codificación [figura], 2023, Universidad de Valencia.

(<https://www.uv.es/masefor/PAGINAS/muestreo.html>).

Figura 14

Señal muestreada



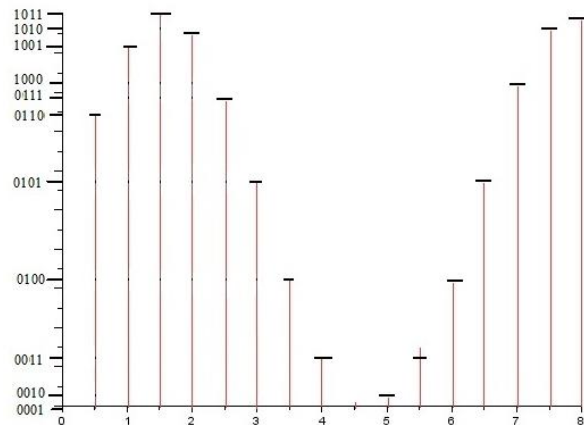
Nota. Adaptado de Muestro, cuantificación y codificación [figura], 2023, Universidad de Valencia.

(<https://www.uv.es/masefor/PAGINAS/muestreo.html>).

Cuantización. Después del muestreo, a cada muestra se le asigna a un valor discreto, generalmente expresado en formato binario. Este proceso se conoce como cuantización y determina la precisión con la que se representa la señal en el dominio digital. En figura 15 se observa que a la onda sinusoidal muestreada se le ha asignado un valor para cada amplitud. Si el valor discreto no coincide exactamente con ninguno, se toma como valor el nivel inferior más cercano.

Figura 15

Señal cuantizada



Nota. Adaptado de Muestro, cuantificación y codificación [figura], 2023, Universidad de Valencia.

(<https://www.uv.es/masefor/PAGINAS/muestreo.html>).

Codificación. Los valores cuantizados se codifican en formato digital, generalmente en binario, para su almacenamiento, procesamiento y transmisión. Por ejemplo, si se tiene 4 niveles de cuantización, se podría asignar códigos binarios a estos niveles. Podría ser algo así:

- Nivel 0: 00
- Nivel 1: 01
- Nivel 2: 10
- Nivel 3: 11

En este ejemplo, cada nivel discreto de cuantización se codificó como una secuencia binaria específica

2.1.7 Procesamiento digital de señales

El procesamiento digital de señales (DSP, por sus siglas en inglés) es una rama de la ingeniería eléctrica y la informática que se enfoca en el tratamiento y manipulación de señales mediante técnicas y algoritmos digitales. A diferencia del procesamiento de señales analógicas, que trabaja con señales continuas en el tiempo, el DSP se ocupa de señales que

han sido convertidas a una forma digital, es decir, discretizada en el tiempo y en la amplitud. (Proakis & Manolakis, 1996).

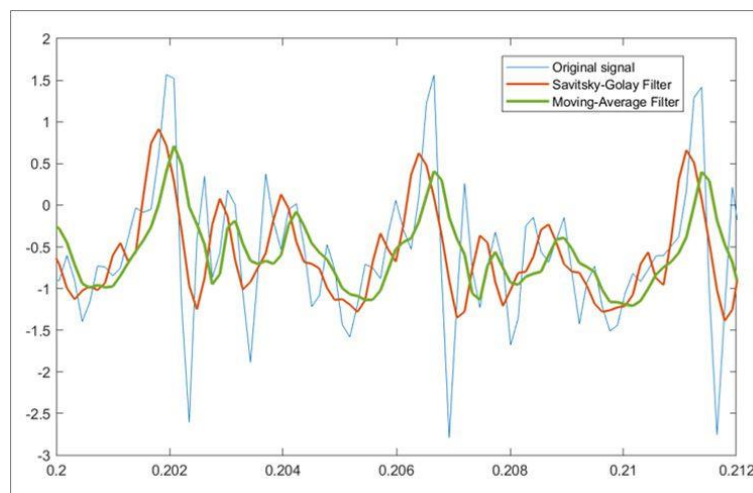
a) Filtrado digital

Un filtro digital es un componente del procesamiento digital de señales que altera las características de una señal digital. La función principal de un filtro digital es modificar ciertas propiedades de la señal de entrada, como su frecuencia, amplitud o fase. (Smith, 2002).

En el contexto de esta investigación, nos centramos en el filtro digital conocido como filtro pasa baja. Este tipo de filtro facilita el paso de señales con frecuencias inferiores a una frecuencia de corte determinada, al mismo tiempo que disminuye o elimina las frecuencias que superan dicha frecuencia de corte. En términos sencillos, permite el paso de las frecuencias bajas mientras reduce la amplitud de las frecuencias altas.

Figura 16

Señal filtrada con filtros pasa baja



Nota. Adaptado de Introducción a los filtros pasa baja [figura], 2023, MathWorks.

(<https://la.mathworks.com/discovery/low-pass-filter.html>).

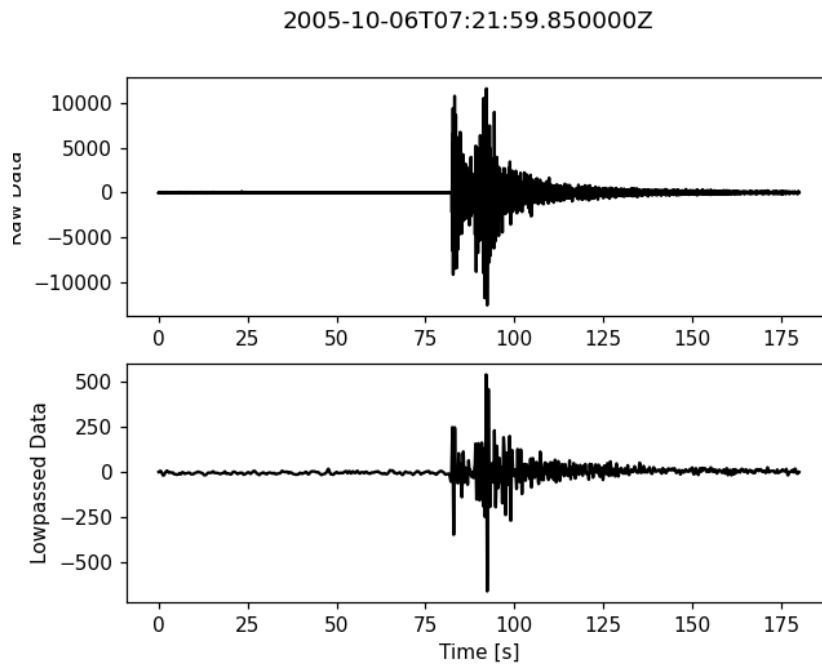
b) Uso de la librería ObsPy en el filtrado de señales

Para implementar técnicas de procesamiento digital de señales, se utilizó la librería ObsPy en el entorno de programación Python. ObsPy es una librería especializada en el procesamiento sísmológico, diseñada para facilitar la lectura, escritura, manipulación y

visualización de datos sísmicos. Entre sus características, ObsPy ofrece una amplia gama de herramientas para el filtrado de señales, incluyendo filtros pasa baja, pasa alta, pasa banda y rechaza banda, así como funciones para el análisis espectral y la detección de eventos sísmicos. (ObsPy, 2023).

Figura 17

Señal filtrada con ObsPy



Nota. Adaptado de Filtering Seismograms [figura], 2023, ObsPy.

(https://docs.obspy.org/tutorial/code_snippets/filtering_seismograms.html).

La función `obspy.signal.filter.lowpass()` implementa un filtro pasa baja de Butterworth, diseñado para eliminar las frecuencias superiores a una cierta frecuencia de corte (`freq`) de los datos de entrada. Este filtro utiliza el método de diseño de filtro de Butterworth y la función de filtrado de SOS de SciPy. Los parámetros que acepta esta función son:

- `data` (`numpy.ndarray`): Representa los datos que se desean filtrar, usualmente en forma de un array NumPy.
- `freq`: Es la frecuencia de corte del filtro, que define la frecuencia máxima que se permitirá pasar sin atenuación significativa.
- `df`: Indica la tasa de muestreo de la señal en Hz, es decir, la cantidad de muestras tomadas por segundo.

- **corners:** Este parámetro define el orden del filtro o el número de esquinas del filtro de Butterworth. A mayor número de esquinas, mayor será el orden del filtro y más suavizado será el resultado. El valor predeterminado es 4.
- **zerophase:** Es un parámetro booleano que, si se establece en True, aplicará el filtro dos veces, una vez hacia adelante y otra hacia atrás, lo que duplica el número de esquinas del filtro, pero elimina cualquier cambio de fase en la señal resultante. Esto puede ser útil en situaciones donde se necesita preservar la fase de la señal. El valor predeterminado es False.

2.2 Marco Conceptual

2.2.1 Ensayo SPT

Un método estándar utilizado en geotecnia para obtener información sobre las características del suelo mediante la penetración de un muestreador en el subsuelo.

2.2.2 Medición de Energía SPT

El proceso de cuantificar la energía transmitida por el martillo durante un ensayo SPT, crucial para interpretar los resultados y evaluar la capacidad de carga del suelo.

2.2.3 Energía Relativa

La cantidad de energía medida durante un ensayo SPT en relación con la energía total suministrada por el martillo, indicando la eficiencia del golpe.

2.2.4 Energía Real

La energía efectivamente transferida al suelo durante un ensayo SPT, teniendo en cuenta las pérdidas de energía debido a la fricción y otras condiciones del terreno.

2.2.5 Energía Teórica

La energía calculada que se espera transmitir al suelo durante un ensayo SPT, basada en la altura de caída del martillo y otras variables del equipo.

2.2.6 *Dispositivo Analizador de Energía*

Un equipo utilizado para medir y analizar la energía transmitida durante los ensayos de penetración estándar, como el analizador PDA de Pile Dynamics o el SPT HEMA.

2.2.7 *Método FV*

Método de medición de energía en ensayos SPT que utiliza la fuerza y la velocidad para calcular la energía transmitida por el martillo.

2.2.8 *Método F2*

Método alternativo de medición de energía en ensayos SPT que utiliza la fuerza al cuadrado para estimar la energía transmitida por el martillo.

2.2.9 *Strain Gauge*

Un sensor utilizado para medir la deformación o tensión en un objeto. Consiste en un material alargado que cambia su resistencia eléctrica en respuesta a la deformación mecánica.

2.2.10 *Acelerómetros*

Dispositivos utilizados para medir la aceleración lineal o la fuerza de gravedad en una dirección específica. Pueden ser piezoeléctricos, capacitivos o basados en MEMS (microelectromecánicos).

2.2.11 Sensores Piezoresistivos

Sensores que utilizan materiales piezoresistivos para medir la deformación mecánica. La resistencia eléctrica de estos materiales cambia en respuesta a la presión o tensión aplicada.

2.2.12 Calibración por Comparación

Un método de calibración de equipos de medición donde se compara la salida del dispositivo con la de un equipo estándar conocido y previamente calibrado.

2.2.13 Corrección de Señales

Proceso de ajuste de las señales registradas durante un ensayo SPT para eliminar errores sistemáticos y mejorar la precisión de los datos.

2.2.14 Filtrado de Señales

Proceso de procesamiento de señales para eliminar o reducir el ruido y las interferencias, mejorando así la calidad de los datos. Puede implicar el uso de filtros digitales o analógicos.

2.2.15 Filtro Pasa Baja

Un tipo de filtro que permite el paso de frecuencias por debajo de una frecuencia de corte específica, mientras atenúa las frecuencias por encima de esa frecuencia de corte. Se utiliza para eliminar componentes de alta frecuencia no deseados en una señal.

2.2.16 Dispositivo Kallpa

Dispositivo electrónico capaz de medir la energía de caída de martillo en los ensayos SPT, desarrollado en este trabajo de investigación.

Capítulo 3. Desarrollo del trabajo de investigación

3.1 Diseño electrónico del dispositivo Kallpa

3.1.1 *Productos comerciales*

Como se ha mencionado previamente, el analizador de energía más reconocido a nivel mundial para ensayos SPT es el desarrollado por la empresa Pile Dynamics. No obstante, en la India y en China también se disponen de un analizador de energía. En esta sección, se procederá a detallar las características de los tres equipos para poder comparar las funcionalidades y componentes que tiene un analizador de energía.

a) **SPT Analyzer (Analizador SPT)**

El analizador SPT evalúa la energía transferida a una varilla SPT instrumentada durante una prueba estándar de penetración (SPT). Este proceso posibilita ajustar el valor N medido al N60 normalizado, considerando una transferencia de energía estándar del 60% en las varillas de acuerdo con la norma ASTM D4633. La compensación de las eficiencias altamente variables entre diversas plataformas SPT y tipos de martillo contribuye a mejorar la confiabilidad de las estimaciones de la resistencia del suelo utilizadas en los diseños geotécnicos. (Pile Dynamics, 2024)

Figura 18

Analizador SPT en funcionamiento



Nota. Adaptado de SPT Analyzer, de Pile Dynamics, Inc. [Fotografía], Pile (<https://www.pile.com/products/spt/>).

Especificaciones de SPT Analyzer

Físico:

- Tamaño: 320 X 250 X 68 mm (12,6 x 9,8 x 2,7 pulgadas).
- Peso: 5 Kg (11 lbs).
- Rango de temperatura: de 0 a 40 ° C (32 a 104 ° F) en funcionamiento; -20 a 65 ° C (-4 a 149 ° F) de almacenamiento.
- Pantalla: 26.4cm (10.4"), legible bajo luz solar, resolución 1024 X 768.
- Pantalla táctil capacitiva incorporada.
- Salidas de video: HDMI, VGA.
- Alimentación: batería de recolección de datos continua de 4 horas, batería de automóvil de 12 VDC o 100-240 VCA. Paquete de batería adicional suministrado.
- Tiempo de carga: 6 horas máx.

Electrónico:

- Sistema operativo Microsoft Windows® 7.
- Unidad interna de 60 GB SSD.
- Puerto Ethernet.
- 4 puertos USB.
- Filtrado de acondicionamiento de señal analógica (respuesta de frecuencia) 5 KHZ (-3 dB).
- Convertidor A / D de 16 bits con frecuencia de muestreo de 10,24 MHz.
- 4 canales con una frecuencia efectiva de digitalización de hasta 100 KHz que da como resultado un tiempo de muestreo total seleccionable por el usuario de 82 a 205 milisegundos.
- Precisión de unidad básica 2%.

Funcional:

- Función de prueba de calibración incorporada.

- 4 canales de adquisición de datos tradicionales (cableados), universales (tensión o aceleración en cualquier canal).
- Compatible con sensores inteligentes tradicionales (cableados).
- Equilibrado automático de señales y acondicionamiento de señal.
- Integración digital (software) de aceleración.
- El acondicionamiento de la señal para la fuerza y la aceleración tienen una respuesta de frecuencia similar.
- Comprobación de calibración interna de tensión y aceleración.
- Capacidad de amplificación de señal.

El analizador SPT está equipado con un par de sensores que detectan la aceleración y la deformación. Estos mismos sensores serán utilizados en el dispositivo Kallpa, por lo que a continuación se mencionan las características técnicas de estos.

Acelerómetro Piezoresistivo:

- Montaje: Dentro de un bloque de aluminio personalizado (45 x 25 x 30 mm).
- Circuito: Puente completo.
- Sensibilidad: Nominalmente 0.07 mV/g con una entrada de 6.4 VCC.
- Rango: 10,000 g (Límite 20,000 g).
- Rango de frecuencia: DC a 4.5 kHz.
- Frecuencia resonante: 2500 Hz.
- Rango de temperatura: -40 a 55 grados Celsius.

Varilla SPT:

- Longitud: 0.6 m.
- Circuito: 2 puentes de Wheatstone completos.
- Sensibilidad nominal: 600 $\mu\epsilon$ /mV/V.
- Rango de deformación: Nominalmente 3,000 $\mu\epsilon$ (funcional hasta 8,000 $\mu\epsilon$).
- Rango de choque: Nominalmente 5,000 g.
- Frecuencia natural: Mayor a 2,000 Hz.

- Rango de temperatura: -40 a 120 grados Celsius.

b) SPT HEMA

El Dispositivo de Medición de Energía del Martillo para la Prueba de Penetración Estándar (SPT - HEMA) es un aparato de medición que consta de varillas instrumentadas incorporadas con sensores de fuerza, aceleración y una unidad de grabación y procesamiento de datos. Mide la energía transferida por los martillos SPT debajo del yunque y sobre la muestra de cuchara dividida. (Syscon Instruments, 2023).

El SPT - HEMA es esencialmente un sistema portátil alimentado por batería que incluye varillas instrumentadas, acondicionadores de señal, fuente de alimentación, SBC, un sistema de adquisición de datos de alta velocidad con software personalizado para realizar pruebas de campo, procesamiento de datos y análisis posterior. (Syscon Instruments, 2023).

Características:

- Capacidad de grabación, 4 canales de carga y aceleración.
- Sistema de adquisición de datos de alta velocidad.
- Acondicionador de señal incorporado para los cuatro canales.
- Equilibrio interno cero mediante potenciómetros mecánicos.
- Indicación del nivel de batería a través de una pantalla de gráficos LED.
- Cargador de batería externo con protección contra sobrecargas.

Especificaciones:

- CPU: Procesador Atom, 1.8 GHz.
- GUI: Pantalla táctil LCD de 7 pulgadas.
- Sistema operativo: Microsoft Windows 7 Pro.
- Resolución de pantalla: 1024 x 768.
- RAM: 4 GB.
- Batería recargable: Incorporada, Li Polímero Ion 12 VDC, 25 Ah.
- Disco duro: 120 GB, SSD.

- Respaldo de batería: 4 a 6 horas (típico).
- Acondicionador de señal: 4 (2 de carga y 2 de aceleración).
- Tamaño del analizador: 306 mm de alto x 350 mm de ancho x 120 mm de profundidad.
- Peso del analizador: 9.25 kg.
- Filtro: 5KHz LPF para ambos canales.
- ADC: 16 bits, 250 KS/s.
- Tiempo de grabación: 1 a 5 minutos.

c) L-HPT

Este analizador de energía es chino, sin embargo, utiliza sensores de aceleración y deformación procedentes de Estados Unidos. El funcionamiento es similar al resto de analizadores de energía existente, sin embargo, lo que se puede rescatar es que tiene un cable principal de 30 metros. Lo que podría significar que se pueda realizar el ensayo a una distancia mayor en comparación del resto de analizadores.

Como especificaciones técnicas obtenidas por el sitio web del fabricante se tiene:

- Tamaño: 61 x 172 x 225 mm.
- Peso: 2.0 kg.
- Pantalla táctil LCD a color de 8 pulgadas y alta luminosidad, que se puede operar directamente con la mano o con un lápiz táctil.

Figura 19

Componentes del analizador L-HPT



Nota. Adaptado de Low and High Strain Inegrated Dynamic Pile Tester, de Shanhai Ruistar Instrument Science & Technology Company Limited [Fotografía], RSI (<http://ruistar.com.cn/en/index.php/Product/show/id/49>).

El HPT se puede utilizar para la prueba de conducción de pilotes de acero, pilotes de concreto y pilotes colados en el lugar. Entre sus características más resaltantes se tienen:

- Conversor analógico-digital de alta resolución de 24 bits.
- Frecuencia de muestreo de 48kHz, 96kHz, 144kHz, opcional.
- El acelerómetro piezoeléctrico de alta calidad fabricado en Estados Unidos es estable, duradero y confiable.
- El HPT puede auto verificarse y determinar automáticamente si el sistema está en buenas condiciones.
- La batería de litio incorporada en el HPT puede utilizarse continuamente durante aproximadamente 6 horas.

3.1.2 Requisitos del diseño electrónico

Los requisitos en esta sección están basados en la normativa ASTM D4610, que establece los requerimientos para un analizador de energía diseñado para ensayos de penetración estándar. También se consideraron las características técnicas de los analizadores de energía mencionados previamente.

En relación con la capacidad de muestreo necesaria para el Convertidor Analógico-Digital (ADC), se establece una resolución mínima de 16 bits a una frecuencia de muestreo de 50 kHz. Dado que los sensores operan bajo el principio del puente de Wheatstone o puente completo, se especifica que el ADC debe ser de tipo diferencial, ya que se leerán las salidas de este sensor mediante la resta de las dos señales OUT+ y OUT-. En resumen, las características mínimas del ADC son las siguientes:

- Resolución de 16 bits.
- Frecuencia de muestreo mínima de 50 kHz.
- Tipo de ADC: Diferencial.

El ADC es el componente principal de la placa de adquisición, por lo que los demás componentes seleccionados (reguladores de voltaje, resistencias, capacitores, etc.) se eligen

en función de su idoneidad para complementar este ADC. Adicionalmente, el Convertidor Analógico-Digital (ADC) demanda una placa de desarrollo con la capacidad de recolectar los datos provenientes de los ADC y transmitirlos a la unidad de procesamiento central, que, en este caso, sería una computadora o laptop. En este proceso, se llevará a cabo la etapa de procesamiento, análisis y almacenamiento de los datos relativos a la deformación y aceleración.

3.1.3 Selección de componentes electrónicos

a) ADC

El ADC MCP3564 fue seleccionado como la elección óptima para el analizador de energía debido a su cumplimiento con los requisitos mínimos. Este convertidor analógico a digital, fabricado por Microchip Technology, destaca en aplicaciones que requieren una precisión excepcional en la conversión de señales analógicas, como la medición precisa de sensores de presión, deformación, flujo y fuerza. Con una impresionante resolución de 24 bits y características avanzadas, el MCP3561 se posiciona como una solución idónea para aplicaciones que exigen una captura de señales analógicas con alta fidelidad. (Microchip Technology, 2022). Algunas de las características clave del MCP3564 incluyen:

- Tipo de ADC: Delta-Sigma.
- Resolución: 24 bits.
- Canales de entrada: Configurable en dos, cuatro u ocho canales.
- Tasa de datos programable: Hasta 153.6 kilo-muestras por segundo (ksps).
- Ganancia programable: Rango ajustable desde 0.33x hasta 64x.
- Relación señal a ruido y distorsión (SINAD): 106.7 dB.
- Rango de temperatura extendido: De -40°C a +125°C.
- Interfaz de comunicación: SPI
- Alimentación: DVDD (Digital Voltage) de 1.8V a 3.6V y AVDD (Analog Voltage)

de 2.7V a 3.6V.

Figura 20

ADC MCP3564



b) Placa de desarrollo

Se optó por utilizar la Raspberry Pi como placa de desarrollo de todas las placas disponibles en el mercado debido a su versatilidad, bajo costo y compatibilidad con el ADC MCP3564. La Raspberry Pi 4, desarrollada por la Fundación Raspberry Pi, es una pequeña computadora de alto rendimiento y costo accesible. Diseñada para ser versátil, esta placa funciona como un ordenador de escritorio con capacidad para dos pantallas y se utiliza en diversas aplicaciones, como controlador de robots, centro de medios, concentrador de hogar inteligente, núcleo de inteligencia artificial en red, controlador de fábrica, entre otras. La Raspberry Pi 4 ofrece mejoras significativas en velocidad y potencia en comparación con modelos anteriores, manteniendo la compatibilidad con proyectos antiguos y proporcionando diversas posibilidades para entusiastas y profesionales. (Raspberry Pi, 2023).

Figura 21

Raspberry Pi 4 B+



Algunas de las características técnicas importantes de la Raspberry Pi 4B:

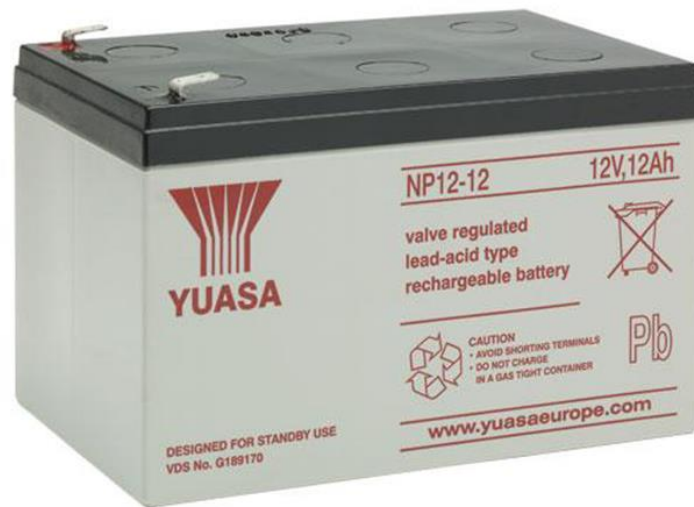
- Procesador: Broadcom BCM2711, Quad-Core Cortex-A72 (ARM v8) a 1.5 GHz.
- RAM: Opciones de 2GB, 4GB o 8GB LPDDR4-3200 SDRAM.
- Conectividad: 2 puertos USB 3.0, 2 puertos USB 2.0, Puerto Ethernet Gigabit.
- Conectividad inalámbrica Wi-Fi 802.11ac y Bluetooth 5.0.
- Almacenamiento: Ranura para tarjeta microSD (más de 128 GB).
- Pantalla: Doble salida de video HDMI 2.0, con soporte para resolución de hasta 4K.
- Audio: Conector de audio de 3.5 mm y soporte para salida de audio a través de HDMI.
- GPIO: 40 pines GPIO (General Purpose Input/Output).
- Alimentación: Puerto USB-C para alimentación (5V).
- Dimensiones: 85.6mm x 56.5mm.
- Sistema Operativo: Compatible con varios sistemas operativos, incluyendo Raspbian, Ubuntu, y otros sistemas basados en Linux.

c) Fuente de alimentación

La fuente de alimentación necesita ser lo más estable posible. Al trabajar con una resolución de 16 bits, la fuente de entrada debe estar fuera de ruido o tener la más mínima posible. Por esto, se consideró la batería NP12-12 (12v, 12.0Ah) para alimentar al Raspberry Pi 4 y la placa de adquisición de señales.

Figura 22

Batería 12V



d) Placa de adquisición de señales

En la placa de adquisición de señales, se realizará la instalación de los Convertidores Analógico-Digitales (ADCs) y otros componentes esenciales para garantizar el funcionamiento adecuado de los ADCs y proporcionar la alimentación necesaria al Raspberry Pi y los sensores. Entre estos componentes, se encuentran:

Reguladores de voltaje

Los reguladores de voltaje son dispositivos electrónicos diseñados para mantener un nivel constante de voltaje en un circuito eléctrico, independientemente de las variaciones en la alimentación o carga. Estos dispositivos son utilizados para estabilizar la tensión y garantizar que los componentes electrónicos operen dentro de los límites de voltaje especificados.

Para este dispositivo analizador de energía se utilizaron 7 reguladores de voltaje distintos con el fin de anular el mínimo ruido entre los componentes. El uso de estos reguladores es para alimentar a los ADC's, Raspberry Pi 4 y los sensores.

Según el datasheet del ADC MCP3564, para el correcto funcionamiento de este es necesario el uso de los siguientes reguladores:

- LM2940: Regula el voltaje de 12V (batería) a 9V-PCB.
- LM1117: Regula el voltaje de 9V-PCB a 5V.
- MCP1825S: Regula el voltaje de 5V a 3.3V para la parte digital del ADC.
- MCP1754S: Regula el voltaje de 5V a 3.3V para la parte analógica del ADC

Los reguladores de voltaje LM2940, LM1117, MCP1825S y MCP1754S son dispositivos lineales utilizados para mantener una salida de voltaje estable en diversas aplicaciones electrónicas. El LM2940 destaca por su baja caída de voltaje y eficiencia en entornos de baja potencia. El LM1117 ofrece variantes con salidas fijas, como 3.3 V o 5 V, y proporciona protecciones internas. El MCP1825S es configurable en diferentes voltajes de salida y puede manejar corrientes más altas, mientras que el MCP1754S tiene una salida fija de 5 V y mejora la eficiencia. Cada regulador tiene sus propias características específicas, como la capacidad de corriente, la caída de voltaje y las protecciones integradas, lo que los hace adecuados para alimentar al ADC MCP3564.

En el caso del Raspberry Pi se tomó en cuenta que este necesita de al menos 5V y 3A para su adecuado rendimiento, por eso se escogió a estos reguladores:

- BD90FD0: Regula el voltaje de 12V (batería) a 9V-RASP.
- MIC29300: Regula el voltaje de 9V-RASP a 5V-RASP para la alimentación del raspberry.

El MIC29300 es un regulador de voltaje lineal de baja caída diseñado para proporcionar una salida regulada de voltaje en aplicaciones que requieren eficiencia y estabilidad. Con un rango de voltaje de entrada amplio, este dispositivo puede manejar tensiones de hasta 26 V y proporciona una salida de voltaje fija, generalmente en versiones

como 3.3 V, 5 V o 12 V. Destaca por su capacidad para manejar corrientes de salida más altas y su baja caída de voltaje, lo que lo hace eficiente en entornos de baja potencia. Además, el MIC29300 suele incluir protecciones contra sobrecalentamiento y cortocircuitos, proporcionando una solución robusta para diversas aplicaciones de suministro de energía.

Para la selección de los reguladores de los sensores el proceso fue un poco más complicado. Ya que en este paso se debería de escoger necesariamente los reguladores que presenten menor ruido y no se vean afectados por alguna variación en el voltaje y la temperatura. Por esto, para disminuir el error del ruido, se colocó dos reguladores LT3045 en serie que cumplen con el siguiente funcionamiento:

- LT3045-7.5V: Regula el voltaje de 9V-PCB a 7.5V.
- LT3045-6.4V: Regula el voltaje de 7.5V a 6.4V para alimentar a los sensores.

Según lo descrito en la sección 3.1.1 “Productos comerciales”, los acelerómetros requieren una tensión de salida de 6.4V para su correcto funcionamiento. Aunque en esta sección no se detalla el voltaje específico para los deformímetros, se señala que su sensibilidad depende del voltaje aplicado. Por ello, se optó por suministrar la misma tensión de 6.4V, ya utilizada en los acelerómetros, a los strain gauges (deformímetros).

Referencia de voltaje

Es necesario un referente de voltaje de precisión para alimentar el pin VREF+ de los ADC's. El LT6657 es un voltaje de referencia de precisión con una opción común de 1.25 V. Con una precisión inicial de $\pm 0.05\%$, este dispositivo ofrece una baja deriva de temperatura de ± 3 ppm/ $^{\circ}\text{C}$ (máx.) y un rizado de ruido de 2 μV RMS en el rango de frecuencia de 0.1 Hz a 10 Hz. La selección de este componente se basa principalmente en su reducido coeficiente de temperatura. Dado que se implementa el dispositivo Kallpa en entornos diversos y desafiantes, la variación de temperatura emerge como un factor crucial.

El establecimiento de un voltaje de referencia de 1.25V resulta crucial, ya que los cambios registrados por los sensores suelen ser mínimos. Al reducir el rango del voltaje de referencia, se amplía efectivamente el rango de valores que los ADCs pueden obtener de los

sensores.

Filtros pasa baja

La recomendación de la norma ASTM D4610 es aplicar un filtro pasa baja de 5 kHz a la señal. Por esta razón, se instala un filtro analógico R-C en la entrada del convertidor analógico-digital (ADC), compuesto por una resistencia y un capacitor. Los valores de estos componentes han sido determinados de la siguiente manera:

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC}$$

Asumiendo un valor de: $R = 100\Omega$

$$5000 = \frac{1}{2\pi(100)C}$$

$$C = 0.3183 \mu F$$

Valor comercial: $C = 0.33 \mu F$

3.1.4 Diseño de circuitos

a) Dibujo esquemático

El esquema del circuito de la placa de adquisición de datos se desarrolló en el software Eagle. Este software es especializado en diseño de circuitos impresos (PCB) y esquemáticos electrónicos, ofreciendo una plataforma integral para la creación de diseños complejos de PCB con herramientas avanzadas de diseño y trazado de rutas.

A continuación, se muestran los partes más importantes del dibujo esquemático:

Alimentación del ADC

Figura 23

Diagrama de conexión del LM2940

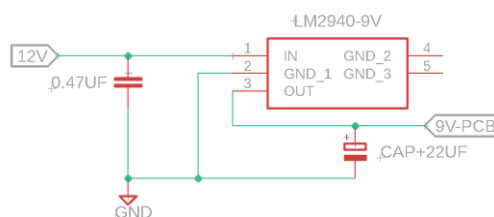


Figura 24

Diagrama de conexión del LM1117

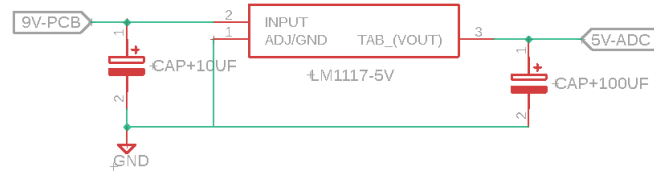


Figura 25

Diagrama de conexión del MCP1825S

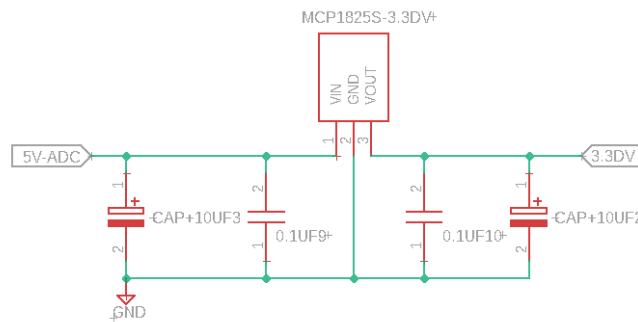
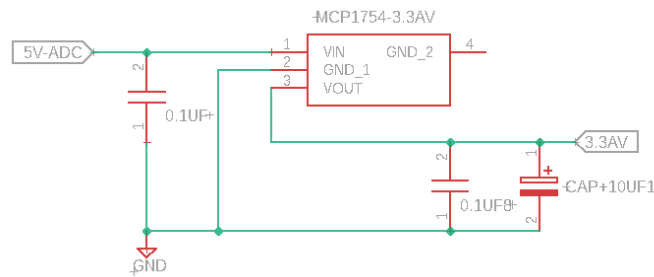


Figura 26

Diagrama de conexión del MCP1754



Alimentación del Raspberry Pi 4

Figura 27

Diagrama de conexión del BD90FD0

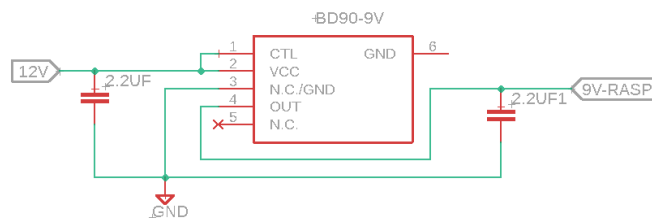
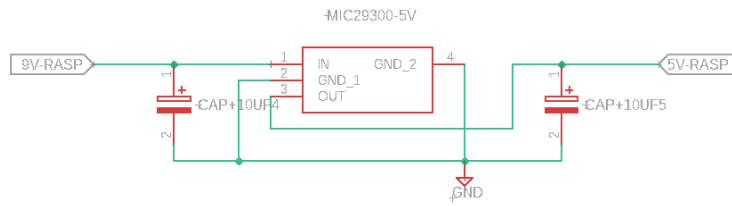


Figura 28

Diagrama de conexión del MIC29300



Alimentación de los sensores

Figura 29

Diagrama de conexión del LT3045-7.5V

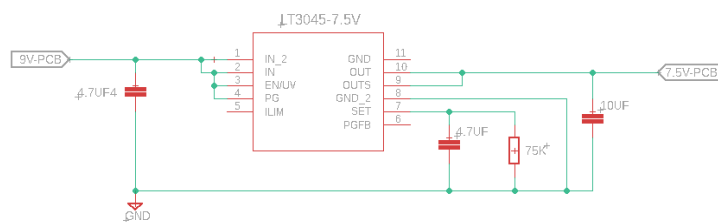
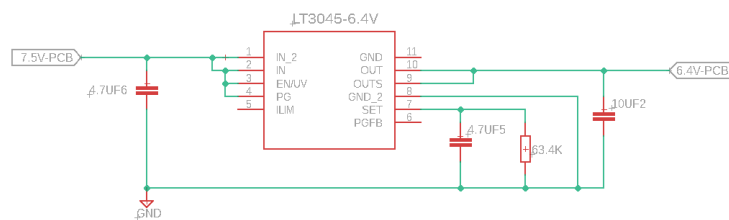


Figura 30

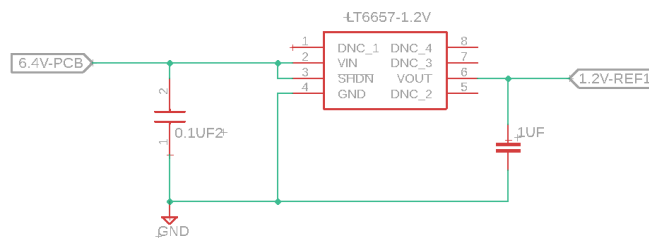
Diagrama de conexión del LT3045-6.4V



Referencia de voltaje

Figura 31

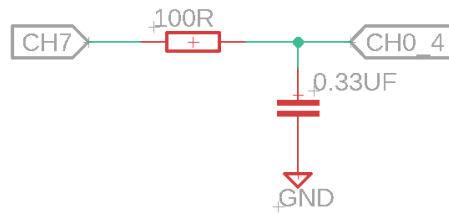
Diagrama de conexión del LT6657-1.2V



Filtro pasa baja

Figura 32

Diagrama de conexión del filtro pasa baja



b) Placa de Circuito Impreso – PCB

Cuando el diagrama esquemático se terminó, se empezó con el desarrollo de la placa de circuito impreso. Esta PCB fue diseñada para que pueda ser colocada encima del Raspberry Pi y tiene unas dimensiones no mayores a la placa de desarrollo. En las figuras 33 y 34 se pueden apreciar las vistas superior e inferior de la PCB.

Figura 33

Vista superior de la PCB

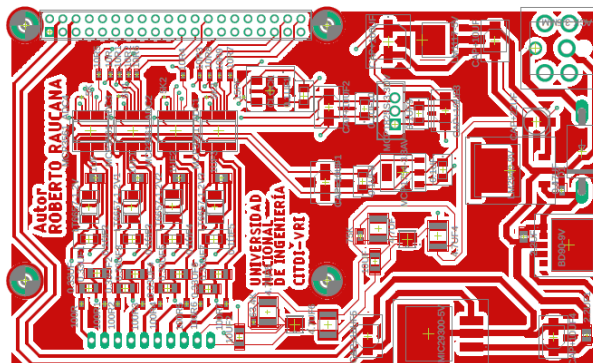
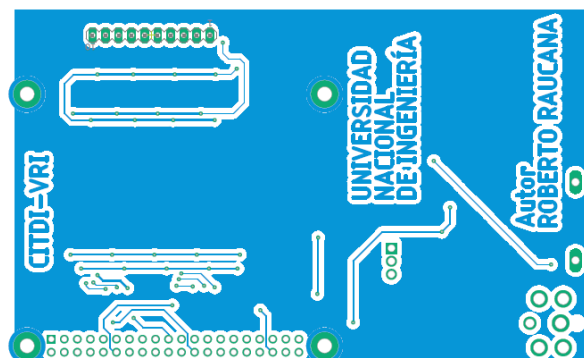


Figura 34

Vista inferior de la PCB

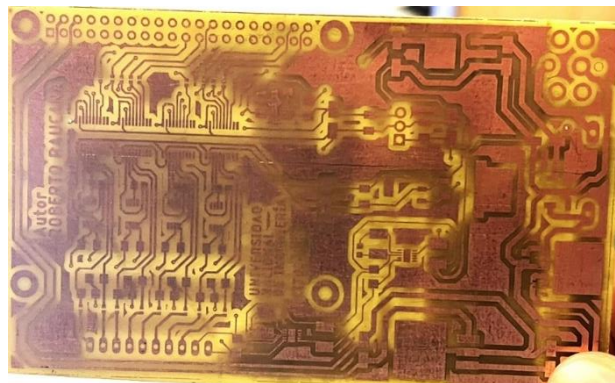


c) Construcción de la placa de adquisición de señales

La fabricación de la PCB se llevó a cabo en una lámina de baquelita de fibra de vidrio con dimensiones de 70 x 115 mm. Esta placa se produjo mediante la técnica de transferencia de calor, utilizando una impresora láser para imprimir la imagen del diseño de la PCB en papel couché, y posteriormente, transfiriendo la tinta del papel a la baquelita mediante una laminadora. Después de que ambas caras de la baquelita estuvieran impregnadas de tinta de las imágenes inferior y superior del diseño de la PCB, la placa se sumergió en ácido para eliminar las áreas no deseadas de cobre. De esta manera, se concluyó la construcción de la PCB, como se aprecia en la figura 35.

Figura 35

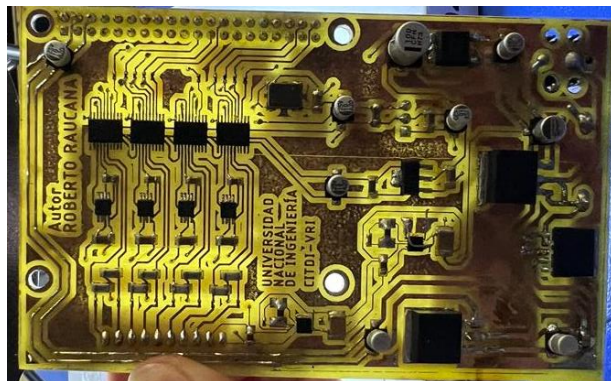
Placa PCB fabricada



Una vez completada la fabricación de la PCB, se procedió a perforar los agujeros necesarios para los pernos y las conexiones, seguido por la soldadura de los componentes. El producto final puede ser observado en la figura 36.

Figura 36

Placa de adquisición de señales



3.1.5 Estructura de protección

La estructura de protección protege a los componentes electrónicos del medio exterior, esta debe cumplir con la norma de protección IP68 contra agua y polvo. Esto es esencial, ya que las pruebas estándar de penetración se llevan a cabo en entornos donde puede haber lluvia, polvo, entre otros. Además, en contraste con el analizador SPT, el nuevo analizador debe tener dimensiones más compactas para acomodar todos los componentes de manera adecuada.

Por lo mencionado anteriormente, se utilizó la caja AN-1321-AB. La caja AN-1321-AB de Bud Industries es una caja eléctrica de aluminio en color negro, con dimensiones de 6.9 x 3.2 x 2.4 pulgadas. Diseñada para aplicaciones que requieren protección contra agua y polvo, cuenta con una clasificación IP68 y cumple con los estándares NEMA 1, 2, 4, 4X, 6, 6P, 12 y 13. Su material de construcción es aleación de aluminio y tiene un peso de 462.6 g. (Mouser Electronics, 2023).

Figura 37

Caja de protección AN-1321-AB



El resto de los componentes que se instalarán en la superficie de la caja incluyen un terminal circular de 19 pines destinado a la conexión de los sensores, un terminal RJ45 para la transmisión de datos hacia la laptop o computadora, y un terminal USB tipo C para la entrada de alimentación de la batería. Es importante destacar que todos estos componentes están diseñados con una clasificación de protección IP68, asegurando así su resistencia al agua y al polvo.

3.1.6 Integración de los componentes

En el proceso de integración de los componentes, se llevaron a cabo las conexiones mediante soldadura en frío de los terminales a la caja de protección. Además, el Raspberry Pi se fijó utilizando un juego de tornillos y la placa de adquisición de señales se instaló encima del raspberry y se sujetó con 4 pernos. La figura 38 ilustra el dispositivo Kallpa con la tapa abierta, revelando todos los componentes. Posteriormente, en la figura 39, se presenta el dispositivo Kallpa cerrado y listo para su utilización.

Figura 38

Componentes del dispositivo Kallpa

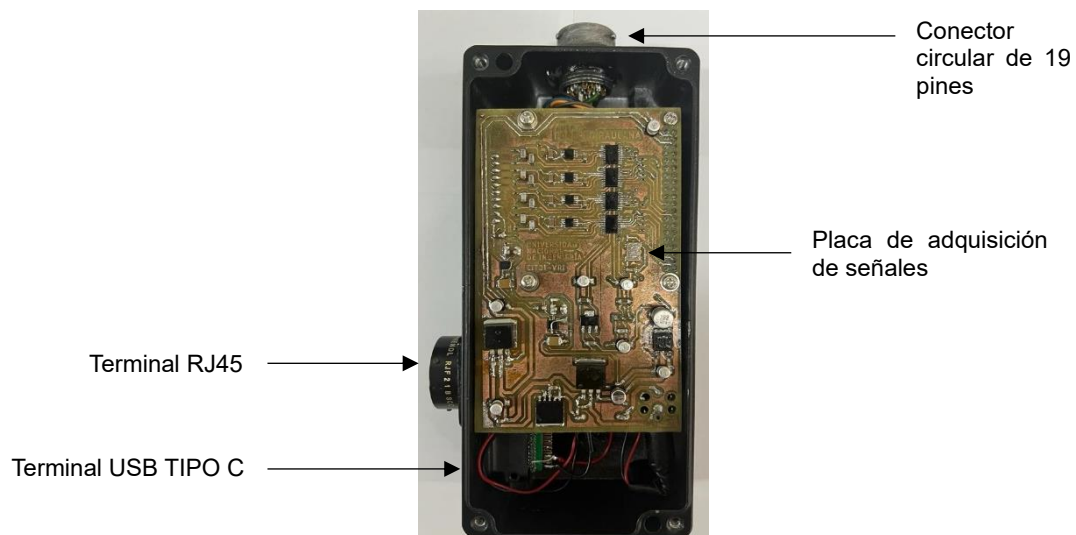


Figura 39

Dispositivo Kallpa



3.2 Desarrollo del software Kallpa Processor

En esta sección, se aborda el proceso de desarrollo del software Kallpa Processor y se detallan las herramientas esenciales para su correcto funcionamiento. El objetivo principal del software Kallpa Processor es recopilar la información proveniente del dispositivo Kallpa. Su funcionalidad principal consiste en mostrar gráficos en tiempo real de variables como aceleración, velocidad, desplazamiento, deformación, fuerza y energía, de manera similar al analizador SPT.

3.2.1 Desarrollo del código en el dispositivo Kallpa

Con el propósito de que el dispositivo Kallpa transmita la información de los sensores conectados a él, se ha desarrollado un código que se ejecuta simultáneamente con el encendido del dispositivo. Este código tiene la función de establecer la conexión con el software Kallpa Processor, configurar los convertidores analógico-digitales (ADC), leer los datos de aceleración y deformación, y enviar la información a la computadora cuando detecta un impacto.

El Raspberry Pi soporta varios lenguajes de programación como Python, C, C++ y Java. Para este proyecto, se eligió el lenguaje C debido a su mayor rendimiento en comparación con los demás. Por lo tanto, el código presentado en las siguientes secciones está escrito en C.

a) Conexión del dispositivo Kallpa y el software Kallpa Processor

Para establecer una conexión entre los dos programas involucrados en el proyecto, se identificaron dos métodos principales para la transmisión de datos hacia la computadora. El primer método implementado fue el uso del protocolo de comunicación UART, aprovechando los pines GPIO TX y RX disponibles en el Raspberry Pi. Sin embargo, esta modalidad de comunicación resultó ser insuficiente en términos de velocidad para satisfacer los requerimientos del proyecto. En consecuencia, se procedió a explorar la segunda

alternativa, que consiste en la transmisión de datos mediante el protocolo Ethernet.

Utilizando la biblioteca **<socket.h>**, es posible establecer un servidor, permitiendo así que el software Kallpa Processor actúe como cliente al conectarse al Raspberry Pi. Al ejecutar el programa, la primera acción del código consiste en crear dicho servidor y permanecer en espera de la conexión de un cliente. Una vez establecida la conexión, se procede a configurar los conversores analógico-digital (ADCs) y a recibir instrucciones del software Kallpa Processor. En caso de finalizar la comunicación, el código está diseñado para detectar esta interrupción y reiniciar el sistema. Por tanto, la implementación del socket, así como la configuración de los conversores analógico-digital (ADCs) y el envío de datos, se lleva a cabo en un hilo de ejecución secundario. Este enfoque permite que, mientras un hilo se encarga del envío de datos, otro simultáneamente monitorea la existencia y estado de la conexión.

b) Configuración ADC MCP3564

El MCP3564 se caracteriza por su alta capacidad de configuración. Mediante la modificación de sus registros, es posible ajustar diversos parámetros como el modo de conversión, la selección del reloj, la relación de sobremuestreo, la ganancia del ADC, el formato de los datos y la selección de entradas MUX, entre otros aspectos. La configuración de este ADC se realiza a través del envío de bytes utilizando su puerto SPI, lo que permite alterar los registros de configuración del dispositivo.

Para la configuración de la comunicación SPI en el Raspberry Pi, se seleccionó la biblioteca **<pigpio.h>**. Esta biblioteca se destaca por su capacidad de controlar los puertos GPIO del Raspberry Pi, facilitando así velocidades de comunicación SPI más altas en comparación con otras bibliotecas disponibles.

A continuación, se detallarán los registros específicos que deben modificarse para asegurar el funcionamiento óptimo del ADC.

Registro CONFIG0

Figura 40

Registro CONFIG0

8.2 CONFIG0 Register

Name	Bits	Address	Cof
CONFIG0	8	0x1	R/W

REGISTER 8-2: CONFIG0: CONFIGURATION REGISTER 0

R/W-1	R/W-1	R/W-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0
CONFIG0[7:6]		CLK_SEL[1:0]		CS_SEL[1:0]		ADC_MODE[1:0]
bit 7						bit 0

Legend:			
R = Readable bit	W = Writable bit	U = Unimplemented bit, read as '0'	
-n = Value at POR	*1 = Bit is set	'0' = Bit is cleared	x = Bit is unknown

bit 7-6	CONFIG0[7:6]: Full Shutdown Mode Enable These bits are writable but have no effect except that they force Full Shutdown mode when they are set to '00' and when all other CONFIG0 bits are set to '0'.
bit 5-4	CLK_SEL[1:0]: Clock Selection 11 = Internal clock is selected and AMCLK is present on the analog master clock output pin 10 = Internal clock is selected and no clock output is present on the CLK pin 01 = External digital clock 00 = External digital clock (default)
bit 3-2	CS_SEL[1:0]: Current Source/Sink Selection Bits for Sensor Bias (source on V_{IN+}/sink on V_{IN-}) 11 = 15 μ A is applied to the ADC inputs 10 = 3.7 μ A is applied to the ADC inputs 01 = 0.9 μ A is applied to the ADC inputs 00 = No current source is applied to the ADC inputs (default)
bit 1-0	ADC_MODE[1:0]: ADC Operating Mode Selection 11 = ADC Conversion mode 10 = ADC Standby mode 01 = ADC Shutdown mode 00 = ADC Shutdown mode (default)

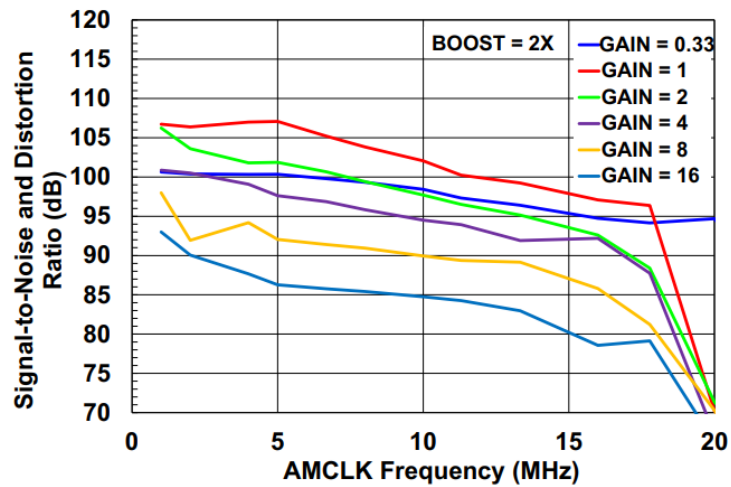
Nota. Adaptado de MCP3561/2/4 [figura], 2022, Microchip Technology.

(https://www.mouser.pe/datasheet/2/268/MCP3561_2_4_Family_Data_Sheet_DS20006181C-2257924.pdf).

Los primeros dos bits CONFIG0[7:6] se configuraron en "0" como indica la figura 40. Para la configuración de los bits CLK_SEL (selección del reloj) es importante saber que el MCP3564 tiene un reloj interno con una frecuencia entre 3.3 MHz y 6.6 MHz. Sin embargo, este ADC puede soportar velocidades hasta 20 MHz conectando un reloj externo en el pin MCLKIN del ADC. Es relevante destacar que el uso de un reloj externo en el ADC no solo incrementa la frecuencia del reloj, sino que también aumenta el ruido en la señal, como se evidencia en la figura 41. De ahí que se decidió utilizar un reloj de 18 MHz para que el ruido no afecte tanto la señal y que los datos se puedan transmitir sin demora alguna. Por esto, los bits de CLK_SEL se configuran como "00" (reloj digital externo).

Figura 41

SINAD vs. AMCLK – BOOST 2x



Nota. Adaptado de MCP3561/2/4 [figura], 2022, Microchip Technology.

(https://www.mouser.pe/datasheet/2/268/MCP3561_2_4_Family_Data_Sheet_DS20006181C-2257924.pdf).

Los bits de CS_SEL, como se muestra en la Figura 40, se emplean para determinar la corriente de polarización en las entradas de los sensores acoplados a los ADCs. Según las especificaciones del fabricante, esta corriente de polarización presenta una variabilidad del 20%. Dado que se utilizan cuatro ADCs en el proyecto, es probable que, al seleccionar un valor uniforme de corriente de polarización para todos ellos, en la práctica, cada ADC experimente ligeras variaciones en dicha corriente. Esto podría resultar en mediciones significativamente diferentes al conectar el mismo sensor a distintos ADCs. Por tanto, se optó por no aplicar corriente de polarización a las entradas de los ADCs, configurando los bits de CS_SEL en "00".

El ADC es compatible con tres modos de operación: modo de conversión, modo de espera y modo apagado. Dado que la configuración de estos registros se realiza al inicio del proceso de muestreo, se selecciona el modo de conversión. Por ende, los bits correspondientes a ADC_MODE se ajustan en "11", como se detalla en la figura 40.

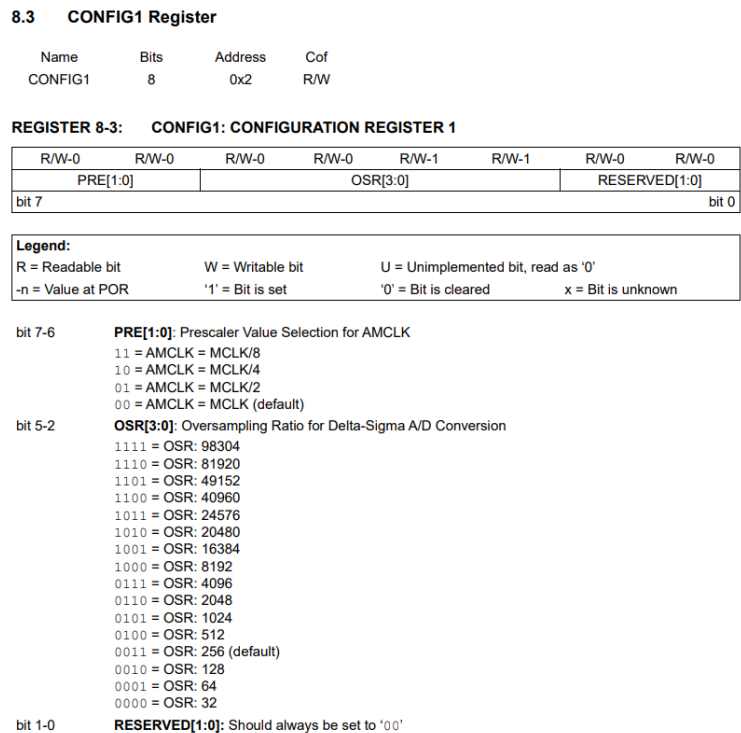
Registro CONFIG1

La frecuencia del reloj puede ser disminuida mediante la configuración de los bits PRE, como se ilustra en la figura 42. Sin embargo, para este caso, es esencial mantener la

frecuencia del reloj externo sin reducción. Por lo tanto, los bits PRE se ajustan a "00".

Figura 42

Registro CONFIG1



Nota. Adaptado de MCP3561/2/4 [figura], 2022, Microchip Technology.

(https://www.mouser.pe/datasheet/2/268/MCP3561_2_4_Family_Data_Sheet_DS20006181C-2257924.pdf).

La Relación de Sobremuestreo (OSR) determina la proporción entre la frecuencia de muestreo y la tasa de datos de salida en un ADC. Un OSR elevado incrementa la resolución y disminuye el ruido en las mediciones digitales, sobre muestreando la señal más allá de la frecuencia mínima necesaria. Esto mejora la calidad de la señal, pero incrementa la demanda de procesamiento y memoria. Debido a esto, se optó por un OSR bajo para los ADCs, ya que, como se muestra en la figura 43, un OSR alto disminuye significativamente la tasa de salida de datos. Se realizaron pruebas con distintos valores de OSR, y se observó que la frecuencia de muestreo total no excedía los 50 kHz. Por lo tanto, se decidió priorizar la velocidad de conversión sobre la calidad de la señal. En consecuencia, los bits 5-2 del registro CONFIG1 se ajustaron a "0000" para un OSR de 32. Los últimos bits del registro CONFIG1 se configuraron como "00", según lo indicado en la figura 42.

Figura 43

Relación entre el sobre muestreo y la conversión de datos

OSR[3:0]	OSR ₃	OSR ₁	Total OSR	ADC Resolution in Bits (No Missing Codes)	Conversion Time (T _{conv})	Data Rate in Continuous Conversion Mode	
						Data Rate (Hz) with MCLK = 4.9152 MHz	Fastest Data Rate (Hz) with MCLK = 19.6608 MHz
0 0 0 0	32	1	32	16	96/DMCLK	38400	153600
0 0 0 1	64	1	64	19	192/DMCLK	19200	76800
0 0 1 0	128	1	128	22	384/DMCLK	9600	38400
0 0 1 1	256	1	256	24	768/DMCLK	4800	19200
0 1 0 0	512	1	512	24	1536/DMCLK	2400	9600
0 1 0 1	512	2	1024	24	2048/DMCLK	1200	4800
0 1 1 0	512	4	2048	24	3072/DMCLK	600	2400
0 1 1 1	512	8	4096	24	5120/DMCLK	300	1200
1 0 0 0	512	16	8192	24	9216/DMCLK	150	600
1 0 0 1	512	32	16384	24	17408/DMCLK	75	300
1 0 1 0	512	40	20480	24	21504/DMCLK	60	240
1 0 1 1	512	48	24576	24	25600/DMCLK	50	200
1 1 0 0	512	80	40960	24	41984/DMCLK	30	120
1 1 0 1	512	96	49152	24	50176/DMCLK	25	100
1 1 1 0	512	160	81920	24	82944/DMCLK	15	60
1 1 1 1	512	192	98304	24	99328/DMCLK	12.5	50

Nota. Adaptado de MCP3561/2/4 [figura], 2022, Microchip Technology.

(https://www.mouser.pe/datasheet/2/268/MCP3561_2_4_Family_Data_Sheet_DS20006181C-2257924.pdf).

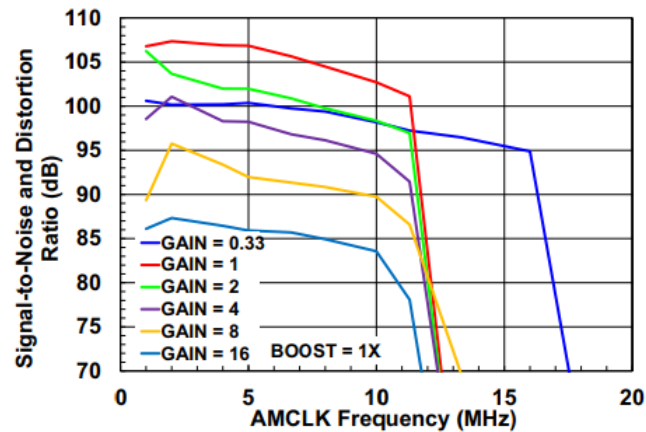
Registro CONFIG2

El registro CONFIG2 (ver figura 45) del ADC, localizado en la dirección 0x3, incluye configuraciones para la corriente de polarización (BOOST), la ganancia del ADC (GAIN), y el ajuste del multiplexor de auto-cero (AZ_MUX).

En el ADC, los bits BOOST regulan la corriente del canal, con ajustes que van desde el doble hasta la mitad de la corriente estándar. La figura 44 ilustra la relación entre SINAD y AMCLK para un BOOST de 2x, donde se observa que una frecuencia de reloj de 18MHz está representada en la gráfica. Sin embargo, como se muestra en la figura 44, con un BOOST reducido a x1, la velocidad máxima de reloj que el ADC puede manejar es aproximadamente 13 MHz. Por lo tanto, para emplear un reloj de 18 MHz, es necesario configurar el BOOST en 2x. Por esto, los bits BOOST fueron configurados en "11".

Figura 44

SINAD vs. AMCLK – BOOST 1x



Nota. Adaptado de MCP3561/2/4 [figura], 2022, Microchip Technology.

(https://www.mouser.pe/datasheet/2/268/MCP3561_2_4_Family_Data_Sheet_DS20006181C-2257924.pdf).

En el ADC, los bits GAIN ofrecen un rango de selección de ganancia que varía desde x64 hasta x1/3, con x1 establecido como el valor predeterminado. Para determinar la ganancia adecuada para cada sensor, se realizaron los siguientes cálculos. Primero, se calculó la diferencia de voltaje máxima alcanzable por cada tipo de sensor, utilizando su sensibilidad específica. Segundo, considerando el voltaje de referencia de 1.24V, seleccionado en la sección 3.1.3, se determinó la ganancia adecuada para que los valores de voltaje que pueda leer el ADC se ajusten al rango de los valores máximos de cada sensor. Este procedimiento y sus resultados se detallan en las tablas 2 para los acelerómetros y 3 para los deformímetros.

Tabla 2

Cálculo de la ganancia para el acelerómetro

Acelerómetro	
Sensibilidad	64.1 uV/g
Valor max (10000 g's)	641 mV
ADC	
Referencia voltaje	1.24 V
Ganancia	2 gain
Rango de voltaje	620 mV

Tabla 3

Cálculo de la ganancia para el deformímetro

Deformímetro		
Sensibilidad	600	ue/mV/V
Voltaje	6.4	V
Sensibilidad	10.6667	uV/ue
Valor max (8000 ue)	85.336	mV
ADC		
Referencia voltaje	1.24	V
Ganancia	16	gain
Rango de voltaje	77.5	mV

Conforme a lo presentado en las tablas 2 y 3, se determinó que la ganancia óptima para los acelerómetros es de x2 y para los deformímetros, de x16. En consecuencia, los bits GAIN se configurarán en “010” para los acelerómetros y “101” para los deformímetros.

Figura 45

Registro CONFIG2

8.4 CONFIG2 Register

Name	Bits	Address	Cof
CONFIG2	8	0x3	R/W

REGISTER 8-4: CONFIG2: CONFIGURATION REGISTER 2

R/W-1	R/W-0	R/W-0	R/W-0	R/W-1	R/W-0	R/W-1	R/W-1
BOOST[1:0]		GAIN[2:0]		AZ_MUX	RESERVED[1:0]		
bit 7					bit 0		

Legend:			
R = Readable bit	W = Writable bit	U = Unimplemented bit, read as '0'	
-n = Value at POR	'1' = Bit is set	'0' = Bit is cleared	x = Bit is unknown

- bit 7-6 **BOOST[1:0]:** ADC Bias Current Selection
 11 = ADC channel has current x 2
 10 = ADC channel has current x 1 (default)
 01 = ADC channel has current x 0.66
 00 = ADC channel has current x 0.5
- bit 5-3 **GAIN[2:0]:** ADC Gain Selection
 111 = Gain is x64 (x16 analog, x4 digital)
 110 = Gain is x32 (x16 analog, x2 digital)
 101 = Gain is x16
 100 = Gain is x8
 011 = Gain is x4
 010 = Gain is x2
 001 = Gain is x1 (default)
 000 = Gain is x1/3
- bit 2 **AZ_MUX:** Auto-Zeroing MUX Setting
 1 = ADC auto-zeroing algorithm is enabled. This setting multiplies the conversion time by two and does not allow Continuous Conversion mode operation (which is then replaced by a series of consecutive One-Shot mode conversions).
 0 = Analog input multiplexer auto-zeroing algorithm is disabled (default)
- bit 1-0 **RESERVED[1:0]:** Should always be equal to '11'

Nota. Adaptado de MCP3561/2/4 [figura], 2022, Microchip Technology.

(https://www.mouser.pe/datasheet/2/268/MCP3561_2_4_Family_Data_Sheet_DS20006181C-2257924.pdf).

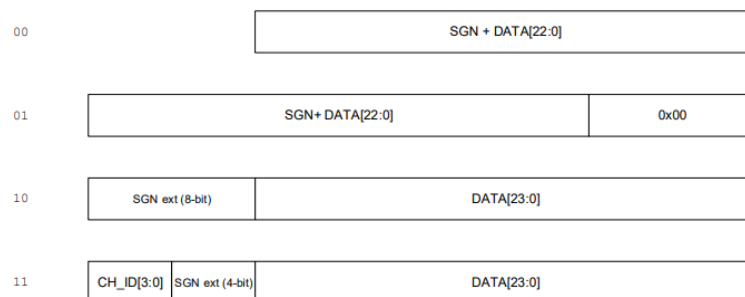
El bit AZ_MUX en el ADC gestiona el algoritmo de auto-cero, influyendo en el tiempo de conversión y en el modo operativo. Debido a su impacto en el tiempo de conversión, se decidió desactivar este algoritmo, estableciendo el bit AZ_MUX en "0". Adicionalmente, es necesario mantener siempre los bits RESERVED configurados en '11' tal como indica la figura 45.

Registro CONFIG3

Las configuraciones más cruciales en este registro son el modo de conversión y el formato de salida del ADC. El modo continuo de conversión permite que el ADC, tras completar una conversión de datos, no entre en modo de espera o se apague, sino que proceda inmediatamente a realizar una nueva conversión. Esta operación continua es esencial para la recopilación constante de datos. Por lo tanto, los bits asignados a CONV_MODE se establecen en "11", asegurando que el ADC opere en este modo continuo de conversión.

Figura 46

Selección del formato de salida del ADC



Nota. Adaptado de MCP3561/2/4 [figura], 2022, Microchip Technology.

(https://www.mouser.pe/datasheet/2/268/MCP3561_2_4_Family_Data_Sheet_DS20006181C-2257924.pdf).

En la configuración del formato de datos, se dispone de cuatro opciones (ver figura 46). Se eligió el formato "01", en el cual la información digitalizada del ADC se transmite en un conjunto de tres bytes (en este caso, 2 bytes o 16 bits). La velocidad de muestreo es un factor crítico, influenciada por el tiempo de comunicación entre el Raspberry Pi y los ADCs. Al transmitir 4 bytes, como en los modos "00", "10" y "11", el Raspberry Pi tarda más en leer estos datos en comparación con los tres bytes del modo "01". El modo "11" es recomendable

en el modo SCAN del ADC, cuando se lee de múltiples canales y es necesario identificar a qué canal pertenece cada dato. Sin embargo, al utilizar un canal fijo, esta identificación no es necesaria. El formato “10” se emplea para agregar un bit de signo adicional a los 16 o 24 bits de datos. Dado que la norma ASTM D 4633 no especifica que los 16 bits deban incluir un bit de signo adicional, se optó por el formato “01” para minimizar el tiempo de lectura de datos por parte del Raspberry Pi.

Los valores de los registros restantes se mantuvieron en sus configuraciones predeterminadas, tal como se especifica en la figura 47.

Figura 47

Registro CONFIG3

bit 7-6	<p>CONV_MODE[1:0]: Conversion Mode Selection</p> <p>11 = Continuous Conversion mode or continuous conversion cycle in SCAN mode</p> <p>10 = One-shot conversion or one-shot cycle in SCAN mode. It sets ADC_MODE[1:0] to '10' (standby) at the end of the conversion or at the end of the conversion cycle in SCAN mode.</p> <p>0x = One-shot conversion or one-shot cycle in SCAN mode. It sets ADC_MODE[1:0] to '0x' (ADC Shutdown) at the end of the conversion or at the end of the conversion cycle in SCAN mode (default).</p>
bit 5-4	<p>DATA_FORMAT[1:0]: ADC Output Data Format Selection</p> <p>11 = 32-bit (25-bit right justified data + Channel ID): CHID[3:0] + SGN extension (4 bits) + 24-bit ADC data. It allows overrange with the SGN extension.</p> <p>10 = 32-bit (25-bit right justified data): SGN extension (8-bit) + 24-bit ADC data. It allows overrange with the SGN extension.</p> <p>01 = 32-bit (24-bit left justified data): 24-bit ADC data + 0x00 (8-bit). It does not allow overrange (ADC code locked to 0xFFFFF or 0x800000).</p> <p>00 = 24-bit (default ADC coding): 24-bit ADC data. It does not allow overrange (ADC code locked to 0xFFFFF or 0x800000).</p>
bit 3	<p>CRC_FORMAT: CRC Checksum Format Selection on Read Communications (it does not affect CRCCFG coding)</p> <p>1 = 32-bit wide (CRC-16 followed by 16 zeros)</p> <p>0 = 16-bit wide (CRC-16 only) (default)</p>
bit 2	<p>EN_CRCCOM: CRC Checksum Selection on Read Communications (it does not affect CRCCFG calculations)</p> <p>1 = CRC on communications enabled</p> <p>0 = CRC on communications disabled (default)</p>
bit 1	<p>EN_OFFCAL: Enable Digital Offset Calibration</p> <p>1 = Enabled</p> <p>0 = Disabled (default)</p>
bit 0	<p>EN_GAINCAL: Enable Digital Gain Calibration</p> <p>1 = Enabled</p> <p>0 = Disabled (default)</p>

Nota. Adaptado de MCP3561/2/4 [figura], 2022, Microchip Technology.

(https://www.mouser.pe/datasheet/2/268/MCP3561_2_4_Family_Data_Sheet_DS20006181C-2257924.pdf).

Registro MUX

Estas configuraciones permiten determinar qué señales o fuentes internas o externas deben ser medidas por el ADC, brindando flexibilidad para diversas aplicaciones, desde la medición de temperaturas internas hasta la lectura de señales en canales específicos. Para la aplicación en cuestión, se seleccionarán los canales CH0 y CH1. La configuración implica conectar la salida OUT+ del sensor (strain gauge o acelerómetro) al CH0 y la salida OUT- del mismo sensor al CH1, lo que permite al ADC digitalizar la diferencia entre estas señales. Así,

el registro MUX se configura en “00000001”.

Figura 48

Registro MUX

Bit 7-4	MUX_VIN+ Input Selection^(2,3) 1111 = Internal V _{CM} 1110 = Internal Temperature Sensor Diode M (Temp Diode M) ⁽¹⁾ 1101 = Internal Temperature Sensor Diode P (Temp Diode P) ⁽¹⁾ 1100 = REFIN- 1011 = REFIN+ 1010 = Reserved (do not use) 1001 = AV _{DD} 1000 = A _{GND} 0111 = CH7 0110 = CH6 0101 = CH5 0100 = CH4 0011 = CH3 0010 = CH2 0001 = CH1 0000 = CH0 (default)
Bit 3-0	MUX_VIN- Input Selection^(2,3) 1111 = Internal V _{CM} 1110 = Internal Temperature Sensor Diode M (Temp Diode M) ⁽¹⁾ 1101 = Internal Temperature Sensor Diode P (Temp Diode P) ⁽¹⁾ 1100 = REFIN- 1011 = REFIN+ 1010 = Reserved (do not use) 1001 = AV _{DD} 1000 = A _{GND} 0111 = CH7 0110 = CH6 0101 = CH5 0100 = CH4 0011 = CH3 0010 = CH2 0001 = CH1 (default) 0000 = CH0

Nota. Adaptado de MCP3561/2/4 [figura], 2022, Microchip Technology.

(https://www.mouser.pe/datasheet/2/268/MCP3561_2_4_Family_Data_Sheet_DS20006181C-2257924.pdf).

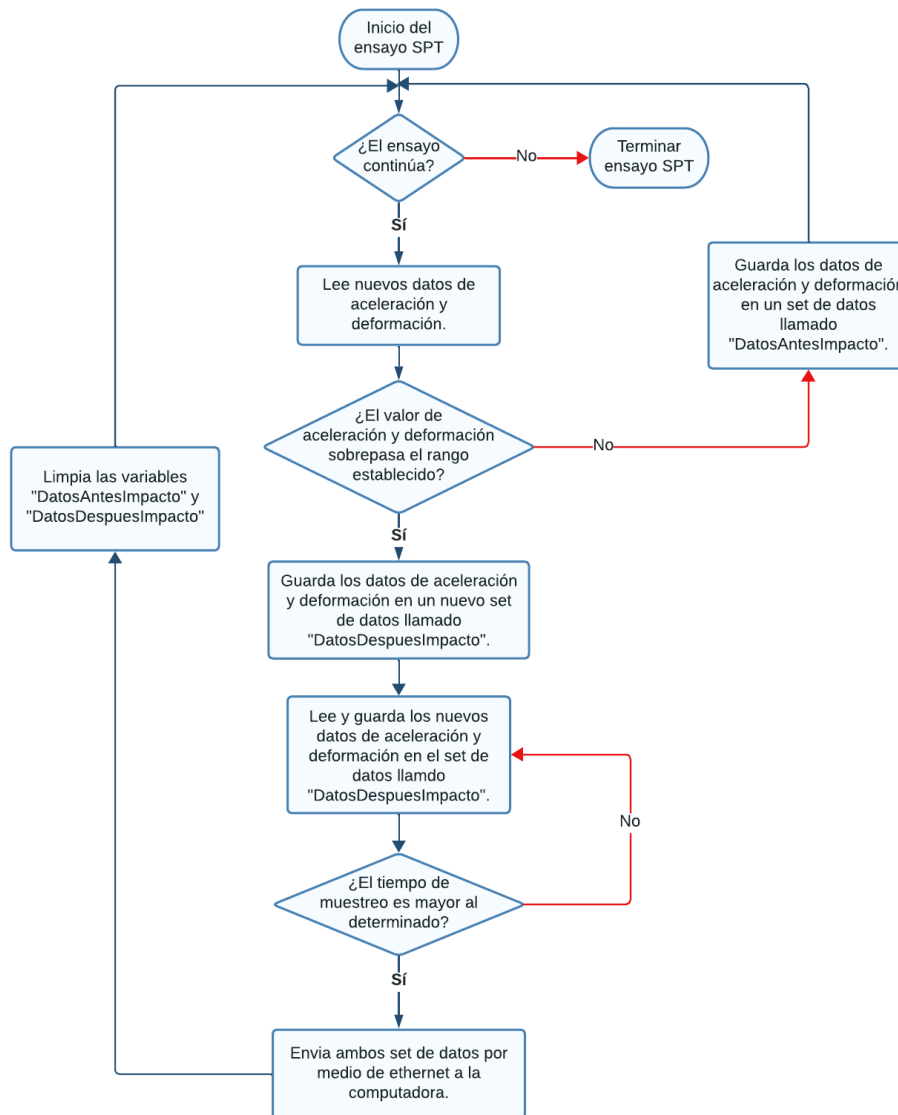
Todos estos registros se almacenan en el Raspberry Pi y se envían a los ADC's cuando el programa recibe alguna señal de conexión del cliente (Kallpa Processor).

c) Lectura y envío de datos

Al recibir la señal de inicio del ensayo SPT de la laptop, el dispositivo Kallpa activa su programa para iniciar la lectura y transmisión de datos de aceleración y deformación. El proceso de lectura de datos se pone en marcha y solo se procede al envío de estos cuando los valores de aceleración y deformación exceden un rango predeterminado, tal y como se detalla en el diagrama de flujo de la figura 49.

Figura 49

Diagrama de flujo detección de impactos



3.2.2 Software Kallpa Processor

El software se planificó originalmente para ser desarrollado en Python, seleccionado por su flexibilidad y otras ventajas como su sintaxis intuitiva, amplia comunidad de soporte y la eficiencia en el manejo de datos. Además, las bibliotecas NumPy y ObsPy son fundamentales para simplificar los cálculos de magnitudes, los cuales se detallarán en la sección 5.3, enfocada en el Desarrollo del procesamiento de señales.

En cuanto a la biblioteca elegida, customtkinter fue la seleccionada debido a sus beneficios como su facilidad de uso, compatibilidad con múltiples plataformas y capacidad para personalizar interfaces de usuario de manera efectiva. En este apartado se explicará las funcionalidades que tiene el software. Las fórmulas y cálculos para generar las magnitudes se detallarán en la sección 5.3.

a) Interfaz de inicio

Figura 50

Interfaz de inicio por defecto



Al ejecutar el programa se despliega la interfaz de inicio. El usuario tiene la opción de seleccionar la modalidad de visualización deseada, siendo esta entre el tema oscuro (DARK THEME) y el tema claro (LIGHT THEME).

Figura 51

Interfaz de inicio en modo oscuro



En esta ventana, en la esquina inferior izquierda, se encuentra disponible una sección

que incluye información detallada sobre la fecha y hora del sistema. Además, la interfaz dispone de una barra de herramientas que incluye seis botones, cada uno de ellos con funcionalidades específicas. A continuación, se proporcionará una descripción breve y concisa acerca de las utilidades que ofrecen dichos botones.

Exit

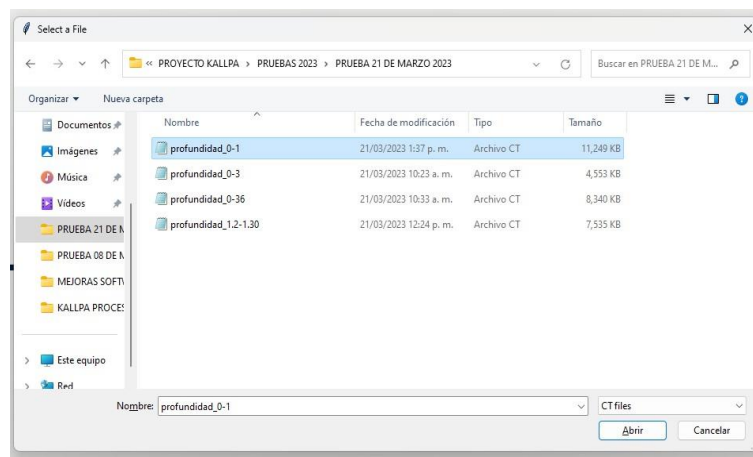
Este botón tiene como finalidad realizar la acción de finalización y cierre del sistema en cuestión, interrumpiendo así cualquier proceso o tarea en curso y desactivando los servicios y procesos asociados al programa.

Review

La función “Review” se utiliza para efectuar una inspección de los datos previamente registrados o creados con el programa; los cuales se identifican mediante las extensiones “.ct” o “.ctn”.

Figura 52

Selección de archivo “.ct”



Una vez seleccionado el archivo, se visualizan inicialmente las gráficas de aceleración y deformación. Además, es posible consultar las gráficas de velocidad, fuerza, desplazamiento y otras magnitudes.

En este apartado de la aplicación, también es posible generar un reporte en formato PDF que detalla los resultados del ensayo efectuado, el cual comprende información referente a diversos parámetros y variables, como velocidad, aceleración, deformación, energía y fuerza, entre otros. Además, se ofrece la posibilidad de exportar un archivo en formato Excel

que contiene un registro detallado de los datos obtenidos durante el impacto en cuestión, permitiendo su análisis y procesamiento posterior en una variedad de plataformas y herramientas de software.

En la sección izquierda se muestran tanto la cantidad de impactos como el impacto actual, junto con las principales magnitudes máximas y propiedades asociadas a dicho impacto.

Figura 53

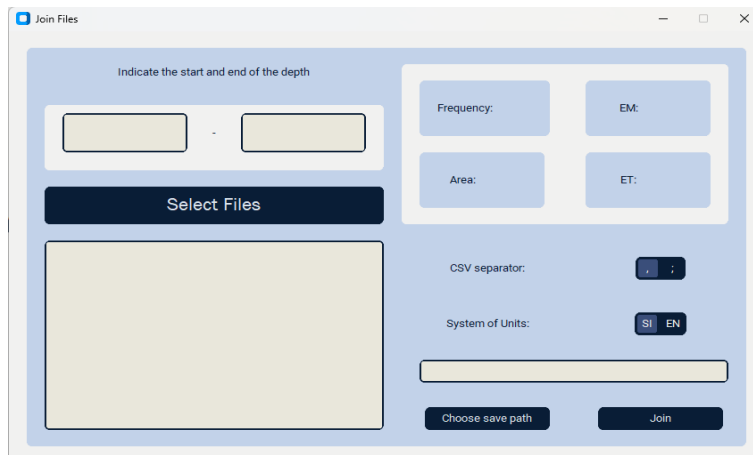
Visualización de impactos



Join Files

Este menú desempeña la función de generar archivos con la extensión “.ctn” para que puedan ser analizados por el programa. Estos archivos se crean a partir de los datos de impacto de aceleración y deformación guardados en formato “.csv”, donde se tiene un archivo “.csv” por cada impacto. Este segmento es esencial para permitir que el software procese y abra datos de aceleración y deformación que hayan sido creados externamente, no generados por el propio software. Así, es posible examinar y visualizar datos adicionales de impacto a través del uso de Kallpa Processor con la generación de estos archivos “.ctn”.

Figura 54
Ventana Join Files



Collect Wire

En esta sección se realiza la recolección y almacenamiento de los datos de impacto obtenidos por los sensores de aceleración y deformación durante los ensayos de penetración realizados en campo.

Al seleccionar la opción "Collect Wire", se accede a una nueva ventana donde se puede establecer la conexión con el dispositivo Kallpa y ajustar los parámetros de los ensayos.

Todas las funcionalidades disponibles en esta sección se explicarán con mayor detalle en la sección 5.2.2.

Figura 55
Ventana Collect Wire



Manual

Al activar el botón “Manual” se permite la descarga del Manual de Software del programa en formato PDF, lo que brinda a los usuarios una guía detallada y accesible de las funcionalidades y características de este software. Esta herramienta es particularmente útil para los usuarios que requieren una explicación más profunda del funcionamiento del software o para aquellos que se están familiarizando con él por primera vez. El manual de software proporciona información detallada sobre las opciones de configuración, los requisitos del sistema, los procedimientos de instalación, y otras características y funciones del programa.

About

La presente función permite visualizar a los desarrolladores que trabajaron en el Centro de Investigación en Transformación Digital en Ingeniería, que formaron parte del desarrollo del software. Esta información puede ser valiosa para los usuarios que deseen conocer más sobre el equipo de expertos que contribuyó en la creación del programa.

b) Configuración de recolección de datos

En la sección anterior se presentó una visión general de las capacidades del programa, mientras que en este apartado se examinará la configuración de parámetros necesarios para la adquisición de datos de los ensayos SPT.

Figura 56

Interfaz inicial Collect Wire

The image displays the initial configuration interface for the Collect Wire software, divided into five numbered sections:

- 1. SENSOR SELECTION:** Features buttons for "Connect to server" and "Update sensor order". It lists four sensors, all of which are currently "Not available".
- 2. DEPTH:** Includes a "Range of Depths (m)" input field and "LE" (Left End) and "LR" (Right End) depth inputs, both set to 0 m.
- 3. ROD PARAMETERS:** Shows "Area" set to 7.8 cm² and "Elasticity Modulus" set to 207000 Mpa.
- 4. HAMMER PARAMETERS:** Displays "Mass" as 63.5 kg and "Height" as 0.76 m. A "Calculate Energy" button is present, and the resulting "Energy" is shown as 473 J.
- 5. SAMPLING PARAMETERS:** Offers "Sampling Rate" options (50 kHz, 100 kHz, 150 kHz, 200 kHz), "Sampling time" (100 ms), and "Delay time" (10 ms). It also includes "System of Units" (SI and EN), a "Select save path" button, and a "Next" button.

Desde la interfaz de arranque al hacer clic en el botón “Collect Wire” se muestra la ventana en la figura 56. Esta ventana se divide en 5 secciones: (1) SENSOR SELECTION, (2) DEPTH, (3) ROD PARAMETERS, (4) HAMMER PARAMETERS y (5) SAMPLING PARAMETERS.

Sensor selection

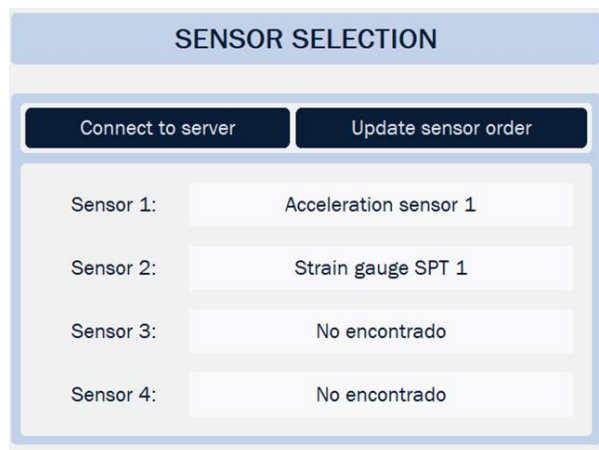
En esta sección se lleva a cabo la conexión del software con el dispositivo de adquisición de datos y se visualiza el orden de los sensores conectados al equipo. Al hacer clic en el botón de “Connect to server”, se establece la conexión (cliente hacia el servidor) y se actualiza la información del orden de los sensores.

Si el software ya se encuentra conectado con el servidor del dispositivo, pero se produce algún cambio en la disposición de los sensores, como agregar o quitar uno, se utiliza el botón de "Update sensor order" para reflejar la nueva disposición en la pantalla.

En la parte inferior de estos botones, se indica que el software es capaz de recolectar información de hasta cuatro sensores.

Figura 57

Detección de un sensor de aceleración y un sensor de deformación



Depth

En este apartado se introduce el rango de profundidad, LE (distancia desde los sensores hasta la punta de la varilla) y LP (distancia desde el suelo hasta la punta de la varilla). Asimismo, al presionar el botón “Back”, regresa a la pantalla inicial y sale del “Collect Wire”.

Figura 58

Colocación de rango de profundidades, LE y LP

The screenshot shows a software interface titled "DEPTH". It contains a "Range of Depths (m)" section with two input boxes containing the values "1" and "1.45", separated by a minus sign. Below this, there are two more input fields: "LE" with the value "1.65" and "m", and "LP" with the value "0.95" and "m". At the bottom of the interface is a dark blue button labeled "Back".

Rod parameters

En esta sección específica, se tiene que introducir el área y el módulo de elasticidad de la varilla, los cuales están estrechamente ligados al tipo de material que se emplea en su producción y al tipo de ensayo que se está realizando. Si bien el dispositivo Kallpa está orientado al ensayo SPT, este dispositivo también puede leer la energía en otros tipos de ensayo con distintas varillas y masa de martillo (Ensayos DPT, Cono P, etc). De este modo, se cumple con uno de los objetivos de esta investigación en crear un dispositivo personalizable a comparación del analizador SPT que únicamente funciona para ensayos SPT.

Figura 59

Información y/o cambio de datos del área y módulo de elasticidad de la varilla

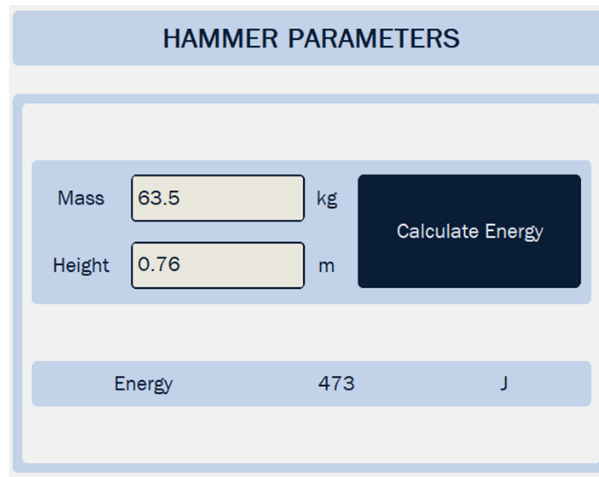
The screenshot shows a software interface titled "ROD PARAMETERS". It contains two input fields: "Area" with the value "7.8" and "cm²", and "Elasticity Modulus" with the value "207000" and "Mpa".

Hammer parameters

En este segmento, se requiere ingresar la información correspondiente a la masa del martillo que entra en contacto con la varilla, así como la altura desde la cual se deja caer. Una vez que estos datos son registrados, se procede a pulsar el botón "Calcular energía", con el fin de determinar la energía teórica que es transferida a la varilla.

Figura 60

Información y/o cambio de datos de la masa del martillo y altura de caída libre



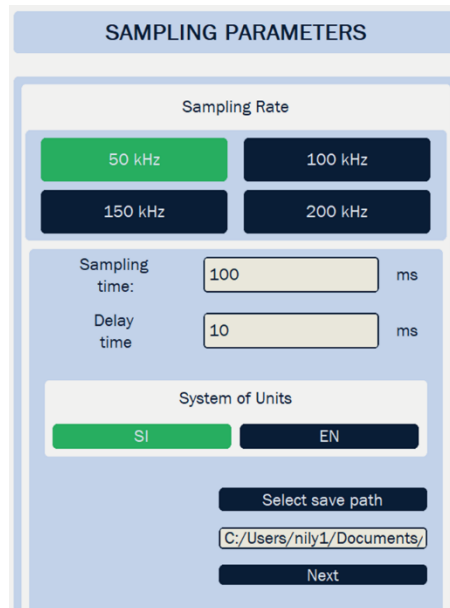
The image shows a software interface titled "HAMMER PARAMETERS". It contains two input fields: "Mass" with the value "63.5" and unit "kg", and "Height" with the value "0.76" and unit "m". To the right of these fields is a dark blue button labeled "Calculate Energy". Below the input fields is a light blue bar displaying the result: "Energy 473 J".

Sampling parameters

En este punto final, se debe elegir la frecuencia de muestreo en kHz, el tiempo de muestreo en milisegundos, el tiempo de retardo (el lapso previo al impacto), el sistema de unidades y la ubicación donde se guardará el nuevo archivo con extensión ".ct". Una vez que todos los parámetros han sido ingresados correctamente, se procede a presionar el botón "Next" para iniciar la recolección de la información.

Figura 61

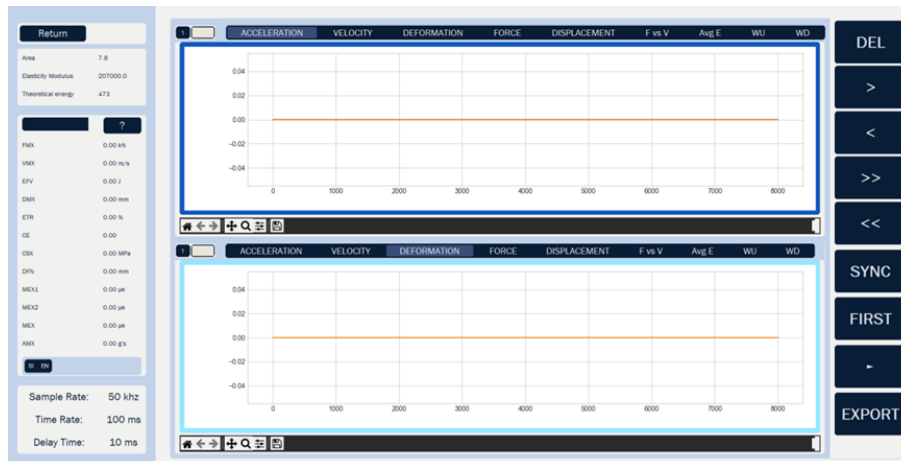
Parámetros de muestreo y ruta de guardado



c) Visualización de datos en tiempo real

Figura 62

Pantalla de espera para inicio del ensayo



Para dar inicio al ensayo se tiene que dar clic en el botón “play”, que se encuentra en la columna de la derecha en penúltima posición desde arriba hacia abajo. Al hacer clic en este botón, el programa envía la orden al equipo adquirente de señales para que empiece a enviar los registros de aceleración y deformación. Las gráficas se van actualizando luego de cada impacto y se puede ver la energía, aceleración, fuerza, entre otras magnitudes importantes del impacto en la sección izquierda (se detallará en la siguiente sección 5.2.4).

Cuando se quiera terminar el ensayo, se deberá presionar el botón “STOP” y confirmar la ventana de alerta que surgirá luego de hacer clic.

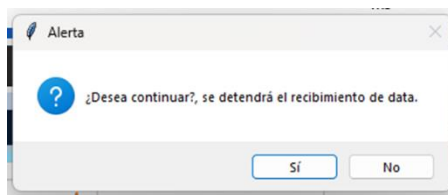
Figura 63

Botón play y stop para iniciar y detener el ensayo, respectivamente



Figura 64

Mensaje de alerta o confirmación para detener el recibimiento de datos



d) Operación básica del programa

En esta sección se verán más afondo las funcionalidades que tiene la sección “Review” al momento de abrir un archivo “.ct” o “.ctn” y “Collect wire”.

Figura 65

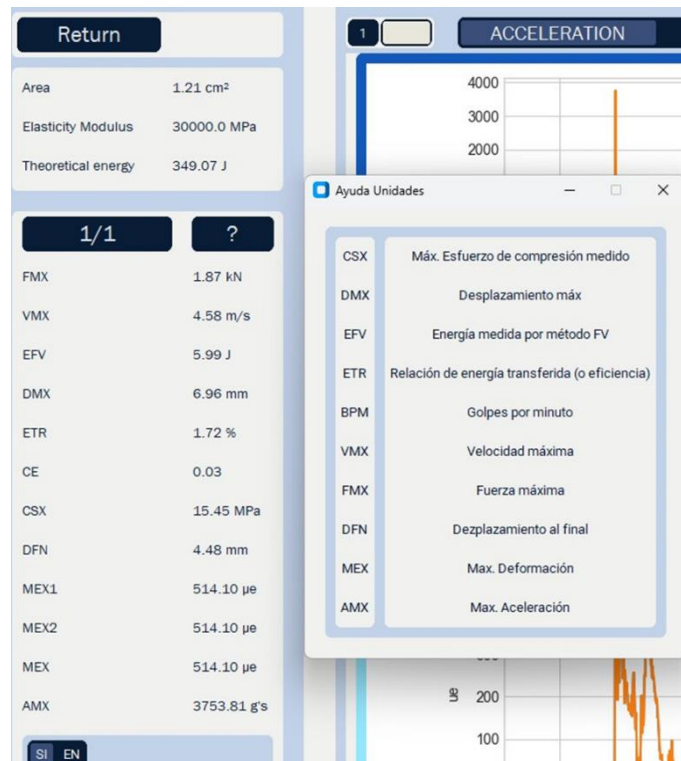
Pantalla de visualización dividida en 3 secciones



Sección lateral izquierda

Figura 66

Menú lateral izquierdo junto a la ventana del significado de magnitudes



En la sección izquierda del panel, se puede observar un menú informativo que presenta los datos calculados por los valores de aceleración y deformación. Adicionalmente, se encuentra disponible un botón "Return" que permite retornar al Menú Principal.

Seguidamente, se presentan los primeros datos obtenidos. También, hay dos botones disponibles: uno de ellos solo muestra el número de gráficas disponibles en un total determinado, mientras que el otro con el símbolo de interrogación "?" al ser presionado, muestra un menú desplegable con el significado de cada magnitud. Debajo de este par de botones se encuentran las magnitudes como fuerza máxima, velocidad máxima, deformación máxima, energía, etc (ver figura 66).

Por último, en la parte inferior de la sección, se ubica un interruptor que permite cambiar la unidad de medida del Sistema Internacional al Sistema Inglés.

Sección central

En la siguiente sección de revisión, se exhibe la representación gráfica de los datos

obtenidos por los sensores. En esta sección, se presentan dos gráficas que operan bajo la misma funcionalidad (ver figura 67). En el ejemplo proporcionado, la gráfica superior muestra la información recolectada bajo la categoría de "ACCELERACIÓN", mientras que la inferior presenta los datos de "DEFORMACIÓN". Se debe notar que la gráfica seleccionada es identificada mediante un borde de color azul.

Figura 67

Sección central



Se puede modificar la representación gráfica para visualizar diversas magnitudes, tales como "ACCELERATION", "VELOCITY", "DEFORMATION", "FORCE", "DISPLACEMENT", "FORCE VS VELOCITY", "ENERGY", "WU", "WD" al hacer clic sobre alguno de estos botones.

Sección lateral derecha

En la siguiente sección se encuentran botones con los que se pueden eliminar gráficas, cambiar gráficas de impacto, sincronizar ambas gráficas, entre otras funciones que se detallarán a continuación.

Figura 68

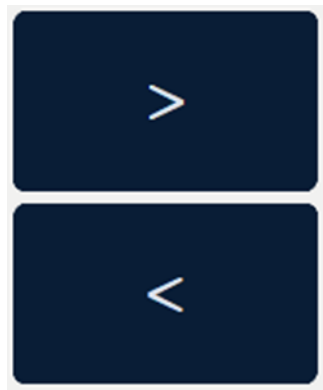
Botón "DEL"



La función "DEL" permite eliminar permanentemente un número de gráfica específico del archivo original, lo que puede resultar útil para eliminar datos erróneos o gráficas irrelevantes para los cálculos. Sin embargo, el usuario debe tener precaución, ya que una vez que se borra la gráfica, no se puede recuperar. Por lo tanto, el sistema envía un mensaje de alerta al usuario para confirmar si realmente desea borrar la gráfica.

Figura 69

Botón ">" y "<"



La función ">" permite avanzar en una unidad el número de gráfica seleccionado, siempre y cuando no se encuentre en el límite superior. Por otro lado, la función "<" permite retroceder en una unidad el número de gráfica seleccionado, siempre y cuando no se encuentre en el límite inferior que es 1.

Figura 70

Botón ">>" y "<<"



La función ">>" permite avanzar en tres unidades el número de gráfica seleccionado, siempre y cuando no se encuentre en el límite superior. La función "<<" permite retroceder en tres unidades el número de gráfica seleccionado, siempre y cuando no se encuentre en el

límite inferior que es 1.

Figura 71

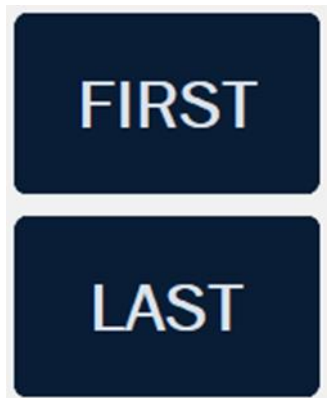
Botón "SYNC"



La función "SYNC" permite sincronizar dos gráficas independientes, para que muestren diferentes magnitudes de la misma gráfica y respondan a un mismo redimensionamiento. Al sincronizarlas, la gráfica no seleccionada toma los valores de la seleccionada, pero conserva su magnitud inicial. Mientras las gráficas estén sincronizadas, el botón "SYNC" permanecerá en color verde. Para desincronizarlas, basta con presionar nuevamente el botón.

Figura 72

Botón "FIRST" y "LAST"



La función "FIRST" permite al usuario ir al inicio de todas las gráficas, es decir, a la gráfica número 1, desde cualquier número de gráfica. La función "LAST" permite ir al final de todas las gráficas, lo que se puede conocer de antemano revisando el apartado izquierdo, en el cual se indica el número total de gráficas.

Figura 73

Botón "EXPORT"



La función "EXPORT" permite exportar los datos calculados de la gráfica a formato PDF a modo de resumen, así como en Excel con todo el detalle de los cálculos. Esta función se explicará a detalle en la siguiente sección.

e) Exportación

La función en cuestión habilita la exportación de datos calculados del ensayo en formato PDF o Excel. Para llevar a cabo esta tarea, se debe insertar primero la ubicación deseada para guardar el documento. Al cargar el menú de exportación, se muestran los siguientes datos: la cantidad total de golpes, la profundidad inicial y final de la recolección de datos. Luego, se deben rellenar las columnas de profundidad y conteo de golpes. Para la columna de profundidad, se comienza ingresando el valor de profundidad final en la primera fila y se disminuye hasta llegar a la profundidad inicial en la última fila. Si los valores ingresados no coinciden con los indicados previamente, no se podrá exportar el archivo.

Figura 74

Parámetros de exportación

Number of Impacts:1 Initial Depth:0 Final Depth:0.45

Depth (m)	Number of impacts	Increase (m)	BN remainder	Hit rate (bl/m)	Set/blow (mm/bl)	Elevation (m)
0.45	1	0.15	1	6.667	0.15	-0.45
0.30	0	0.15	0	0.0	0	-0.3
0.15	0	0.15	0	0.0	0	-0.15
0	0	0	0	0	0	-0.0

Buttons: Insert row, Delete row, Complete, Export PDF, Export Excel

Una vez que se completa la columna de profundidad, se procede a rellenar la columna de conteo de golpes. En la primera fila de esta columna se ingresa la cantidad total de golpes

y se disminuye hasta que en la última fila se coloca el valor cero. Luego de esto, se puede presionar el botón "Complete" para rellenar automáticamente las demás columnas. Los botones "Insert row" y "Delete row" permiten añadir o quitar filas si es necesario; esto es útil si se está exportando los datos de un ensayo distinto al SPT.

Por último, los botones "Export PDF" y "Export Excel" habilitan la exportación del documento en el formato deseado si se han seguido las instrucciones previamente mencionadas.

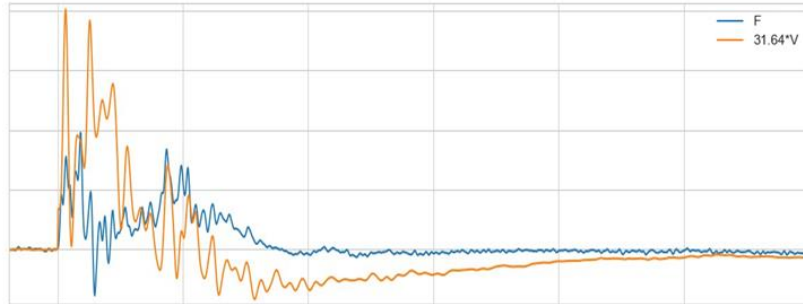
En las figuras 75 y 76, se muestra un ejemplo del PDF exportado. En este caso se trata de un ensayo SPT. Por lo que, el programa elimina los golpes correspondientes a los primeros 15 cm, en este caso, los 10 primeros golpes. De los golpes restantes se muestra el promedio de fuerza máxima, velocidad máxima, energía y la relación de energía. Con estos datos el usuario es capaz de interpretar a su criterio el ensayo SPT realizado en el campo.

Figura 75

PDF exportado parte superior

Kallpa Processor

AR: 15.6
EM: 207000
ET: 1177



F1 : [590AW1] 204.51 PDICAL (1) FF2

F2 : [590AW2] 203.63 PDICAL (1) FF2

A3 (PR): [K11669] 395.805 mv/6.4v/5000g (1) VF2

A4 (PR): [K11670] 418.207 mv/6.4v/5000g (1) VF2

FMX: Maximun Force VMX: Maximum Velocity BPM: Blows/Minute EFV: Maximun Energy ETR: Theoric Energy

BL#	BC	FMX	VMX	BPM	EFV	ETR
	/150mm	kN	m/s	bpm	J	%
1	10	163.62	5.76	11.42	610.44	51.86
2	10	198.41	4.69	23.36	605.71	51.46
3	10	183.06	6.08	11.48	801.93	68.13
4	10	167.27	6.1	21.67	730.5	62.06
5	10	163.32	5.78	9.55	587.14	49.88
6	10	180.31	6.39	18.43	769.28	65.36
7	10	164.5	6.43	27.56	755.31	64.17
8	10	177.35	5.18	12.28	638.41	54.24
9	10	192.99	6.3	2.38	786.75	66.84
10	10	180.57	5.74	10.42	563.21	47.85
11	15	196.92	6.48	24.46	790.95	67.2
12	15	180.24	6.09	12.81	680.79	57.84
13	15	170.45	6.11	6.87	667.79	56.74
14	15	169.76	6.09	1.07	721.97	61.34
15	15	152.99	5.47	17.57	683.86	58.1
16	15	163.51	5.86	24.15	686.46	58.32
17	15	170.63	5.83	26.07	710.09	60.33
18	15	165.59	5.92	1.27	664.91	56.49
19	15	171.79	6.27	10.4	807.61	68.62

Figura 76

PDF exportado parte inferior

20	15	169.5	6.23	11.29	738.67	62.76
21	15	167.09	6.1	5.49	718.34	61.03
22	15	176.52	6.17	5.37	786.44	66.82
23	15	181.53	6.47	10.64	722.74	61.41
24	15	159.46	6.14	9.61	762.76	64.81
25	15	169.9	5.96	10.19	770.29	65.45
26	15	174.09	6.85	26.82	817.44	69.45
27	15	167.15	6.02	24.98	726.99	61.77
28	15	180.44	7.09	7.98	946.43	80.41
29	15	200.25	6.94	6.23	903.48	76.76
30	15	179.87	6.35	23.83	772.31	65.62
31	15	149.14	5.48	27.99	611.59	51.96
32	15	179.96	5.93	20.11	593.63	50.44
33	15	196.88	6.3	20.99	920.75	78.23
34	15	188.9	6.68	6.25	823.8	69.99
35	15	159.53	6.05	6.9	696.18	59.15
36	15	199.34	6.44	20.75	699.74	59.45
37	15	185.28	6.7	10.57	890.61	75.67
38	15	176.35	7.02	22.19	877.94	74.59
39	15	189.16	7.48	25.75	897.9	76.29
40	15	179.33	6.44	1.83	786.39	66.81

Resultado Resumen

Instr.	Blows	N	N60	Average	Average	Average	Average	Average
Length	Applied	Value	Value	FMX	VMX	BPM	EFV	ETR
m	/150mm			kN	m/s	bpm	J	%
5	[10, 15, 15]	50	55.0	176.1	6.4	9.46	773.9	65.8

3.2.3 Desarrollo del procesamiento de señales

Cuando el programa está esperando la data de los impactos del ensayo SPT. Por cada impacto, el software Kuyuy Processor recibe señales de los acelerómetros y deformímetros en forma de cuentas digitales. Estas señales necesitan ser filtradas y convertidas a voltios. Posteriormente, para obtener las mediciones en sus unidades respectivas, se deben multiplicar por el factor de calibración correspondiente.

El formato del archivo generado por cada impacto en el software se ilustra en la figura 77. La primera columna muestra el tiempo en microsegundos, y las columnas restantes representan los datos de los sensores. En este ejemplo, se utilizaron dos sensores, cuyo orden se detalla en la cuarta línea. Los primeros cuatro elementos indican la secuencia de

los sensores, el quinto elemento es la frecuencia en kHz, el sexto indica el área de la sección transversal, el séptimo es el módulo de elasticidad, y el último elemento representa la energía (1|0|3|0|50|7.80595|206843|473).

Cada número asignado a los sensores tiene un significado específico: el número 0 indica que no hay sensor conectado; 1 corresponde al acelerómetro K13548; 2 al acelerómetro K11670; 3 al deformímetro 590AW1; y 4 al deformímetro 590AW2.

Figura 77

Formato de datos por impacto

```
profundidad:17,134
INICIO_ARCHIVO
ARCHIVO:1
1|0|3|0|50|7.80595|206843|473
-10000|232|0|-1807|-65|
-9980|234|0|-1806|-67|
-9960|235|2|-1810|-66|
-9940|232|4|-1807|-68|
-9920|231|-1|-1809|-68|
-9900|234|-1|-1801|-66|
-9880|233|2|-1809|-69|
-9860|234|-3|-1806|-66|
-9840|234|-1|-1803|-67|
-9820|234|1|-1809|-70|
-9800|233|0|-1802|-65|
-9780|234|2|-1800|-67|
-9760|234|4|-1803|-67|
-9740|234|-3|-1807|-64|
-9720|234|0|-1805|-66|
-9700|234|-1|-1805|-60|
-9680|234|0|-1802|-64|
```

Cuando los sensores están en estado de reposo, se puede observar el valor promedio del Offset en la tabla 4. Para la conversión de cuentas a voltios, se debe restar este valor de Offset de cada dato del sensor. Posteriormente, utilizando la ecuación (6), se calcula la diferencia de voltaje en el sensor.

Tabla 4*Offset de los sensores en cuentas*

Sensor	Offset (cuentas)
K13548	-144
K11670	239
590AW1	-1781
590AW2	-1507

$$\text{Voltaje} = \frac{\text{Cuenta ADC} - \text{Offset}}{\text{Resolución ADC}} \times \text{Rango de voltaje} \quad (6)$$

De esta forma, esta fórmula es trasladada a las funciones que transforman las cuentas a magnitudes físicas de aceleración y deformación. Una vez que se haya obtenido el voltaje (μV), este se filtra digitalmente como se ve en la figura 78 donde se muestra la función de “cuentas2magnitud”.

Figura 78*Función cuentas2magnitud*

```
def cuentas2magnitud(cuentas, tipo, freq=50):
    offset = [-144,239,-1781,-1507]
    ganancia = [2, 2, 16, 16]
    voltaje_array = (np.array(cuentas) - offset[tipo-1])*1.254/(2**15)*1.25/ganancia[tipo-1]*1000000 # Voltaje en  $\mu\text{V}$ 

    tr = Trace(data=voltaje_array) # Se crea un trace con la data del voltaje
    tr.stats.sampling_rate = freq*1000 # Se agrega el periodo de muestreo
    tr.detrend("demean") # Se hace una correccion de linea cero para el filtrado
    tr.filter(type="lowpass", freq=5000) #Se filtra a 5kHz

    data = tr.data # Se extrae la data del trace

    calibracion = [79.44, 51.62, 8.94, 8.46] #Factores de calibracion

    return data*calibracion[tipo-1]
```

En esta función específica se almacenan datos cruciales como el offset, la ganancia y el factor de calibración para cada tipo de sensor. Los detalles sobre cómo se calcula este factor de calibración se expondrán en la sección 3.3. La función está diseñada para recibir tres tipos de entradas: las cuentas, el tipo de sensor (que se utiliza para identificar el sensor específico), y la frecuencia de muestreo, medida en kHz. Siguiendo este proceso, se aplica la fórmula 5.1 a las cuentas. Posteriormente, los datos procesados se convierten en una traza (trace) utilizando la biblioteca Obspy de Python; una traza es una estructura que representa una secuencia temporal continua de datos, junto con sus metadatos asociados. La función

procede a corregir el nivel base de las señales (línea cero) y realiza un filtrado a una frecuencia de 5 kHz. Finalmente, los datos ya filtrados y convertidos a voltios se transforman en la magnitud específica que corresponde al tipo de sensor utilizado multiplicándolos por el factor de calibración.

Para calcular las fórmulas restantes relacionadas con la fuerza, velocidad, desplazamiento y energía, se utilizaron datos obtenidos de un ensayo de Penetración Estándar (SPT) llevado a cabo con el analizador SPT. Al extraer estos datos, se obtuvieron todas las magnitudes relevantes, las cuales se registraron y organizaron en un archivo de Excel. Estos valores se pueden visualizar en la figura 79.

Figura 79

Datos de un impacto del analizador SPT

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P
25	DFN	1.55908892 mm				DFN	1.55908892 mm					DFN	1.55908892 mm			
26	MEX	203.864212 micro strain				MEX	203.864212 micro strain					MEX	203.864212 micro strain			
27	AMX	633.944431 g's				AMX	633.944431 g's					AMX	633.944431 g's			
28	LI	0 meters				LI	0 meters					LI	0 meters			
29	LP	1.4 meters				LP	1.4 meters					LP	1.4 meters			
30																
31	Record	Time	S3@3.7m	A2@3.7m		Record	Time	F@3.7m	V@3.7m	E@3.7m	D@3.7m	Record	Time	V2@3.7m	F3@3.7m	
32	Sl:3, BN:L:2	Seconds	micro strain	g's		Sl:3, BN:L:2	Seconds	kN	meters/seco	Joules	mm	Sl:3, BN:L:2	Seconds	meters/seco	kN	
33	0	0	0.376431	-0.229376		0	0	0.060779	0	0	0	0	0	0	0	0.060779
34	1e-05	1.451948	-0.229376			1e-05	0.234432	-4.50E-05	0	0	0	1e-05	-4.50E-05	0.234432		
35	2e-05	-0.053776	-0.229376			2e-05	-0.008683	-9.00E-05	0	-1.00E-06	0	2e-05	-9.00E-05	-0.008683		
36	3e-05	-1.774603	-0.229376			3e-05	-0.286528	-0.000135	1e-06	-3.00E-06	0	3e-05	-0.000135	-0.286528		
37	4e-05	-1.774603	0.031279			4e-05	-0.286528	-0.000129	5e-06	-5.00E-06	0	4e-05	-0.000129	-0.286528		
38	5	0.0001	0.591534	-0.229376		5	0.0001	0.095509	-0.000174	5e-06	0	5	0.0001	-0.000174	0.095509	
39	6	0.00012	-1.344396	-0.229376		6	0.00012	-0.217067	-0.000219	2e-06	0	6	0.00012	-0.000219	-0.217067	
40	7	0.00014	-1.989706	0.031279		7	0.00014	-0.321259	-0.000213	5e-06	0	7	0.00014	-0.000213	-0.321259	
41	8	0.00016	-0.483983	0.031279		8	0.00016	-0.078144	-0.000207	4e-06	0	8	0.00016	-0.000207	-0.078144	
42	9	0.00018	-0.699086	-0.229376		9	0.00018	-0.112875	-0.000252	4e-06	0	9	0.00018	-0.000252	-0.112875	
43	10	0.0002	-0.483983	-0.229376		10	0.0002	-0.078144	-0.000297	5e-06	0	10	0.0002	-0.000297	-0.078144	
44	11	0.00022	-1.344396	-0.229376		11	0.00022	-0.217067	-0.000342	5e-06	0	11	0.00022	-0.000342	-0.217067	
45	12	0.00024	-0.053776	0.031279		12	0.00024	-0.008683	-0.000335	5e-06	0	12	0.00024	-0.000335	-0.008683	
46	13	0.00026	1.236844	-0.229376		13	0.00026	0.199701	-0.00038	5e-06	0	13	0.00026	-0.00038	0.199701	
47	14	0.00028	-0.483983	0.031279		14	0.00028	-0.078144	-0.000374	5e-06	0	14	0.00028	-0.000374	-0.078144	
48	15	0.0003	1.021741	0.031279		15	0.0003	0.164971	-0.000368	5e-06	0	15	0.0003	-0.000368	0.164971	
49	16	0.00032	-0.914189	0.031279		16	0.00032	-0.147605	-0.000362	5e-06	0	16	0.00032	-0.000362	-0.147605	
50	17	0.00034	-1.989706	-0.229376		17	0.00034	-0.321259	-0.000407	5e-06	0	17	0.00034	-0.000407	-0.321259	
51	18	0.00036	-1.129293	0.031279		18	0.00036	-0.182336	-0.000401	5e-06	0	18	0.00036	-0.000401	-0.182336	
52	19	0.00038	-0.483983	-0.229376		19	0.00038	-0.078144	-0.000446	5e-05	0	19	0.00038	-0.000446	-0.078144	
53	20	0.0004	0.376431	-0.229376		20	0.0004	0.060779	-0.000491	5e-06	0	20	0.0004	-0.000491	0.060779	
54	21	0.00042	2.097258	-0.229376		21	0.00042	0.338624	-0.000536	5e-06	0	21	0.00042	-0.000536	0.338624	
55	22	0.00044	2.527465	-0.229376		22	0.00044	0.408085	-0.000581	1e-06	0	22	0.00044	-0.000581	0.408085	
56	23	0.00046	0.376431	-0.229376		23	0.00046	0.060779	-0.000626	5e-06	0	23	0.00046	-0.000626	0.060779	
57	24	0.00048	-0.699086	0.031279		24	0.00048	-0.112875	-0.00067	5e-06	0	24	0.00048	-0.00067	-0.112875	

Se realizó este proceso para asegurar que las fórmulas utilizadas en el software estén alineadas con las del analizador SPT. De esta manera, a partir de este impacto específico, se extrajeron los datos de aceleración y deformación. Luego, se aplicaron las fórmulas correspondientes para obtener nuevas magnitudes, y estos resultados se compararon con los obtenidos mediante el analizador SPT. A continuación, se presentará una explicación detallada para cada una de estas fórmulas:

a) Fórmula de fuerza

El cálculo de la fuerza no implica una gran complejidad. Esto se debe a que la fuerza es proporcional a la deformación, tal como se explicó en la sección 2.1.4, específicamente en la ecuación (3).

$$F_{(t)} = A_c E \varepsilon \quad (3)$$

La fórmula de la fuerza en Python se presenta en la figura 80, según se indica. Esta fórmula requiere tres valores de entrada: el np.array de la deformación, el módulo de elasticidad, y el área de la sección transversal de la varilla. Al aplicarla, se obtiene la fuerza en kilo newtons, la cual es redondeada a seis decimales.

Figura 80

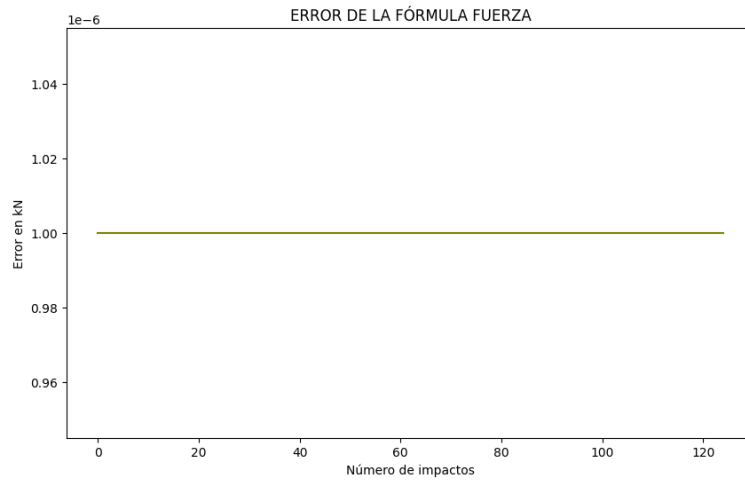
Fórmula de la fuerza en Python

```
def def2fuerza(deformacion, modulo_elasticidad = 206842.6833, area = 7.805946):  
    factor = modulo_elasticidad*area  
    fuerza = deformacion*factor/10000000 #Fuerza en kN  
    return np.round(fuerza,6)
```

La eficacia de la fórmula se puso a prueba utilizando datos de deformación de 125 impactos obtenidos a través del analizador SPT. Estas pruebas, se enfocaron en identificar el error máximo para cada impacto, comparando la fuerza calculada con la fórmula frente a la fuerza medida por el analizador. Los errores correspondientes a los 125 impactos se visualizan en la figura 5.42. Como se muestra en la figura, el error máximo registrado en cada impacto fue del 1e-6 kN, lo cual valida la adecuación de la fórmula para el programa. Este método de verificación también se aplicó al resto de fórmulas.

Figura 81

Error de la fórmula fuerza



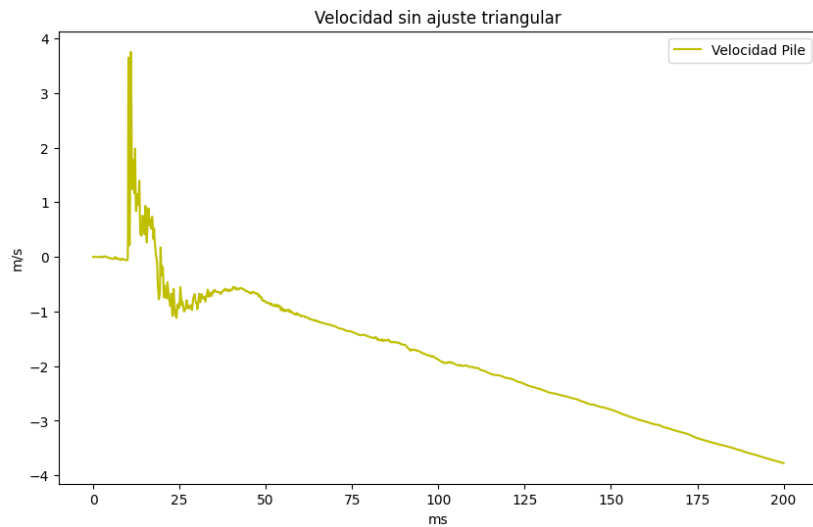
b) Fórmula de velocidad

Se determina la velocidad mediante la integración de la aceleración como se vio en la sección 2.1.4. Para este propósito, existen diversos métodos de integración que se pueden aplicar, como la integración por el método del trapecio, la integración de Simpson, y la integración numérica de Euler. Cada uno de estos métodos tiene ligeras variaciones respecto del otro, lo que se mostrará a continuación es probar las diversas fórmulas de integración y ver cuál de todas se acerca más al resultado de la velocidad del analizador SPT.

Además del método de integración, existe otro método crucial conocido como el ajuste triangular de la velocidad [29]. Este procedimiento implica asegurarse de que la velocidad final se establezca en cero. Esto es especialmente relevante en situaciones en las que la velocidad tiende a terminar en una dirección ascendente o descendente (ver figura 82). El objetivo principal de este ajuste es lograr que la velocidad alcance un valor de cero en el último punto.

Figura 82

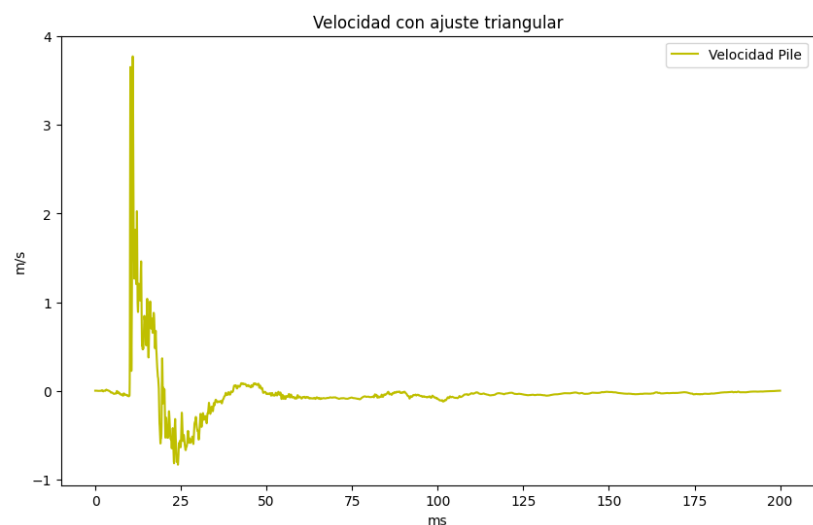
Velocidad sin ajuste triangular



¿Cómo se logra? En primer lugar, se debe identificar dos puntos específicos en los datos de velocidad. El primer punto corresponde al momento en el que ocurre el impacto, mientras que el segundo punto corresponde al último valor registrado en la velocidad. Luego, se procede a crear un arreglo que conecta estos dos puntos de manera que, al restarlo a los datos de velocidad posteriores al impacto, se garantiza que el último valor de la velocidad se ajuste a cero. De esta manera, la velocidad se corrige de acuerdo con lo ilustrado en la figura 83.

Figura 83

Velocidad con ajuste triangular



Integración Obspy

La librería Obspy ofrece la integración como una herramienta fundamental para el procesamiento y análisis de datos sísmicos y geofísicos. Esta librería, diseñada específicamente para trabajar con datos sismológicos, proporciona una amplia gama de funciones y utilidades que permiten llevar a cabo la integración de manera eficiente y precisa.

A pesar de que la integración en Obspy está inicialmente orientada hacia datos sísmicos, algunos usuarios han considerado su aplicación en otros contextos, como se hará a continuación con la integración de la aceleración. La fórmula en Python de integración de la velocidad se puede observar en la figura 84.

Figura 84

Fórmula de velocidad método Obspy

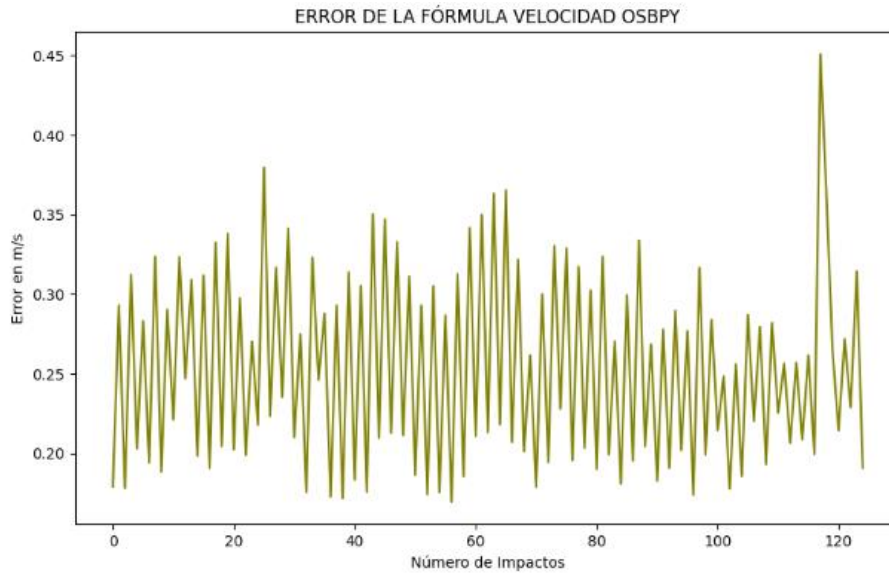
```
def velocidad_obsyp(accel, freq = 50):  
    tr_a = Trace(data = accel*9.81) # Datos de aceleracion en m/s2  
    tr_a.stats.sampling_rate = freq*1000  
    tr_a.integrate(method = "cumtrapz") # Integracion por el metodo del trapecio  
  
    velocidad = tr_a.data  
  
    idx_impact = int(0.01*freq*1000) - 2 # Identifica el punto en el que sucede el impacto  
  
    # CORRECCIÓN TRIANGULAR  
    # velocidad antes del impacto  
    V_bi = velocidad[:idx_impact]  
    # velocidad después del impacto  
    V_ai = velocidad[idx_impact:]  
  
    V_despues = V_ai - np.linspace(0,V_ai[-1],len(V_ai))  
  
    velocidad_corregida = np.concatenate((V_bi, V_despues))  
  
    return velocidad_corregida
```

Las fórmulas de velocidad solo requieren dos datos de entrada: el arreglo de aceleración y la frecuencia de muestreo. Sin embargo, es necesario convertir las unidades de aceleración de gravedades (g's) a metros por segundo al cuadrado (m/s^2) para obtener la velocidad en metros por segundo (m/s). El método de integración que se le aplicó es de la regla del trapecio. Una vez que se integró se procedió a realizar la corrección triangular que se explicó previamente. De este modo es cómo funciona la fórmula de velocidad por el método Obspy.

Del mismo modo que se realizó con la fuerza, se muestra a continuación la gráfica de los errores máximos que tuvo esta fórmula de velocidad.

Figura 85

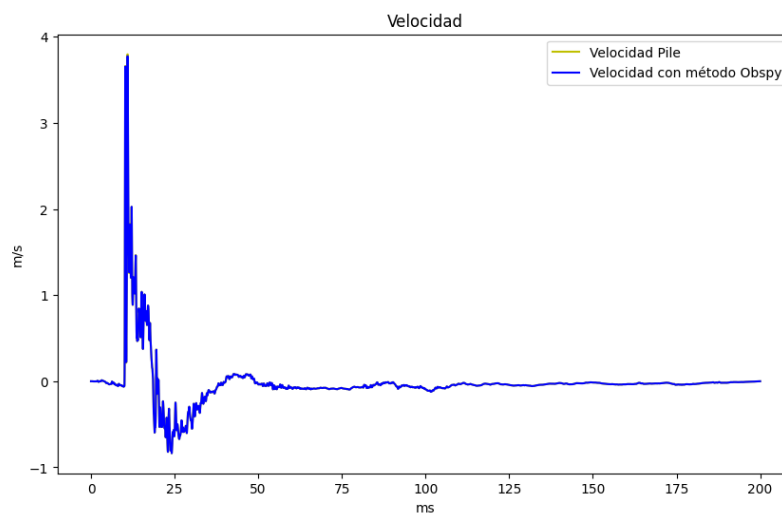
Error de la fórmula velocidad Obspy



Un error máximo de 0.25 m/s en promedio podría parecer que no afectará significativamente los cálculos siguientes. Tal como se ve en la Figura 86, se presentan las dos gráficas de velocidad. Una corresponde a los datos obtenidos del analizador SPT, y la otra es el resultado del método Obspy, a simple vista ambas parecen idénticas.

Figura 86

Velocidad obtenida por el método Obspy comparada con la velocidad obtenida del analizador SPT

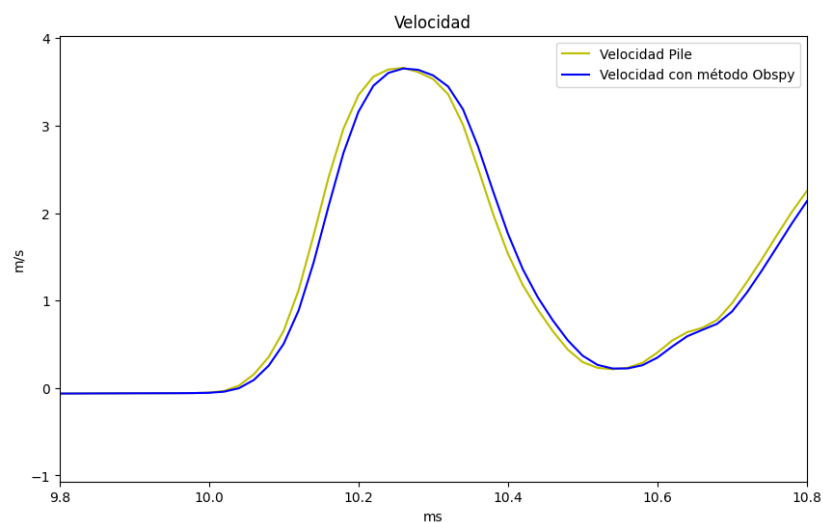


Sin embargo, al aumentar el zoom en las gráficas, en el intervalo de tiempo entre 9.8 ms y 10.8 ms como se ilustra en la Figura 87, se observa un desfase entre ellas. Este desfase resulta en un error significativo entre los elementos correspondientes al mismo tiempo. Se

realizaron cálculos de energía utilizando esta velocidad desfasada. Comparando la energía calculada con la obtenida del SPT, se encontró una variación de hasta un 10%. Dado que este error es considerable y la velocidad tiene un impacto crítico, se presentará otro método para calcular la velocidad.

Figura 87

Velocidad obtenida por el método Obspy comparada con la velocidad obtenida del analizador SPT



Nuevo método velocidad

Se descubrió un método específico tras analizar los datos de velocidad y aceleración proporcionados por el analizador del SPT. Se notó un patrón consistente en los diferentes conjuntos de datos. Este patrón implicaba que el primer elemento de aceleración no se incluía en el proceso de integración, lo que llevaba a que el primer valor calculado de velocidad fuera cero. En cuanto al segundo valor de la velocidad, este resultaba ser igual al área formada por el segundo término de aceleración y el eje de las ordenadas, considerando un ancho igual al periodo de muestreo. De manera similar, el tercer valor de velocidad incorporaba la suma del área correspondiente al segundo término, y este proceso de sumas acumulativas se repetía sucesivamente para los términos subsiguientes.

Para lograr una nueva función que cumpla con lo predicho se creó la función "velocidad_nuevo_metodo" mostrada en la figura 88. Donde el proceso comienza con la conversión de estos datos a las unidades del Sistema Internacional (SI), específicamente a

metros por segundo cuadrado (m/s²). Esto se logra mediante la multiplicación de los valores de aceleración por el factor de conversión 9.81.

Figura 88

Función “*velocidad_nuevo_metodo*”

```
def velocidad_nuevo_metodo(accel, freq=50):  
    # Convertir aceleraciones a unidades SI y calcular h  
    accel_si = [a * 9.81 for a in accel]  
    h = 1 / (freq * 1000)  
  
    # Calcular velocidad  
    velocidad = [0]  
    for i in range(1, len(accel_si)):  
        velocidad.append(accel_si[i] * h + velocidad[i - 1])  
  
    # Calcular índices para la corrección triangular  
    idx_impact = int(0.01 * freq * 1000) - 1  
    last_impact = len(accel) - 2  
  
    velocidad_corregida = correccion_triangular(velocidad, idx_impact, last_impact)  
  
    return velocidad_corregida
```

Una vez convertidos los datos, la función establece un punto de partida para el cálculo de la velocidad. Inicializa una lista llamada *velocidad* con un elemento inicial cero, que representa la velocidad inicial. Seguido de esto, se determina el intervalo de tiempo entre las mediciones de aceleración, designado como *h*. Este intervalo se calcula como el inverso de la frecuencia de medición “*freq*” multiplicado por 1000 ya que la frecuencia se encuentra en kHz.

El cálculo de la velocidad en sí se realiza en dos fases. En la primera, la función itera a través de cada punto de aceleración (exceptuando el primero) y calcula la velocidad instantánea en cada punto multiplicando la aceleración por el intervalo de tiempo *h*. Estos valores se van sumando secuencialmente en la lista *velocidad*. En la segunda fase, se realiza una suma acumulativa de estos valores de velocidad instantánea. Este proceso resulta en la obtención de la velocidad total en cada punto del tiempo.

Tras calcular la velocidad, la función procede a la preparación de los datos para la aplicación de la corrección triangular.

Figura 89

Función “corrección_triangular”

```
def correccion_triangular(data_array, first_dv = 498, second_dv = 10000):  
  
    # Velocidad primer intervalo  
    V_1 = data_array[:first_dv]  
    # Velocidad segundo intervalo  
    V_2 = data_array[first_dv:]  
    # Velocidad tercer intervalo  
    V_3 = []  
    valor_maximo = data_array[second_dv]  
  
    for i,data in enumerate(V_2):  
        valor = data - i*valor_maximo/(second_dv - first_dv)  
        V_3.append(valor)  
  
    # Concatenating again  
    velocidad_corregida = np.concatenate((V_1, V_3))  
  
    return np.round(velocidad_corregida,6)
```

Dicha corrección se ilustra en la figura 89, la cual es responsable de aplicar una corrección específica al conjunto de datos de velocidad. Esta corrección se basa en la división del conjunto de datos en distintos intervalos. El primer intervalo, V_1, comprende los datos desde el inicio hasta el índice first_dv (inicio del impacto) y no es modificado durante el proceso de corrección. Por otro lado, el segundo intervalo, V_2, que abarca los datos desde first_dv hasta el final del conjunto, es sometido a una corrección detallada. En este proceso, se calcula un valor máximo de referencia en el índice second_dv, que se utiliza para ajustar proporcionalmente los valores en V_2. Esta corrección implica restar a cada valor en V_2 una cantidad que depende de su posición relativa y del valor máximo referenciado. El resultado de esta operación es un tercer intervalo, V_3, que, al ser concatenado con V_1, forma el conjunto final de datos de velocidad corregida. Como se ha mencionado anteriormente, la corrección aplicada asegura que el valor final en la serie de velocidad resulte en cero.

En la Figura 90 se presentan los errores de las velocidades correspondientes a los 125 impactos analizados. Se observó que el error máximo no excedía de 0.00055 g's. No obstante, durante el análisis se identificó que al modificar el valor de la constante gravitacional utilizada para convertir los datos de aceleración a unidades del Sistema Internacional (SI), el error variaba significativamente. Este hallazgo quedó evidenciado cuando, al emplear el valor

estándar de la gravedad 9.80665 m/s^2 , el error se redujo a $1\text{e-}6 \text{ g's}$ en la mayoría de los casos, como se muestra en la Figura 91. Por tanto, se decidió que para los ensayos subsiguientes se utilizará esta fórmula con el factor de aceleración específico encontrado.

Figura 90

Error de velocidad a $g=9.81 \text{ m/s}^2$

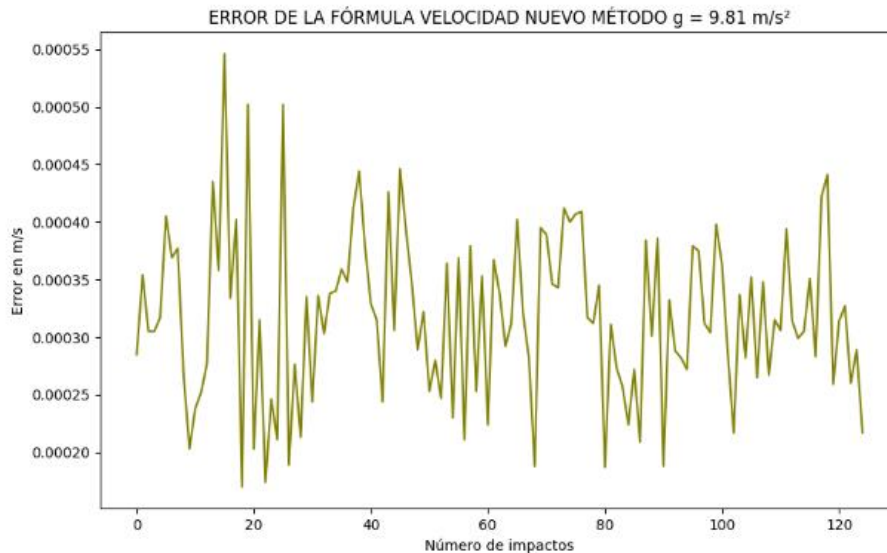
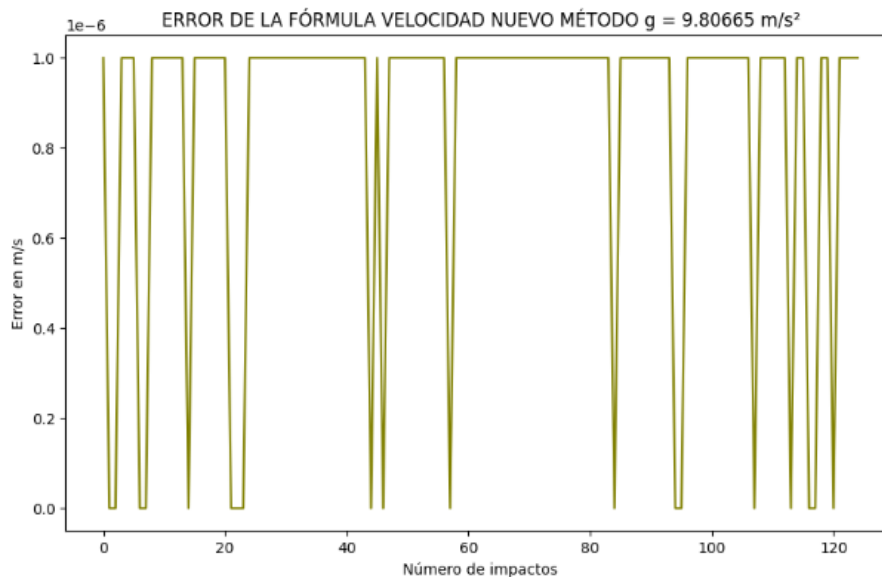


Figura 91

Error de velocidad a $g=9.80665 \text{ m/s}^2$



c) Fórmula del desplazamiento

La fórmula presentada se encarga de integrar la velocidad con el fin de calcular el desplazamiento de la varilla. Este proceso se fundamenta en el mismo principio de integración

que se aplica a la aceleración para determinar la velocidad, tal como se ilustra en la figura 92.

Figura 92

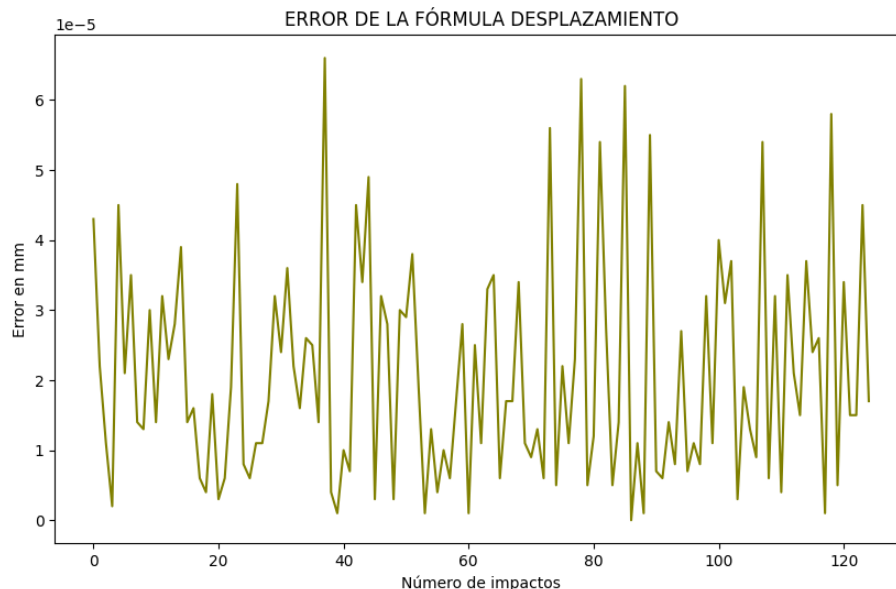
Fórmula del desplazamiento

```
def desplazamiento(vel, freq=50):  
  
    h = 1 / (freq * 1000)  
  
    # Calcular velocidad  
    desp = [0,0]  
  
    for i in range(1, len(vel)-1):  
        desp.append(round(vel[i] * h * 1000,6) + desp[i])  
  
    return np.array(desp)
```

Conforme a la metodología aplicada en el análisis de las demás fórmulas, se presenta en la figura 93 el gráfico del error asociado a la fórmula en cuestión. Se identifica un error máximo de $7e-5$ mm. Dado que el margen de error se mide en milímetros, su impacto en el resultado final es considerado insignificante. Por tanto, se concluye que esta fórmula es la más adecuada para ser implementada en el programa.

Figura 93

Error en la fórmula de desplazamiento



d) Fórmula de la energía

Finalmente, se aborda el cálculo de la energía, un tema previamente introducido en la sección 2.1. La fórmula utilizada para este cálculo implica multiplicar la fuerza por la velocidad

y sumar los resultados. En la función “energía”, presentada en la figura 94, se aplica este método paso a paso. Se comienza calculando un valor denominado “h”, que representa un pequeño intervalo de tiempo. Posteriormente, en cada paso, se multiplica la fuerza por la velocidad y por “h”, acumulando estos productos sucesivamente. Es crucial convertir la fuerza de kilo newtons (kN) a newtons (N) multiplicando por 1000, lo que permite que el valor final de la energía se exprese en Joules.

Figura 94

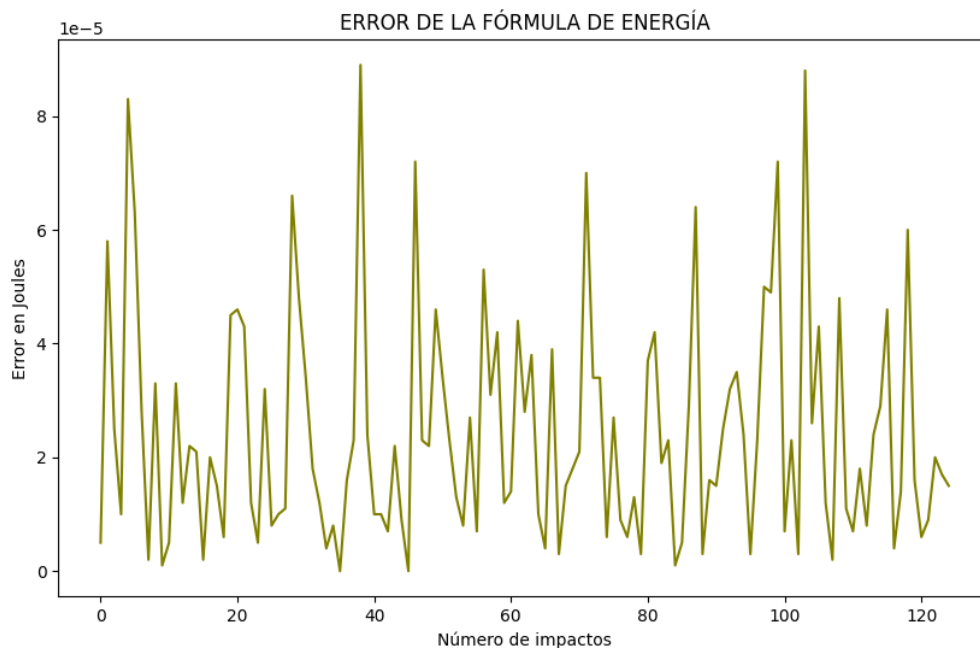
Fórmula de la energía

```
def energia(F, V, freq=50):  
    h = 1 / (freq * 1000)  
    energia_resul = [0]  
  
    for i in range(1, len(F)):  
        energia_resul.append(round(F[i] * V[i] * h * 1000,6) + energia_resul[i-1])  
  
    return energia_resul
```

El análisis del error asociado con la fórmula de la energía, ilustrado en la figura 95, revela que el error máximo es de no más de 9×10^{-5} J. Dada la pequeñez de este margen de error, se considera que la precisión es suficientemente alta. Por lo tanto, se concluye que esta fórmula de energía es apropiada y confiable para su implementación en el proyecto.

Figura 95

Error en la fórmula de la energía



3.3 Calibración del dispositivo Kallpa

3.3.1 Procedimiento de calibración

En el proceso de calibración del dispositivo Kallpa, se empleó el analizador SPT en conjunto con una varilla equipada con dos strain gauges (deformímetros) y dos acelerómetros. Aunque usualmente los cuatro sensores se conectan al analizador para realizar el ensayo SPT, en este caso para calibrar tanto los sensores como el dispositivo Kallpa, solo se enlazaron dos sensores (un deformímetro y un acelerómetro) al analizador SPT. La otra pareja de sensores se conectó al dispositivo Kallpa.

Durante el procedimiento, los datos de deformación y aceleración recopilados por el analizador SPT se compararon con los obtenidos por el dispositivo Kallpa cada vez que el martillo impactaba la varilla. Esta comparación permitió establecer una correlación entre ambos conjuntos de datos y asignar un factor de calibración a cada sensor. Se realizaron un total de 50 impactos para completar la calibración. Posteriormente, se repitió la prueba intercambiando los sensores: aquellos previamente conectados al analizador SPT se vincularon al dispositivo Kallpa y viceversa. De esta manera, se logró determinar el factor de calibración para los cuatro sensores utilizados.

El ensayo se llevó a cabo en la Universidad Nacional de Ingeniería, como se muestra en la figura 96. En la fotografía, se puede apreciar el analizador SPT ubicado junto al dispositivo Kallpa, con el software Kallpa Processor ejecutándose en una laptop.

Figura 96

Ensayo con el analizador SPY y el dispositivo Kallpa

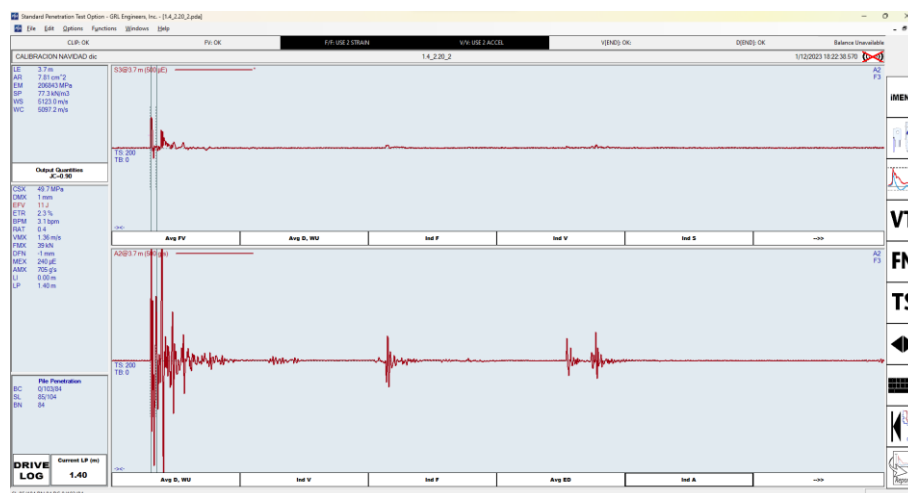


3.3.2 Recopilación de datos

Una vez realizado el ensayo, los datos generados por el analizador SPT se guardan en un archivo con extensión “.pda”. Este archivo solo puede ser abierto por el software “PDA-S”. La interfaz de este software se puede visualizar en la figura 97.

Figura 97

Interfaz del software PDA-S



Una limitación de este software es su incapacidad para exportar la totalidad de los datos recopilados, ofreciendo únicamente un resumen de las magnitudes máximas en

formato PDF. Para la calibración, es esencial acceder a todos los datos, pero el programa permite solo la extracción individual de cada conjunto de datos. Realizar esta tarea manualmente para los 50 datos sería extremadamente lento. Por ello, se desarrolló una solución automatizada mediante un programa en Python, utilizando la biblioteca PyAutoGUI. Esta librería es una herramienta de Python que permite a los programas controlar automáticamente el mouse y el teclado de una computadora, como si una persona estuviera usando la máquina. Se usa principalmente para automatizar tareas repetitivas. Por esto, este código automatiza el proceso de extracción de datos: copia los datos del primer impacto utilizando las teclas CONTROL + C, cambia a una hoja de Excel ya abierta y pega los datos con CONTROL + V, crea una nueva hoja en Excel con SHIFTLEFT + F11, y luego regresa al programa original para cambiar al siguiente impacto y repetir el proceso. Este ciclo se repite hasta que todos los datos han sido copiados. El proceso y el código se ilustran en la figura 98.

Figura 98

Código para extraer los datos del software PDA-S

```
Extraer_data_pile.py > ...
1  import pyautogui as pa
2  import random
3  import time
4  from time import sleep
5
6  # Cambiar al excel y PILE
7  for i in range(0,2):
8      pa.keyDown('alt')
9      pa.press("tab")
10     pa.press("tab")
11     pa.keyUp('alt')
12
13     pa.moveTo(1816, 85,0.02)    # Posicion para el cambio de flecha
14     sleep(0.05)
15
16     time_sleep = 0.075
17
18     for i in range (0,8): #Colocar la cantidad de datos para copiar
19         print("-",i,end="")
20         pa.hotkey("ctrl","c")    #Copia los datos
21         sleep(time_sleep)
22         pa.hotkey("alt", "tab") #Cambia de pestañas
23         sleep(time_sleep)
24         pa.hotkey("ctrl","v")    #Pega los datos
25         sleep(time_sleep)
26         pa.hotkey("shiftright","f11")#Crea una nueva hoja
27         sleep(time_sleep)
28         pa.hotkey("alt", "tab") #Regresa a Pile
29         sleep(time_sleep)
30         pa.click()                #Cambia de grafica
31         sleep(time_sleep)
```

Después de este proceso, todos los datos quedan almacenados en un archivo de Excel, como se muestra en la figura 99. Sin embargo, trabajar con datos en formato Excel puede ser algo complejo y tedioso. Para facilitar la manipulación de estos datos, se desarrolló un código adicional en Python (ver figura 100). Este código se encarga de extraer la información de cada hoja del archivo Excel y crear un archivo CSV separado para cada una de ellas con las librerías `os` y `pandas`. Los archivos CSV son más sencillos de manejar y permiten un procesamiento de datos más rápido y eficiente.

Figura 99
Data de impactos en un Excel

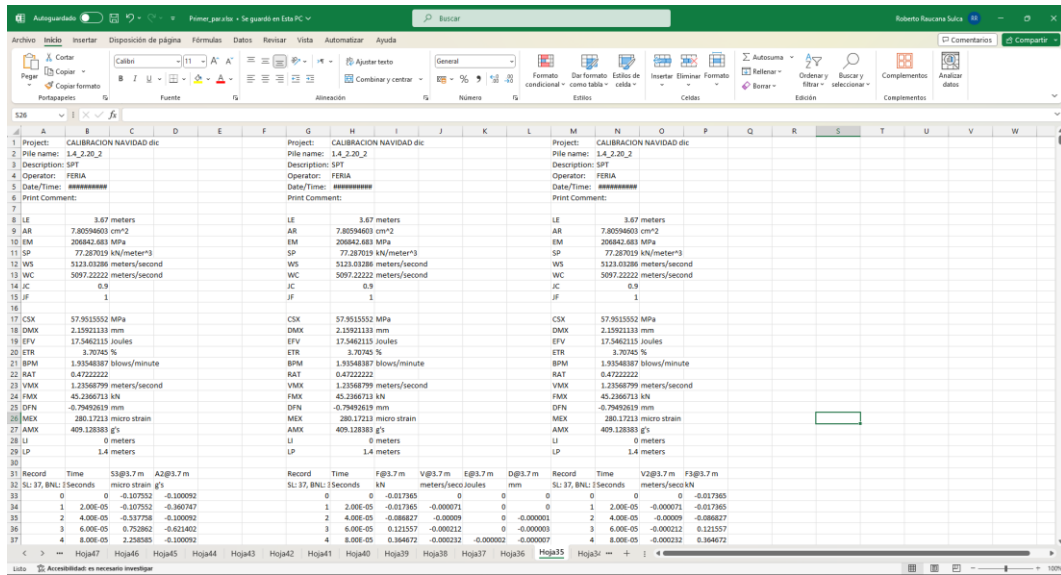


Figura 100
Código para extraer las hojas de un Excel

```

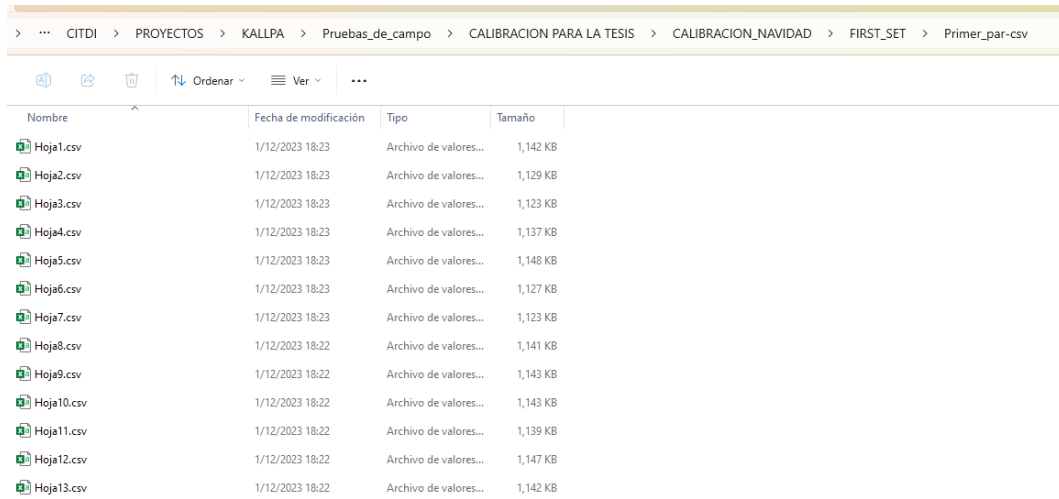
1 import os
2 import pandas as pd
3 print("iniciando")
4 def excel_to_csv(file_path, output_folder):
5     print("1")
6     excel_data = pd.ExcelFile(file_path) # Lee todas las hojas del archivo Excel
7     print("2")
8     for i,sheet_name in enumerate(excel_data.sheet_names): # Itera sobre cada hoja y su nombre correspondiente
9         print(i)
10        df = pd.read_excel(excel_data, sheet_name=sheet_name)
11        csv_file_path = os.path.join(output_folder, f"{sheet_name}.csv") # Ruta completa del archivo CSV
12        df.to_csv(csv_file_path, index=False) # Guarda los datos de la hoja en un archivo CSV
13
14 # Ruta del archivo Excel
15 excel_file_path = "E:\\Documents\\CITIDI\\Pruebas_de_campo\\25 JULIO 2023 UNI\\12-113.xlsx"
16
17 # Carpeta de salida para los archivos CSV
18 output_folder = "E:\\Documents\\CITIDI\\Pruebas_de_campo\\25 JULIO 2023 UNI\\12-113"
19
20 # Llama a la función para convertir el archivo Excel a CSV
21 excel_to_csv(excel_file_path, output_folder)

```

Por lo tanto, utilizando este método, se logró extraer con éxito todos los datos del software PDA-S, como se ilustra en la figura 101. Este mismo proceso se aplicó de manera idéntica para extraer el otro conjunto de datos.

Figura 101

Hojas csv extraídas del Excel



Nombre	Fecha de modificación	Tipo	Tamaño
Hoja1.csv	1/12/2023 18:23	Archivo de valores...	1,142 KB
Hoja2.csv	1/12/2023 18:23	Archivo de valores...	1,129 KB
Hoja3.csv	1/12/2023 18:23	Archivo de valores...	1,123 KB
Hoja4.csv	1/12/2023 18:23	Archivo de valores...	1,137 KB
Hoja5.csv	1/12/2023 18:23	Archivo de valores...	1,148 KB
Hoja6.csv	1/12/2023 18:23	Archivo de valores...	1,127 KB
Hoja7.csv	1/12/2023 18:23	Archivo de valores...	1,123 KB
Hoja8.csv	1/12/2023 18:22	Archivo de valores...	1,141 KB
Hoja9.csv	1/12/2023 18:22	Archivo de valores...	1,143 KB
Hoja10.csv	1/12/2023 18:22	Archivo de valores...	1,143 KB
Hoja11.csv	1/12/2023 18:22	Archivo de valores...	1,139 KB
Hoja12.csv	1/12/2023 18:22	Archivo de valores...	1,147 KB
Hoja13.csv	1/12/2023 18:22	Archivo de valores...	1,142 KB

En referente a los datos del dispositivo Kallpa, como se muestra en la figura 102, el software Kallpa Processor guarda los datos de los impactos en un archivo con extensión “.ct”. Así que, con los datos recopilados, se creará un código en Python para calibrar el dispositivo Kallpa.

Figura 102

Arhcivo “.ct”

```
profundidad:17,134
INICIO_ARCHIVO
ARCHIVO:1
1|0|3|0|50|7.80595|206843|473
-10000|232|0|-1807|-65|
-9980|234|0|-1806|-67|
-9960|235|2|-1810|-66|
-9940|232|4|-1807|-68|
-9920|231|-1|-1809|-68|
-9900|234|-1|-1801|-66|
-9880|233|2|-1809|-69|
-9860|234|-3|-1806|-66|
-9840|234|-1|-1803|-67|
-9820|234|1|-1809|-70|
-9800|233|0|-1802|-65|
-9780|234|2|-1800|-67|
-9760|234|4|-1803|-67|
0740|234|3|-1807|-64|
```

3.3.3 Análisis de los datos

Se desarrolló un código en Python para procesar datos extraídos del analizador SPT y del dispositivo Kallpa. Este código está diseñado para extraer el valor máximo de los

sensores de ambos dispositivos. Es importante señalar que los datos del dispositivo Kallpa se registran en microvoltios (μV), mientras que los del analizador SPT se presentan en sus unidades correspondientes, es decir, gravedades ($\text{g}'\text{s}$) y micro deformaciones ($\mu\epsilon$). El investigador calcula el promedio de cada conjunto de datos, y el factor de calibración se determina como la relación entre el promedio de los datos obtenidos por el analizador SPT y el promedio de los datos obtenidos por el analizador Kallpa. Posteriormente, se realizan gráficos de regresión lineal, incluyendo el coeficiente de determinación (R^2). El valor de R^2 se utiliza para evaluar la fiabilidad de los factores de calibración hallados, proporcionando una medida cuantitativa de la calidad del ajuste de la regresión.

En la figura 103, se presenta la gráfica de calibración del acelerómetro K11670, cuyos datos fueron registrados por el dispositivo Kallpa. Estos datos se compararon con los del sensor K13548, registrado por el Analizador SPT. A partir de este análisis, se determinó un factor de calibración de $79.44 \mu\text{V}/\text{g}'\text{s}$ para el sensor mencionado.

Además, se llevaron a cabo análisis similares con los otros sensores. Por ejemplo, en la figura 104 se muestra la calibración del deformímetro 590AW1 en comparación con el deformímetro 590AW, obteniéndose un factor de calibración de $8.94 \text{ uV}/\text{ue}$. Siguiendo este procedimiento con los últimos dos sensores, representados en las figuras 105 y 106, se encontraron factores de calibración de $51.62 \text{ uV}/\text{g}'\text{s}$ para el acelerómetro K13548 y $8.46 \text{ uV}/\text{ue}$ para el deformímetro 590AW2.

Es crucial destacar que el coeficiente de determinación (R^2) en los sensores es lo suficientemente cercano a uno, lo que valida la confiabilidad de los datos recolectados y analizados. Sin embargo, para los deformímetros, este valor es aún más cercano a la unidad, aproximadamente 0.96. Esta diferencia se atribuye a la forma en que se conectan los sensores a la varilla. Mientras que los deformímetros están incrustados y firmemente unidos a la varilla, los acelerómetros están fijados mediante pernos. Esto resulta en una mayor variación en los acelerómetros comparado con los deformímetros al momento de realizar el ensayo SPT.

Figura 103

Calibración del acelerómetro K16670

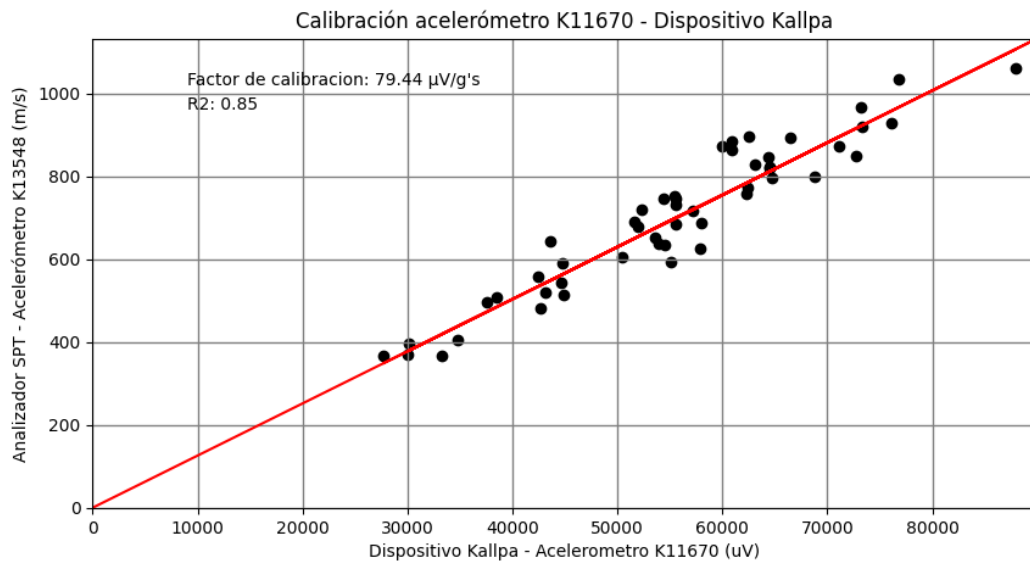


Figura 104

Calibración del deformímetro 590AW1

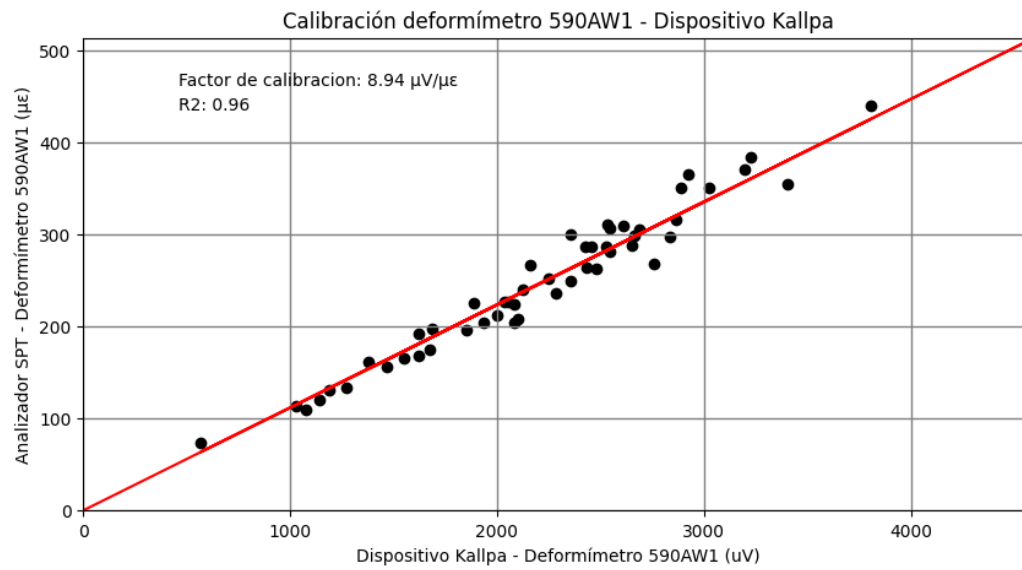


Figura 105

Calibración del acelerómetro K13548

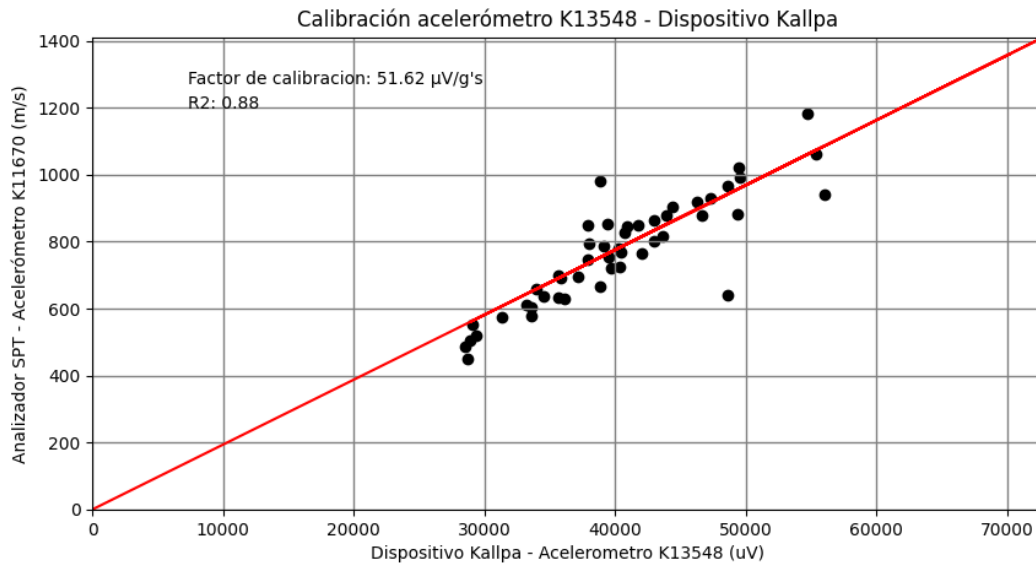
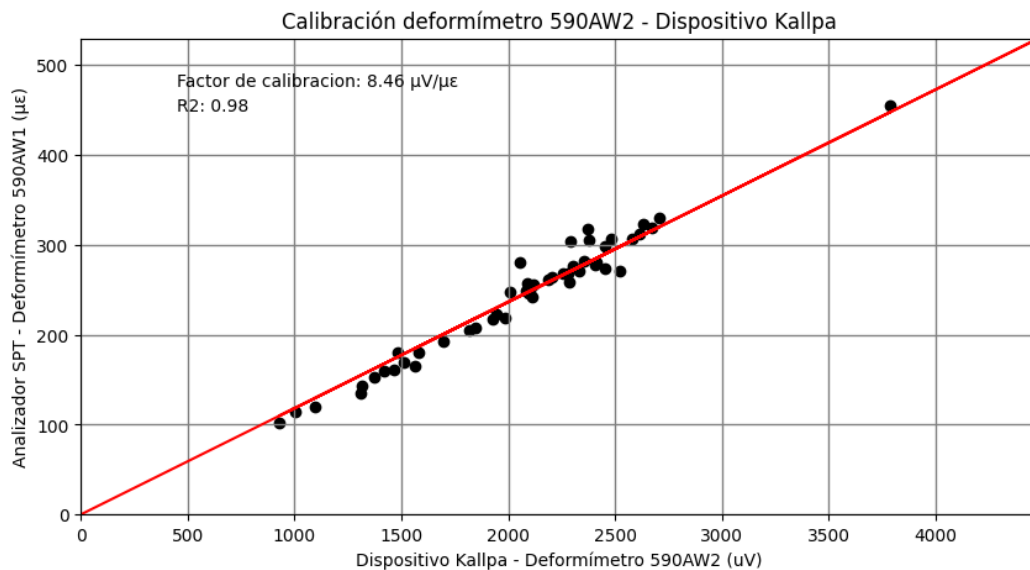


Figura 106

Calibración del deformímetro 590AW2



3.4 Desempeño del dispositivo Kallpa

Esta sección se centra en las pruebas de campo del dispositivo Kallpa. Estas pruebas se realizaron en la Universidad de Ica, un lugar seleccionado por sus condiciones de suelo adecuadas para ensayos SPT profundos. El objetivo principal es comparar la efectividad y precisión del dispositivo Kallpa realizando un ensayo SPT en campo, estableciendo así la viabilidad del dispositivo para mediciones de energía en entornos reales.

3.4.1 *Recolección de datos*

Los ensayos se llevaron a cabo en la Universidad de Ica San Luis Gonzaga, como se observa en la figura 107, donde se muestra el dispositivo y el software preparados para iniciar el ensayo SPT manual. En esta ocasión, a diferencia del proceso de calibración, los cuatro sensores se conectaron al dispositivo Kallpa. Los ensayos SPT se efectuaron a intervalos de un metro, empezando desde 1 metro hasta 1.45 metros, seguido de 2 metros hasta 2.45 metros, y así sucesivamente, hasta alcanzar una profundidad de 11 metros.

Figura 107

Dispositivo Kallpa en la Universidad de Ica



En las etapas iniciales del ensayo, se registraron temperaturas relativamente bajas, aproximadamente 15 grados Celsius. Posteriormente, cerca de las 11 de la mañana y alrededor de la mitad del ensayo, la temperatura aumentó hasta alcanzar los 28 grados.

Durante este período, tanto el dispositivo Kallpa como la laptop estuvieron expuestos directamente al sol, lo que provocó un aumento en su temperatura. Sin embargo, este incremento térmico no tuvo ningún impacto adverso en la recolección de datos. Por lo tanto, la recopilación de datos por parte del dispositivo Kallpa se realizó de manera exitosa y sin contratiempos.

3.4.2 Resultados de la prueba

Los resultados obtenidos están disponibles en los archivos PDF generados para cada intervalo de profundidad. Dado que se realizaron mediciones en 11 diferentes profundidades, se presentará un resumen de estos, enfocándose en los promedios obtenidos. Para una revisión detallada de los resultados completos, se pueden consultar los PDFs en el Anexo 01.

Tabla 5

Resumen de resultados 1 m-1.45 m

Summary result

Instr.	Blows	N	N60	Average	Average	Average	Average	Average
Length	Applied	Value	Value	FMX	VMX	BPM	EFV	ETR
m	/150mm			kN	m/s	bpm	J	%
1 - 1.45	[6, 7, 11]	18	17.0	103.2	4.3	23.5	266.5	56.3

Tabla 6

Resumen de resultados 2 m-2.45 m

Summary result

Instr.	Blows	N	N60	Average	Average	Average	Average	Average
Length	Applied	Value	Value	FMX	VMX	BPM	EFV	ETR
m	/150mm			kN	m/s	bpm	J	%
2 - 2.45	[5, 8, 11]	19	18.0	84.1	3.7	18.9	276.1	58.4

Tabla 7

Resumen de resultados 3 m-3.45 m

Summary result

Instr.	Blows	N	N60	Average	Average	Average	Average	Average
Length	Applied	Value	Value	FMX	VMX	BPM	EFV	ETR
m	/150mm			kN	m/s	bpm	J	%
3 - 3.45	[6, 11, 13]	24	24.0	85.5	3.9	22.0	285.4	60.3

Tabla 8*Resumen de resultados 4 m-4.45 m*

Summary result

Instr.	Blows	N	N60	Average	Average	Average	Average	Average
Length	Applied	Value	Value	FMX	VMX	BPM	EFV	ETR
m	/150mm			kN	m/s	bpm	J	%
4 - 4.45	[0, 13, 25]	38	39.0	82.5	4.0	18.1	289.4	61.2

Tabla 9*Resumen de resultados 5 m-5.45 m*

Summary result

Instr.	Blows	N	N60	Average	Average	Average	Average	Average
Length	Applied	Value	Value	FMX	VMX	BPM	EFV	ETR
m	/150mm			kN	m/s	bpm	J	%
5 - 5.45	[10, 16, 16]	32	36.0	93.8	4.2	24.3	318.6	67.4

Tabla 10*Resumen de resultados 6 m-6.45 m*

Summary result

Instr.	Blows	N	N60	Average	Average	Average	Average	Average
Length	Applied	Value	Value	FMX	VMX	BPM	EFV	ETR
m	/150mm			kN	m/s	bpm	J	%
6 - 6.45	[9, 12, 15]	27	31.0	96.7	4.2	23.9	328.1	69.4

Tabla 11*Resumen de resultados 7 m-7.45 m*

Summary result

Instr.	Blows	N	N60	Average	Average	Average	Average	Average
Length	Applied	Value	Value	FMX	VMX	BPM	EFV	ETR
m	/150mm			kN	m/s	bpm	J	%
7 - 7.45	[9, 19, 25]	44	50.0	96.0	4.1	19.8	321.3	67.9

Tabla 12*Resumen de resultados 8 m-8.45 m*

Summary result

Instr.	Blows	N	N60	Average	Average	Average	Average	Average
Length	Applied	Value	Value	FMX	VMX	BPM	EFV	ETR
m	/150mm			kN	m/s	bpm	J	%
8 - 8.45	[10, 15, 24]	39	41.0	87.7	4.1	20.9	295.0	62.4

Tabla 13**Resumen de resultados 9 m-9.45 m**

Summary result

Instr.	Blows	N	N60	Average	Average	Average	Average	Average
Length	Applied	Value	Value	FMX	VMX	BPM	EFV	ETR
m	/150mm			kN	m/s	bpm	J	%
9 - 9.45	[6, 18, 25]	43	45.0	90.4	4.0	22.2	295.1	62.4

Tabla 14**Resumen de resultados 10 m-10.45 m**

Summary result

Instr.	Blows	N	N60	Average	Average	Average	Average	Average
Length	Applied	Value	Value	FMX	VMX	BPM	EFV	ETR
m	/150mm			kN	m/s	bpm	J	%
10 - 10.45	[6, 11, 9]	20	19.0	93.1	4.3	24.4	274.7	58.1

Tabla 15**Resumen de resultados 11 m-11.45 m**

Summary result

Instr.	Blows	N	N60	Average	Average	Average	Average	Average
Length	Applied	Value	Value	FMX	VMX	BPM	EFV	ETR
m	/150mm			kN	m/s	bpm	J	%
11 - 11.45	[5, 5, 8]	13	14.0	80.7	3.9	16.0	295.4	62.4

Los resultados demuestran que la energía promedio medida está en el rango del 59% al 69%, lo cual se alinea con los estándares aceptados para ensayos SPT manuales. Esta alineación confirma la viabilidad del dispositivo Kallpa para medir la energía de caída del martillo en ensayos SPT de manera precisa y fiable.

3.4.3 Costos del dispositivo Kallpa

Al finalizar este capítulo, se presenta una evaluación detallada de los costos asociados al diseño del dispositivo Kallpa. La Tabla 16 destaca los componentes críticos utilizados en la construcción del dispositivo. Para mantener un equilibrio entre detalle y claridad, se ha optado por no desglosar cada detalle de resistencia y capacitor; no obstante, se ha seleccionado cada uno de estos componentes por su alta precisión y mínimo margen de error,

lo cual es fundamental para garantizar la precisión en las mediciones del dispositivo Kallpa.

El análisis de costos, tal como se refleja en la tabla, revela que el gasto total estimado es de S/. 2,040.50. Esta estimación incluye todos los gastos adicionales, como los gastos de importación, desaduanaje, envío, etc; resaltando que la adquisición de la mayoría de los componentes se realizó a través de reconocidas plataformas internacionales como Digi-Key y Mouser Electronics, así como la compra de otros materiales a nivel local en el conocido mercado de Paruro en Lima, Perú. La suma de estos componentes pone de manifiesto la factibilidad económica de ensamblar un dispositivo Kallpa, que no solo es accesible en términos de precio sino también competente y confiable para llevar a cabo análisis de energía en ensayos SPT, ofreciendo una alternativa viable y de bajo coste frente a los analizadores estándar del mercado.

Tabla 16

Tabla de costos del dispositivo Kallpa

Ítem	Descripción	Cantidad	Precio unitario	Total
1	Raspberry Pi 4B+ 8GB RAM	1	S/ 385.00	S/ 385.00
2	ADC MCP3564	4	S/ 52.50	S/ 210.00
3	LT 6657	4	S/ 60.00	S/ 240.00
4	LM2940 - 9V	1	S/ 18.00	S/ 18.00
5	BD90FD0 - 9V	1	S/ 13.50	S/ 13.50
6	LM1117 - 5V	1	S/ 9.00	S/ 9.00
7	MIC29300 - 5V	1	S/ 27.00	S/ 27.00
8	MCP1825S - 3.3V	1	S/ 6.00	S/ 6.00
9	MCP1754S - 3.3V	1	S/ 4.50	S/ 4.50
10	CLOCK OSC 18.4 MHz	1	S/ 7.50	S/ 7.50
11	LT3045	2	S/ 48.00	S/ 96.00
12	Terminal circular 19 pines	1	S/ 180.00	S/ 180.00
13	Conector RJ45	1	S/ 215.00	S/ 215.00
14	Terminal USB tipo C	1	S/ 86.50	S/ 86.50
15	Baquelita Fibra de vidrio	1	S/ 24.00	S/ 24.00
16	Juego de pernos	1	S/ 24.00	S/ 24.00
17	CAJA AN-1321-AB	1	S/ 240.00	S/ 240.00
18	Juego de resistencias y capacitores	1	S/ 127.50	S/ 127.50
19	Batería 12 V	1	S/ 77.00	S/ 77.00
20	Cable ethernet	1	S/ 25.00	S/ 25.00
21	Cable de poder	1	S/ 25.00	S/ 25.00
			TOTAL	S/ 2,040.50

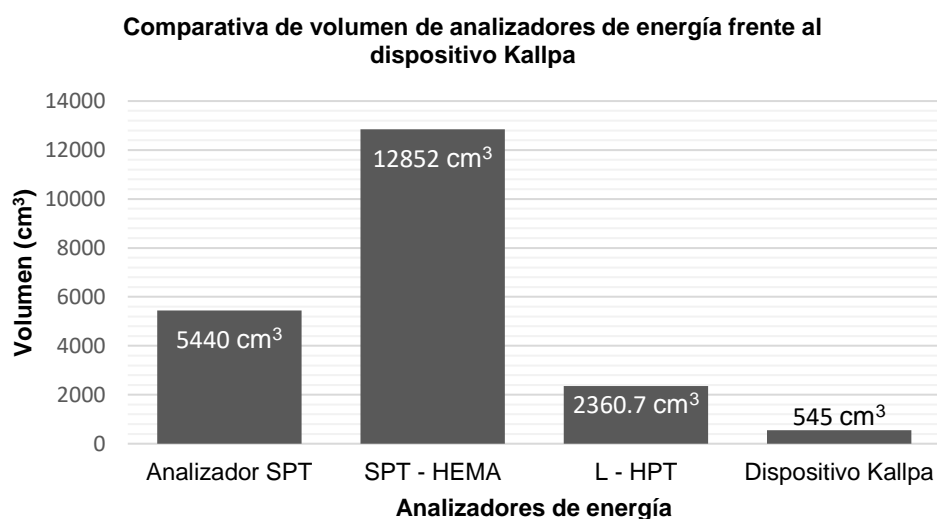
Capítulo 4. Análisis y discusión de resultados

En este capítulo se discuten los hallazgos obtenidos durante el desarrollo de la presente investigación, focalizándose específicamente en el capítulo 3.

En la sección 3.1, se dedicó al diseño electrónico y la construcción del dispositivo Kallpa. Para ello, se revisaron los diferentes analizadores de energía disponibles en el mundo. Entre los más destacados estaban aquellos de origen estadounidense, indio y chino. Estos analizadores compartían características comunes y necesarias, según lo estipulado por la norma ASTM D 4633. Una desventaja común a los tres era su considerable tamaño, por lo que Kallpa fue diseñado con el propósito de ser más compacto, logrando medidas de 175 x 51 x 61 mm. La figura 108 ilustra una comparativa del volumen en cm^3 entre los analizadores de energía frente al dispositivo Kallpa. Se evidencia que el dispositivo Kallpa es significativamente más reducido en comparación con los analizadores de energía; por ejemplo, el SPT-HEMA es el de mayor tamaño y es aproximadamente 20 veces más voluminoso que el analizador Kallpa, mientras que el analizador SPT es alrededor de 9 veces más grande que el dispositivo Kallpa. Esto evidencia que el analizador Kallpa es más compacto y portátil en contraste con los otros dispositivos disponibles.

Figura 108

Comparativa de volumen de analizadores de energía frente al dispositivo Kallpa



En la sección 3.1, también se vio la construcción de la placa de circuito impreso (PCB), esta se diseñó para que pudiera ser alojada junto con la Raspberry. Es importante destacar que el diseño final de la PCB no fue una solución inicial, sino el resultado de múltiples iteraciones y pruebas de PCB para alcanzar la versión óptima que capturara las señales de los sensores de manera eficiente. La Figura 109 exhibe los prototipos de PCB elaborados durante el proceso de desarrollo del producto final.

Figura 109

Prototipos de PCB elaborados durante el desarrollo del producto final



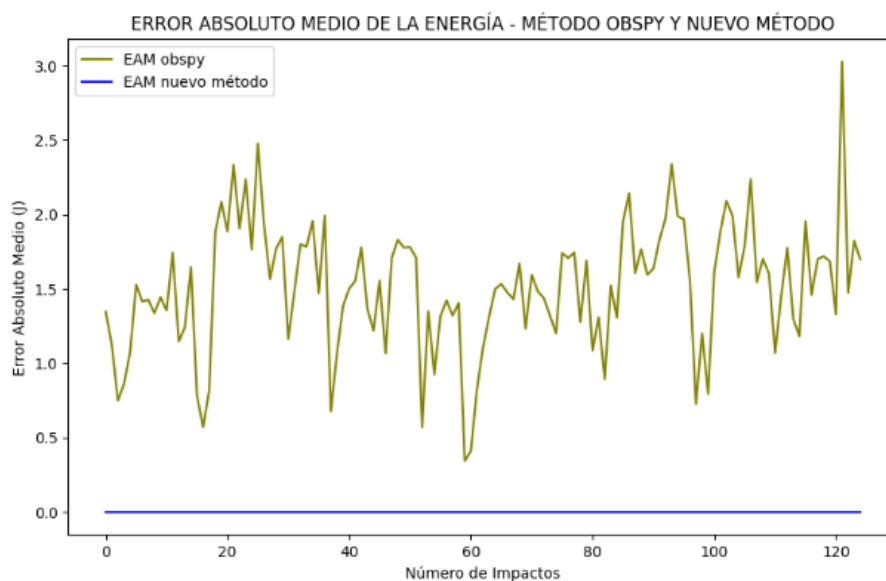
Asimismo, se garantizó que el resto de los terminales tuvieran protección IP68, dado que estos analizadores de energía se utilizan en entornos de trabajo de campo donde las condiciones climáticas y ambientales pueden ser adversas o complicadas. Al finalizar esta sección, se detalló la integración de los componentes en la estructura de protección.

La sección 3.2 se centró en la operatividad del software. Se desarrolló el código necesario para el Raspberry Pi, que permitiera controlar los ADCs de la placa de adquisición de señales, además de exponer las configuraciones requeridas por los ADCs para cada tipo de sensor, debido a las diferencias de ganancia entre el sensor de aceleración y deformación. Además, se exploró el funcionamiento del software Kallpa Processor, fundamental para interpretar los datos capturados por el dispositivo Kallpa. Este software, desarrollado en Python utilizando las librerías customtkinter, es una aplicación de escritorio para Windows. Se puso especial énfasis en mejorar las fórmulas empleadas para procesar las señales,

especialmente en la fórmula utilizada para calcular la velocidad, dado su impacto significativo en el cálculo de la energía. Durante la fase de desarrollo, se observó que la velocidad obtenida por el método Obspy, tal como se describe en esta sección, provocaba alteraciones significativas en los valores de energía. Esto subrayaba la necesidad de una fórmula de integración casi exacta para garantizar la precisión de las mediciones del dispositivo Kallpa. En la siguiente figura se evaluaron ambas fórmulas utilizando datos obtenidos de 125 impactos del analizador SPT. Se pudo observar que los errores de energía obtenidos con la fórmula Obspy eran distintos en cada impacto, llegando a un máximo de 3J y un promedio de 1.52 J, mientras que los errores con el nuevo método de velocidad eran prácticamente nulos (1.64e-05 J de promedio). Esto aseguraba que las fórmulas empleadas para calcular la velocidad fueran las adecuadas. De esta manera, el dispositivo analizador de energía Kallpa estuvo listo para ser calibrado y probado en el campo.

Figura 110

Error absoluto medio de la energía - Método Obspy y nuevo método

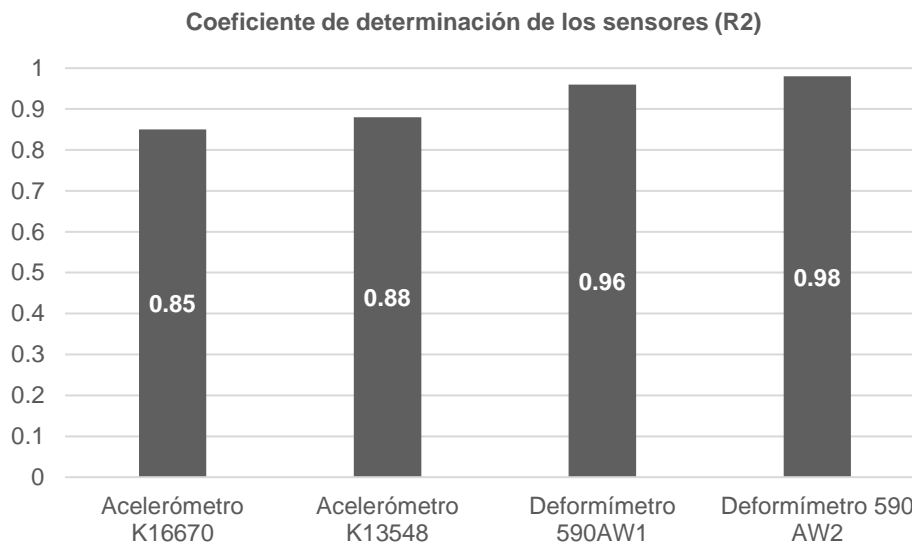


En la sección 3.3, se presentaron los resultados de la calibración del dispositivo y del software en comparación con el analizador SPT. La calibración se realizó mediante el método de comparación, utilizando como equipo de referencia el analizador SPT de Pile Inc. Para ello, se llevó a cabo un ensayo en paralelo, colocando los cuatro sensores en la varilla, dos acelerómetros y dos deformímetros. Luego, se conectó una pareja de sensores (acelerómetro

y deformímetro) al analizador SPT, y la otra pareja de sensores al dispositivo Kallpa. De esta manera, en un mismo impacto se obtuvieron dos señales de aceleración y dos señales de deformación, lo que permitió comparar estas señales para determinar el factor de calibración. Se logró un coeficiente R2 cercano al ideal (1), tal como se muestra en la figura 111. Aunque los sensores de aceleración mostraron un R2 ligeramente inferior al de los deformímetros (0.85 y 0.88), este valor aún se consideró alto y válido. Esta diferencia se atribuyó a la forma en que se instalaron los acelerómetros en la varilla. De este modo, el alto valor de R2 indica una correlación fiable entre los datos, confirmando el éxito de la calibración.

Figura 111

Coeficiente de determinación de los sensores (R2)

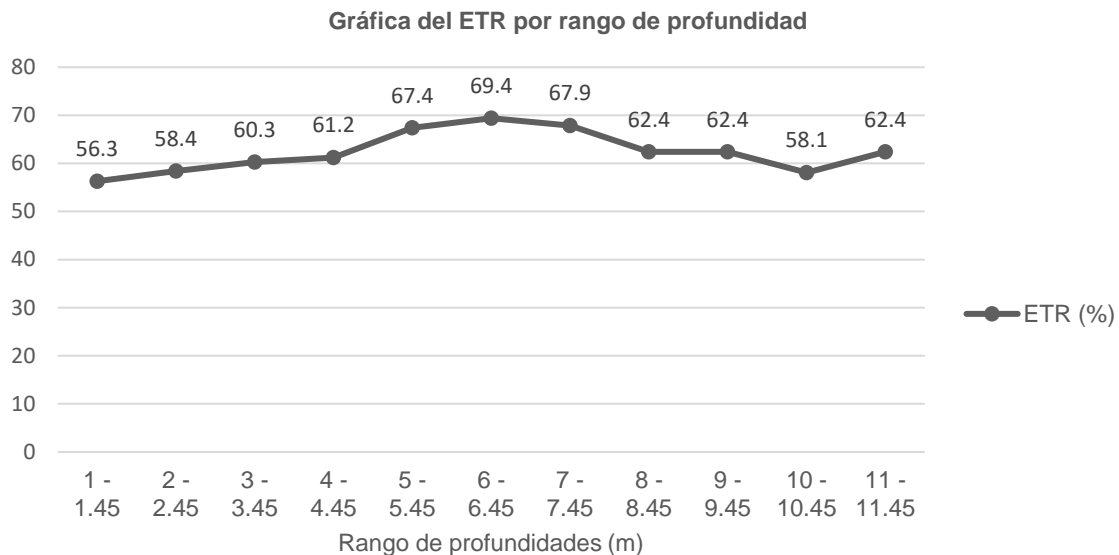


En la sección 3.4 se destaca la necesidad de someter al dispositivo Kallpa a pruebas en condiciones reales, lo que llevó al equipo desde Lima hasta Ica para realizar ensayos SPT en el campo. La elección de Ica se debió a que su terreno permite una mayor profundidad de penetración en comparación con el suelo predominantemente gravoso de Lima, lo que posibilita alcanzar profundidades de hasta 11 metros. El ensayo SPT de campo, que se completó en aproximadamente seis horas, demostró la eficacia del dispositivo en la práctica. Además, la batería no supuso ningún impedimento durante el desarrollo del ensayo. En la figura 112 se presentan los resultados obtenidos en cada intervalo de profundidad. Evidenciando así, que la energía se encuentra dentro del rango adecuado para una máquina

manual de ensayos SPT (entre 50% y 70%). Por lo tanto, los resultados se consideran válidos y demuestran el buen funcionamiento del dispositivo Kallpa.

Figura 112

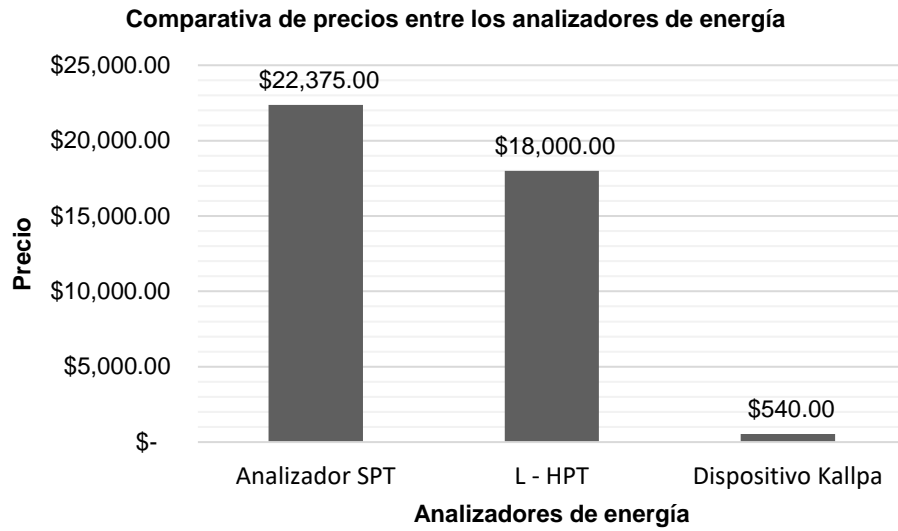
Gráfica del ETR por rango de profundidad



Al finalizar esta sección, se presenta una tabla de costos que detalla que la fabricación del dispositivo Kallpa implicó un desembolso de S/ 2,040.50, equivalente a aproximadamente \$540.00 (considerando una tasa de cambio de \$1.00 = S/ 3.80). La Figura 112 muestra una comparación de precios entre los analizadores de energía, el analizador SPT, el L-HPT y el dispositivo Kallpa. Cabe destacar que no se encontró información sobre el precio del analizador SPT-HEMA. En esta evaluación de precios, se observa que el analizador SPT es 40 veces más caro que el dispositivo Kallpa, dado que el analizador SPT tiene un costo de \$22,375 en comparación con los \$540 del dispositivo Kallpa. Además, el analizador de energía chino, el L-HPT, también presenta un precio elevado de \$18,000. Este análisis subraya el logro de desarrollar un dispositivo analizador de energía con un costo muy reducido.

Figura 113

Comparativa de precios entre los analizadores de energía



Para concluir este capítulo, se puede resaltar la importancia de los resultados obtenidos en la investigación, que han demostrado la viabilidad y eficacia del dispositivo Kallpa en el análisis de energía en ensayos SPT. Se ha mostrado cómo el diseño electrónico, la operatividad del software y la calibración del dispositivo fueron fundamentales para garantizar mediciones precisas y fiables. Además, se destacó la prueba exitosa del dispositivo en condiciones reales de campo en Ica, donde se demostró su funcionalidad y capacidad para realizar mediciones en terrenos con mayor profundidad de penetración.

Conclusiones

Se ha diseñado exitosamente un dispositivo electrónico de medición de energía para ensayos SPT que no solo es de bajo costo sino también personalizable. Este dispositivo, denominado Kallpa, ha demostrado su capacidad para medir la energía de caída del martillo de manera precisa, utilizando avanzadas técnicas de procesamiento de señales. La implementación de este dispositivo ofrece una solución rentable y adaptable para la industria geotécnica.

Se ha diseñado y construido el dispositivo electrónico Kallpa con éxito, cumpliendo con el objetivo de proporcionar una medición precisa de la energía en los ensayos de penetración estándar SPT. Los resultados obtenidos han validado la eficacia del diseño en condiciones de campo.

Se han identificado y seleccionado meticulosamente los componentes fundamentales para el dispositivo Kallpa, garantizando la precisión en la medición de la energía de caída del martillo. Los componentes seleccionados han resultado ser idóneos para las necesidades del dispositivo, equilibrando costo y rendimiento.

El funcionamiento del dispositivo Kallpa ha sido validado con éxito mediante el uso de sensores de aceleración y deformación. Las pruebas han demostrado que el dispositivo proporciona mediciones de energía confiables y consistentes, lo cual es esencial para la exactitud de los ensayos SPT.

Se ha determinado la técnica de integración más eficiente y precisa para el dispositivo Kallpa. Esta técnica ha optimizado el proceso de desarrollo y ha permitido alcanzar mediciones precisas de la energía de caída del martillo. La aplicación de esta técnica ha mejorado significativamente la precisión de los datos capturados durante los ensayos SPT.

Recomendaciones

Durante el desarrollo del proyecto, se encontró que la comunicación SPI entre el Raspberry Pi y los ADC's era más eficiente cuando se utilizaba el lenguaje C en lugar de Python. A pesar de los intentos por incrementar la velocidad de comunicación en Python mediante la biblioteca `spidev`, las lecturas seguían siendo ineficientes. El cambio a lenguaje C y la adopción de la biblioteca `pigpio` resultaron en una mejora significativa de la velocidad. Por lo tanto, se sugiere enfáticamente optar por lenguaje C y `pigpio` para aquellos que buscan optimizar la comunicación SPI en un Raspberry Pi.

Es importante considerar que cualquier aumento en la resolución de bits de un ADC, o en el número de canales, impactará negativamente en la frecuencia de muestreo. Si el proyecto requiere de un adquirente de señales con una frecuencia de muestreo superior a 100kHz, con resoluciones mayores a 16 bits, o con más de cuatro canales, se aconseja explorar alternativas al ADC MCP3564 o al Raspberry Pi. Las pruebas realizadas indican que las capacidades de muestreo mencionadas representan el límite máximo para estos dispositivos.

Ante las limitaciones identificadas en cuanto a la frecuencia de muestreo y resolución, se aconseja investigar activamente otras plataformas o tecnologías más avanzadas. Específicamente, se podría considerar el uso de FPGA (Field-Programmable Gate Array), conocidos por su capacidad para alcanzar altas frecuencias de muestreo y resoluciones elevadas. Aunque programar FPGAs puede presentar cierta complejidad, representan una alternativa prometedora para aplicaciones que requieren estos niveles de desempeño.

A pesar de que el foco del proyecto ha estado en la precisión y efectividad del dispositivo, no se debe subestimar la importancia de una interfaz de usuario intuitiva. Se propone desarrollar una interfaz gráfica más interactiva y fácil de usar, que mejore la manera en que los usuarios interactúan con el dispositivo. Aunque se utilizó la biblioteca `CustomTkinter` en este proyecto, se sugiere considerar alternativas como `PyQt` para futuros

desarrollos, especialmente si se continúa trabajando con Python. PyQt ofrece opciones más personalizables y puede enriquecer significativamente la experiencia del usuario final.

Aunque el funcionamiento efectivo del dispositivo Kallpa requiere de una varilla instrumentada y acelerómetros, es factible fabricar estos componentes localmente. Las varillas pueden adquirirse dentro del Perú, mientras que elementos como los strain gauges, los cables terminales y los sensores de aceleración MEMS tendrían que ser importados. El soporte para el sensor de aceleración, que puede ser de aluminio, es un material fácilmente accesible en el país. Por tanto, se alienta la construcción íntegra de un sistema de medición de energía en el ámbito local, para reducir la dependencia de soluciones extranjeras. Este enfoque no solo fomenta la autosuficiencia, sino que también inspira la creación de otros dispositivos innovadores en Perú, ampliando así la capacidad tecnológica nacional en lugar de depender exclusivamente de importaciones.

Referencias bibliográficas

- ABC Geotechnical Consulting. (2023). *Equipos para Sondaje con Ensayo de Penetración Estándar o Ensayo SPT* [Imagen]. Extraído de la página web: <https://geotecniaymecanicasuelosabc.com/wp-content/uploads/2021/08/SPT-2.jpg>
- Aggour, M. S., & Radding, W. R. (2001). *Standard Penetration Test (SPT) Correction*. Report submitted to Maryland State Highway Administration, Office of Policy and Research, Contract No: SP007B48. *The Bridge Engineering Software and Technology (BEST) Center, Department of Civil and Environmental Engineering, University of Maryland, College Park, MD 20742.*
- Ambardar, A. (2002). *Procesamiento de señales analógicas y digitales*. España: Thomson.
- Anbazhagan, P., Ayush, K., Yadhunandan, M. E., Siriwanth, K., Suryanarayana, K., & Sahodar, G. (2022). *Effective Use of SPT: Hammer Energy Measurement and Integrated Subsurface Investigation*. *Indian Geotechnical Journal*, 52(5), 1079–1096. <https://doi.org/10.1007/s40098-022-00609-z>
- ASTM D 4633. *Standard Test Method for Energy Measurement for Dynamic Penetrometers*. ASTM International.
- ASTM D 6066. *Standard Practice for Determining the Normalized Penetration Resistance of Sands for Evaluation of Liquefaction Potential*. ASTM International.
- ASTM D1586. *Standard Test Method for Standard Penetration Test (SPT) and Split-Barrel Sampling of Soils*. ASTM International.
- Batilas, A. V., Pelekis, P. C., Roussos, P. G., & Athanasopoulos, G. A. (2016). *SPT Energy Measurements: Manual vs. Automatic Hammer*. *Geotechnical and Geological Engineering*. Springer International Publishing Switzerland. DOI: 10.1007/s10706-

- Biringen, E., & Davie, J. (2008). *SPT Automatic Hammer Efficiency Revisited*. En *International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering* (pp. 1). Missouri University of Science and Technology. <https://scholarsmine.mst.edu/icchge/6icchge/session04/14>
- De Fazio, R., Stabile, M., De Vittorio, M., Velázquez, R., & Visconti, P. (2021). *An Overview of Wearable Piezoresistive and Inertial Sensors for Respiration Rate Monitoring*. *Electronics*, 10, 2178. <https://doi.org/10.3390/electronics10172178>
- Figuroa Flores, E., & Jaramillo Bopp, M. A. (2014). *Medición de energía en ensayos SPT*. *Actas del VIII Congreso Chileno de Ingeniería Geotécnica*.
- Indrasenan, T., & Nawaz, B. A. (2017, 2-4 de abril). *Geotechnical Investigation and Energy Efficiency of Standard Penetration Testing Hammers*. En A. Editor (Ed.), *Proceedings of the 2nd International Conference on Geotechnical Research and Engineering (ICGRE 123, pp. ICGRE 123-1)*. DOI: 10.11159/icgre17.123
- Ji, P., Yang, J., Zhang, N., Zhai, Q., Li, M., Wang, Y., Shen, T., & Satyanaga, A. (2023). *Energy Measurement in Standard Penetration Tests*. *Sustainability*, 15, 4763. <https://doi.org/10.3390/su15064763>
- Lee, C., An, S., & Lee, W. (2013). *Real-time monitoring of SPT donut hammer motion and SPT energy transfer ratio using digital line-scan camera and pile driving analyzer*. *Acta Geotechnica*, 9, 959–968. <https://doi.org/10.1007/s11440-012-0197-0>
- Lee, J.-S., & Byun, Y.-H. (2020). *Instrumented Cone Penetrometer for Dense Layer Characterization*. *Sensors*, 20(20), 5732. <https://doi.org/10.3390/s20205732>
- Likins, G., Pisciak, G., & Rausche, F. (2008). *PDA Testing: 2008 State of the Art*. En

Proceedings of the 8th International Conference on the Application of Stress Wave Theory to Piles (pp. 395-402). Lisbon, Portugal.

MathWorks. (2023). *Introducción a los filtros paso bajo*. Recuperado de <https://la.mathworks.com/discovery/low-pass-filter.html>

Microchip Technology. (2022). *MCP3561/2/4: Two/Four/Eight-Channel, 153.6 ksps, Low-Noise 24-Bit Delta-Sigma ADCs*. Mouser Electronics. Recuperado de https://www.mouser.pe/datasheet/2/268/MCP3561_2_4_Family_Data_Sheet_DS20006181C-2257924.pdf

Mouser Electronics. (2023). *Bud Industries AN-1321-AB*. Recuperado de <https://www.mouser.pe/ProductDetail/563-AN-1321-AB>

ObsPy. (2022). *ObsPy Documentation (1.4.0)*. Recuperado de <https://docs.obspy.org/>

ObsPy. (2023). *Filtering Seismograms* [Figura]. Recuperado de https://docs.obspy.org/tutorial/code_snippets/filtering_seismograms.html

Park, G. W., Hong, W. T., & Kim, S. Y. (2020). *Application of Energy Monitoring Module for Evaluation of Transferred Energy into SPT Sampler*. In *Proceedings of the 6th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ISC2020-356)*.

Perotti, D. M. A. A. (2021). *Cravação dinâmica do amostrador SPT com energia crescente* [Disertación de maestría, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo]. São Carlos, Brasil.

Pile Dynamics, Inc. (2015). *Manual for the SPT Analyzer System*.

Pile Dynamics. (2023). *SPT Analyzer* [Fotografía]. Pile. Recuperado de <https://www.pile.com/es/products/sistema-pile-driving-analyzer-pda/>

Proakis, J. G., & Manolakis, D. G. (1996). *Digital Signal Processing: Principles, Algorithms, and Applications*. Third Edition. Prentice-Hall International, Inc. Upper Saddle River, New Jersey.

Raspberry Pi. (2023). *Raspberry Pi 4*. Recuperado de <https://www.raspberrypi.com/products/raspberry-pi-4-model-b/>

Santiago Prowald, J. B. (2000). *Calibración de acelerómetros para la medida de microaceleraciones en aplicaciones espaciales* [Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Madrid, Escuela Técnica Superior de Ingenieros Aeronáuticos]. Madrid, España.

Shanghai Ruistar Instrument Science & Technology Company Limited (RSI). (s.f.). *Low and High Strain Integrated Dynamic Pile Tester* [Fotografía]. Recuperado de <http://ruistar.com.cn/en/index.php/Product/show/id/49>

Smith, S. W. (2002). *"Digital Signal Processing: A Practical Guide for Engineers and Scientists"* (Primera edición). Newnes.

Suarez Diaz, J. (2023). *Ensayos "in situ"* [PowerPoint]. Geología y geotecnia, Universidad Nacional de Rosario. https://www.fceia.unr.edu.ar/geologiaygeotecnia/0955_ENSAYOS_DE_SUELOS_IN_SITU-%20Colombia.pdf

Syscon Instruments. (2023). *Standard Penetration Test Hammer Energy Measurement Apparatus*. Recuperado de <https://sysconinstruments.com/spt-hema.html>

Thusyanthan, I., & Nawaz, B. A. (2017). *Effect of SPT Hammer Energy Efficiency in the Bearing Capacity Evaluation in Sands*. In *Proceedings of the 2nd World Congress on Civil, Structural, and Environmental Engineering (CSEE'17)* (Paper No. ICGRE 123, pp. ICGRE 123-1). Barcelona, Spain. Publisher: Springer International Publishing.

DOI: 10.11159/icgre17.123. ISSN: 2371-5294

Universidad de Valencia. (2023). *Muestreo, cuantificación y codificación*. Universidad de Valencia. Recuperado el 04, diciembre, 2023, de <https://www.uv.es/masefor/PAGINAS/muestreo.html>

Vermont Agency of Transportation. (2009). *Evaluation of SPT Hammer Energy Variability* (No. RSCH012-703). Vermont Agency of Transportation.

Anexos

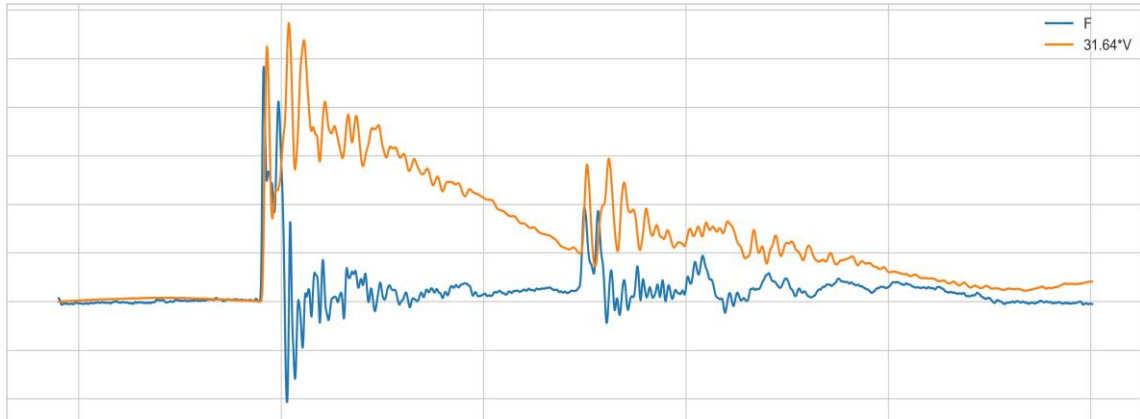
Anexo 1 Reporte de ensayo SPT 1 m – 1.45 m.....	1
Anexo 2 Reporte de ensayo SPT 2 m – 2.45 m.....	3
Anexo 3 Reporte de ensayo SPT 3 m – 3.45 m.....	5
Anexo 4 Reporte de ensayo SPT 4 m – 4.45 m.....	7
Anexo 5 Reporte de ensayo SPT 5 m – 5.45 m.....	9
Anexo 6 Reporte de ensayo SPT 6 m – 6.45 m.....	11
Anexo 7 Reporte de ensayo SPT 7 m – 7.45 m.....	13
Anexo 8 Reporte de ensayo SPT 8 m – 8.45 m.....	16
Anexo 9 Reporte de ensayo SPT 9 m – 9.45 m.....	19
Anexo 10 Reporte de ensayo SPT 10 m – 10.45 m.....	22
Anexo 11 Reporte de ensayo SPT 11 m – 11.45 m.....	24

Anexo 1

Reporte de ensayo SPT 1 m – 1.45 m

SPT - ENERGY ANALIZER

AR: 7.80595 cm²
 EM: 206843 MPa
 ET: 473 J



F1 : [590AW1] 204.51 PDICAL (1) FF2

F2 : [590AW2] 203.63 PDICAL (1) FF2

A3 (PR): [K13548] 374.7 mv/6.4v/5000g (1) VF2

A4 (PR): [K13329] 394.9 mv/6.4v/5000g (1) VF2

FMX: Maximun Force
 Energy

VMX: Maximum Velocity

BPM: Blows/Minute

EFV: Maximun Energy

ETR: Theoric

BL#	BC	FMX	VMX	BPM	EFV	ETR
	/150mm	kN	m/s	bpm	J	%
1	6	96.57	3.62	20.4	260.78	55.13
2	6	101.11	4.62	16.7	271.42	57.38
3	6	88.83	4.37	16.1	315.26	66.65
4	6	110.44	4.63	23.1	290.69	61.46
5	6	92.52	3.81	24.7	277.2	58.6
6	6	116.98	5.06	15.3	284.12	60.07
7	7	102.85	4.01	25.0	320.42	67.74
8	7	100.61	4.72	20.3	319.64	67.58
9	7	105.57	4.52	22.8	287.29	60.74
10	7	99.33	4.04	17.3	206.63	43.68
11	7	101.2	4.95	18.4	289.35	61.17
12	7	108.31	4.75	19.6	263.28	55.66
13	7	95.46	4.44	23.3	317.22	67.07
14	11	96.14	4.82	22.3	269.36	56.95

15	11	100.72	4.09	15.5	327.6	69.26
16	11	102.14	4.03	23.3	240.9	50.93
17	11	105.81	4.71	22.3	227.79	48.16
18	11	107.8	4.36	23.1	297.02	62.79
19	11	105.74	4.29	24.4	339.76	71.83
20	11	105.78	4.2	20.3	315.73	66.75
21	11	100.59	1.87	18.3	21.32	4.51
22	11	104.97	4.34	17.5	283.88	60.02
23	11	107.17	4.21	19.1	280.35	59.27
24	11	106.83	4.16	17.6	189.48	40.06

Summary result

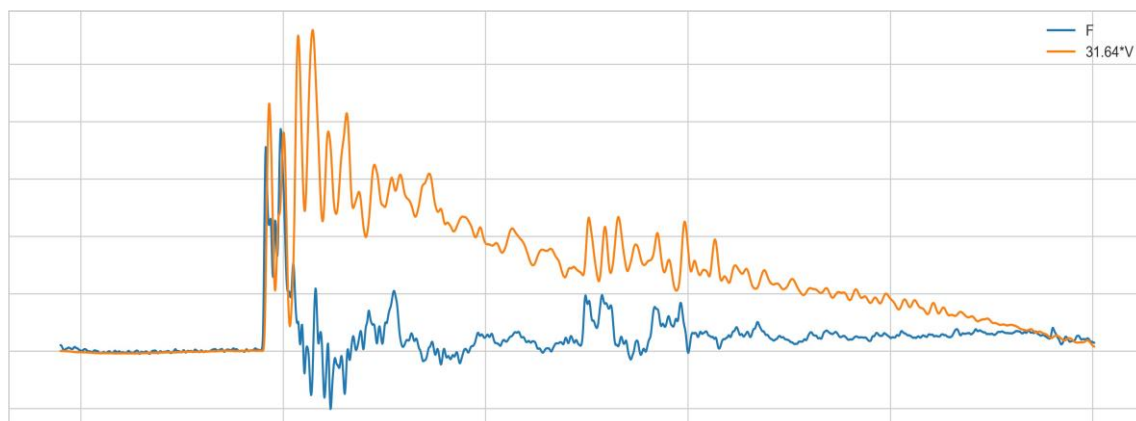
Instr.	Blows	N	N60	Average	Average	Average	Average	Average
Length	Applied	Value	Value	FMX	VMX	BPM	EFV	ETR
m	/150mm			kN	m/s	bpm	J	%
1 - 1.45	[6, 7, 11]	18	17.0	103.2	4.3	23.5	266.5	56.3

Anexo 2

Reporte de ensayo SPT 2 m – 2.45 m

SPT - ENERGY ANALIZER

AR: 7.80595 cm²
 EM: 206843 MPa
 ET: 473 J



F1 : [590AW1] 204.51 PDICAL (1) FF2

F2 : [590AW2] 203.63 PDICAL (1) FF2

A3 (PR): [K13548] 374.7 mv/6.4v/5000g (1) VF2

A4 (PR): [K13329] 394.9 mv/6.4v/5000g (1) VF2

FMX: Maximun Force
 Energy

VMX: Maximum Velocity

BPM: Blows/Minute

EFV: Maximun Energy

ETR: Theoric

BL#	BC	FMX	VMX	BPM	EFV	ETR
	/150mm	kN	m/s	bpm	J	%
1	5	77.39	3.54	24.5	264.92	56.01
2	5	87.79	3.9	15.4	241.88	51.14
3	5	84.3	4.03	19.9	319.91	67.63
4	5	92.03	4.32	17.3	242.05	51.17
5	5	97.79	2.53	22.6	162.53	34.36
6	8	81.01	3.37	23.1	262.79	55.56
7	8	99.57	4.16	18.1	381.51	80.66
8	8	95.91	4.47	24.0	297.04	62.8
9	8	94.34	3.83	16.6	384.8	81.35
10	8	76.61	3.53	22.4	263.78	55.77
11	8	91.47	4.07	20.7	294.69	62.3
12	8	65.65	3.52	23.4	304.21	64.32
13	8	85.84	3.54	17.4	218.27	46.15
14	11	95.29	3.24	24.5	233.41	49.35

15	11	91.71	3.56	15.6	162.6	34.38
16	11	86.57	3.94	21.3	298.55	63.12
17	11	92.06	3.93	21.2	279.42	59.07
18	11	63.08	3.35	17.3	260.95	55.17
19	11	76.2	3.42	15.8	267.07	56.46
20	11	72.91	3.14	23.3	260.13	55.0
21	11	96.96	3.88	24.0	177.55	37.54
22	11	73.61	3.62	24.1	350.64	74.13
23	11	80.79	3.73	15.4	279.23	59.03
24	11	77.72	4.27	16.0	269.94	57.07

Summary result

Instr.	Blows	N	N60	Average	Average	Average	Average	Average
Length	Applied	Value	Value	FMX	VMX	BPM	EFV	ETR
m	/150mm			kN	m/s	bpm	J	%
2 - 2.45	[5, 8, 11]	19	18.0	84.1	3.7	18.9	276.1	58.4

Anexo 3

Reporte de ensayo SPT 3 m – 3.45 m

SPT - ENERGY ANALIZER

AR: 7.80595 cm²
 EM: 206843 MPa
 ET: 473 J



F1 : [590AW1] 204.51 PDICAL (1) FF2

F2 : [590AW2] 203.63 PDICAL (1) FF2

A3 (PR): [K13548] 374.7 mv/6.4v/5000g (1) VF2

A4 (PR): [K13329] 394.9 mv/6.4v/5000g (1) VF2

FMX: Maximun Force
 Energy

VMX: Maximum Velocity

BPM: Blows/Minute

EFV: Maximun Energy

ETR: Theoric

BL#	BC	FMX	VMX	BPM	EFV	ETR
	/150mm	kN	m/s	bpm	J	%
1	6	73.25	3.03	18.4	224.98	47.56
2	6	93.56	2.73	22.2	145.54	30.77
3	6	88.23	2.87	15.4	252.5	53.38
4	6	81.51	3.84	19.4	256.95	54.32
5	6	78.75	3.94	22.7	306.07	64.71
6	6	86.16	3.95	21.6	266.91	56.43
7	11	92.58	3.92	15.3	321.89	68.05
8	11	91.21	3.98	17.4	271.23	57.34
9	11	82.11	3.73	18.5	259.48	54.86
10	11	85.78	4.03	22.1	330.77	69.93
11	11	89.32	4.08	24.2	292.62	61.86
12	11	88.85	4.07	18.6	305.46	64.58
13	11	77.22	3.75	19.6	248.2	52.47
14	11	82.23	3.91	18.2	297.78	62.96

15	11	92.24	3.41	15.9	310.99	65.75
16	11	87.01	3.59	18.2	290.2	61.35
17	11	95.66	4.19	22.0	341.11	72.12
18	13	95.83	4.12	17.3	287.95	60.88
19	13	77.46	3.89	23.4	290.82	61.48
20	13	80.93	3.66	19.8	271.85	57.47
21	13	80.91	3.63	15.3	255.6	54.04
22	13	75.35	3.87	18.8	287.91	60.87
23	13	91.21	3.53	17.4	383.32	81.04
24	13	75.58	4.23	21.5	309.93	65.52
25	13	80.84	3.51	19.1	253.4	53.57
26	13	97.28	3.99	22.1	241.05	50.96
27	13	79.43	4.17	24.3	203.62	43.05
28	13	84.37	3.97	18.7	309.57	65.45
29	13	84.68	4.13	15.1	180.4	38.14
30	13	84.77	3.81	15.2	303.43	64.15

Summary result

Instr.	Blows	N	N60	Average	Average	Average	Average	Average
Length	Applied	Value	Value	FMX	VMX	BPM	EFV	ETR
m	/150mm			kN	m/s	bpm	J	%
3 - 3.45	[6, 11, 13]	24	24.0	85.5	3.9	22.0	285.4	60.3

Anexo 4

Reporte de ensayo SPT 4 m – 4.45 m

SPT - ENERGY ANALIZER

AR: 7.80595 cm²
EM: 206843 MPa
ET: 473 J



F1 : [590AW1] 204.51 PDICAL (1) FF2

F2 : [590AW2] 203.63 PDICAL (1) FF2

A3 (PR): [K13548] 374.7 mv/6.4v/5000g (1) VF2

A4 (PR): [K13329] 394.9 mv/6.4v/5000g (1) VF2

FMX: Maximun Force
Energy

VMX: Maximum Velocity

BPM: Blows/Minute

EFV: Maximun Energy

ETR: Theoric

BL#	BC	FMX	VMX	BPM	EFV	ETR
	/150mm	kN	m/s	bpm	J	%
1	13	85.27	3.5	16.8	265.34	56.1
2	13	78.44	3.72	15.6	269.23	56.92
3	13	93.8	4.4	23.2	372.63	78.78
4	13	87.74	3.2	18.3	230.21	48.67
5	13	85.17	4.09	16.3	362.53	76.64
6	13	82.79	2.94	22.5	276.38	58.43
7	13	89.73	3.7	16.4	269.97	57.08
8	13	81.82	3.73	17.2	250.55	52.97
9	13	91.4	3.85	17.7	270.98	57.29
10	13	72.01	3.32	15.5	279.7	59.13
11	13	85.09	3.73	20.9	248.85	52.61
12	13	97.18	2.82	23.1	226.86	47.96
13	13	87.12	4.27	24.8	339.1	71.69
14	25	80.65	3.84	19.6	291.75	61.68

15	25	84.48	4.12	20.0	304.43	64.36
16	25	79.76	4.26	20.2	305.94	64.68
17	25	81.53	3.86	22.6	171.63	36.29
18	25	75.11	4.21	18.0	235.11	49.71
19	25	88.84	3.14	22.8	222.83	47.11
20	25	82.72	3.39	20.9	277.67	58.7
21	25	73.91	3.49	16.1	275.72	58.29
22	25	72.72	4.57	19.7	352.9	74.61
23	25	88.6	4.74	22.5	303.23	64.11
24	25	68.21	4.66	16.2	369.96	78.22
25	25	79.79	4.67	21.4	335.41	70.91
26	25	88.93	4.41	24.1	289.82	61.27
27	25	81.82	4.21	19.2	297.43	62.88
28	25	73.04	4.5	23.6	291.45	61.62
29	25	73.03	4.56	21.9	279.02	58.99
30	25	83.38	4.42	20.1	319.65	67.58
31	25	80.19	3.51	17.6	302.7	64.0
32	25	102.09	3.85	17.9	239.3	50.59
33	25	70.46	4.47	24.9	290.99	61.52
34	25	74.3	4.83	19.3	284.99	60.25
35	25	80.34	4.38	24.7	328.32	69.41
36	25	84.79	4.77	22.0	346.99	73.36
37	25	80.46	3.69	24.8	306.1	64.71
38	25	87.41	4.07	24.5	311.57	65.87

Summary result

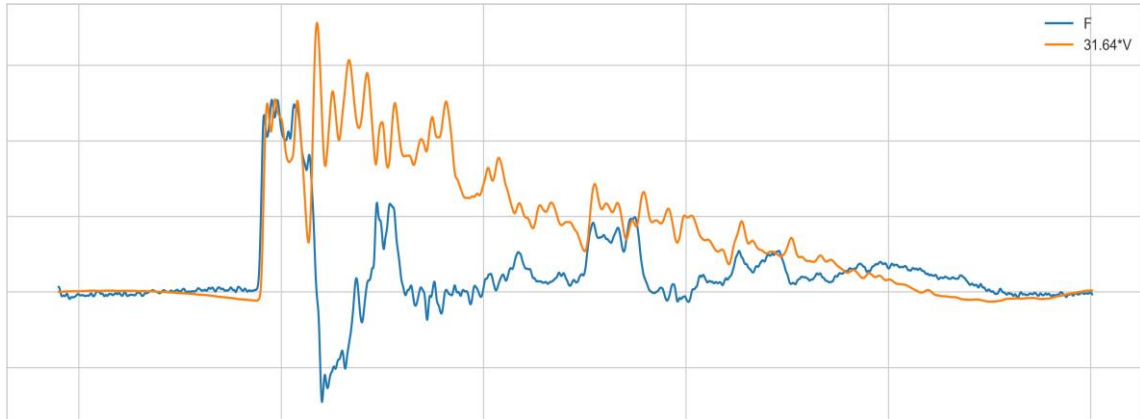
Instr.	Blows	N	N60	Average	Average	Average	Average	Average
Length	Applied	Value	Value	FMX	VMX	BPM	EFV	ETR
m	/150mm			kN	m/s	bpm	J	%
4 - 4.45	[0, 13, 25]	38	39.0	82.5	4.0	18.1	289.4	61.2

Anexo 5

Reporte de ensayo SPT 5 m – 5.45 m

SPT - ENERGY ANALIZER

AR: 7.80595 cm²
 EM: 206843 MPa
 ET: 473 J



F1 : [590AW1] 204.51 PDICAL (1) FF2

F2 : [590AW2] 203.63 PDICAL (1) FF2

A3 (PR): [K13548] 374.7 mv/6.4v/5000g (1) VF2

A4 (PR): [K13329] 394.9 mv/6.4v/5000g (1) VF2

FMX: Maximun Force
 Energy

VMX: Maximum Velocity

BPM: Blows/Minute

EFV: Maximun Energy

ETR: Theoric

BL#	BC	FMX	VMX	BPM	EFV	ETR
	/150mm	kN	m/s	bpm	J	%
1	10	50.82	2.25	19.0	173.18	36.61
2	10	72.42	2.88	21.9	286.56	60.58
3	10	77.96	3.23	15.2	260.43	55.06
4	10	80.36	3.37	17.5	249.96	52.85
5	10	85.25	3.7	22.6	275.6	58.27
6	10	84.03	3.85	23.9	248.99	52.64
7	10	92.4	4.12	16.1	231.92	49.03
8	10	96.25	4.11	21.6	297.69	62.94
9	10	94.41	4.43	21.9	289.63	61.23
10	10	95.66	4.09	24.4	296.67	62.72
11	16	96.14	4.64	15.8	306.28	64.75
12	16	104.62	4.38	18.9	323.9	68.48
13	16	96.92	4.76	21.8	322.02	68.08
14	16	91.97	3.96	23.2	286.62	60.6

15	16	91.01	4.46	15.2	287.22	60.72
16	16	108.02	4.41	16.9	446.2	94.33
17	16	83.56	3.86	20.9	307.13	64.93
18	16	92.42	4.04	17.2	327.99	69.34
19	16	86.23	3.69	23.0	295.47	62.47
20	16	90.13	4.37	23.6	302.26	63.9
21	16	78.78	3.38	22.0	264.54	55.93
22	16	86.05	3.85	22.1	311.21	65.79
23	16	102.23	4.2	19.8	368.49	77.9
24	16	95.74	4.18	17.1	308.05	65.13
25	16	102.67	4.6	23.4	319.59	67.57
26	16	84.0	3.81	16.3	317.27	67.08
27	16	95.66	4.52	17.2	320.92	67.85
28	16	84.19	2.93	20.8	225.48	47.67
29	16	97.68	4.4	16.0	391.73	82.82
30	16	95.83	4.07	15.4	291.46	61.62
31	16	104.19	4.16	24.8	309.56	65.45
32	16	85.74	4.37	18.0	323.79	68.45
33	16	91.01	4.19	22.2	293.8	62.11
34	16	91.78	4.46	22.2	317.42	67.11
35	16	96.91	4.15	20.1	297.65	62.93
36	16	84.39	4.35	19.6	253.73	53.64
37	16	97.05	5.41	20.3	470.97	99.57
38	16	99.72	4.26	19.4	320.23	67.7
39	16	104.29	4.42	17.9	385.28	81.45
40	16	95.64	4.92	23.8	334.14	70.64
41	16	94.66	4.12	22.5	273.4	57.8
42	16	91.47	4.59	25.0	291.64	61.66

Summary result

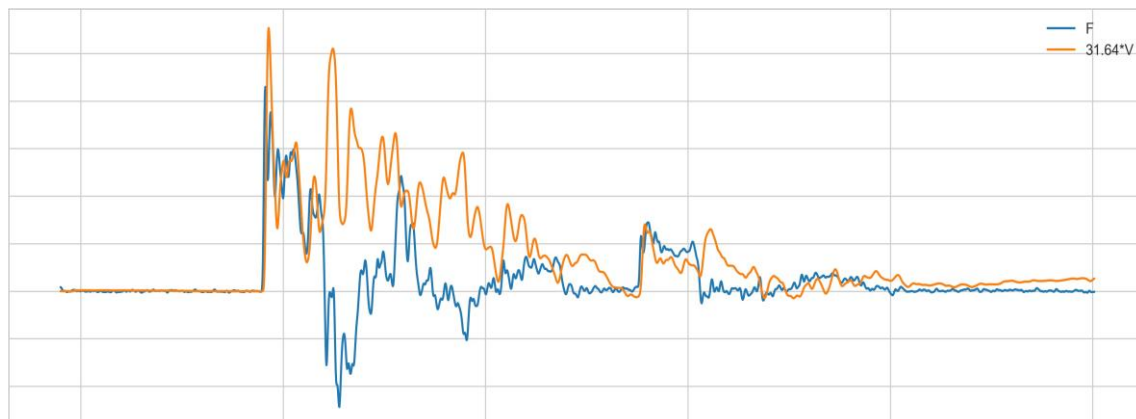
Instr.	Blows	N	N60	Average	Average	Average	Average	Average
Length	Applied	Value	Value	FMX	VMX	BPM	EFV	ETR
m	/150mm			kN	m/s	bpm	J	%
5 - 5.45	[10, 16, 16]	32	36.0	93.8	4.2	24.3	318.6	67.4

Anexo 6

Reporte de ensayo SPT 6 m – 6.45 m

SPT - ENERGY ANALIZER

AR: 7.80595 cm²
EM: 206843 MPa
ET: 473 J



F1 : [590AW1] 204.51 PDICAL (1) FF2

F2 : [590AW2] 203.63 PDICAL (1) FF2

A3 (PR): [K13548] 374.7 mv/6.4v/5000g (1) VF2

A4 (PR): [K13329] 394.9 mv/6.4v/5000g (1) VF2

FMX: Maximun Force
Energy

VMX: Maximum Velocity

BPM: Blows/Minute

EFV: Maximun Energy

ETR: Theoric

BL#	BC	FMX	VMX	BPM	EFV	ETR
	/150mm	kN	m/s	bpm	J	%
1	9	85.91	3.5	23.3	238.07	50.33
2	9	106.54	4.0	19.7	347.37	73.44
3	9	103.77	3.92	15.8	268.7	56.81
4	9	100.84	4.13	24.2	284.43	60.13
5	9	101.18	4.03	15.3	355.07	75.07
6	9	98.12	3.99	15.5	360.93	76.31
7	9	98.85	4.2	16.2	287.18	60.71
8	9	86.56	3.86	24.3	295.54	62.48
9	9	97.07	4.28	17.4	411.79	87.06
10	12	91.81	4.01	17.9	316.27	66.86
11	12	107.61	4.65	16.7	421.9	89.2
12	12	90.16	4.05	21.3	293.74	62.1
13	12	101.48	4.36	23.7	312.75	66.12
14	12	83.86	3.95	20.6	285.62	60.38

15	12	102.77	4.33	21.9	323.76	68.45
16	12	90.64	4.08	20.0	278.15	58.81
17	12	102.83	4.38	17.3	304.24	64.32
18	12	100.58	4.18	24.4	285.91	60.45
19	12	100.62	4.4	17.0	379.86	80.31
20	12	102.54	4.34	17.8	358.14	75.72
21	12	90.71	4.07	16.0	309.39	65.41
22	15	97.75	4.21	17.7	423.31	89.49
23	15	105.32	4.43	22.2	353.03	74.64
24	15	103.42	4.15	23.6	241.4	51.04
25	15	99.68	4.55	17.1	363.93	76.94
26	15	97.71	4.24	15.2	312.1	65.98
27	15	100.19	4.52	18.0	406.48	85.94
28	15	92.82	4.19	19.5	326.78	69.09
29	15	96.55	4.48	16.9	424.65	89.78
30	15	103.09	4.25	20.3	294.05	62.17
31	15	97.85	4.24	15.7	311.35	65.82
32	15	89.87	4.29	19.9	339.77	71.83
33	15	94.28	4.14	15.0	266.96	56.44
34	15	89.47	3.95	24.2	285.46	60.35
35	15	81.07	3.87	24.2	287.46	60.77
36	15	96.09	4.29	22.2	351.7	74.36

Summary result

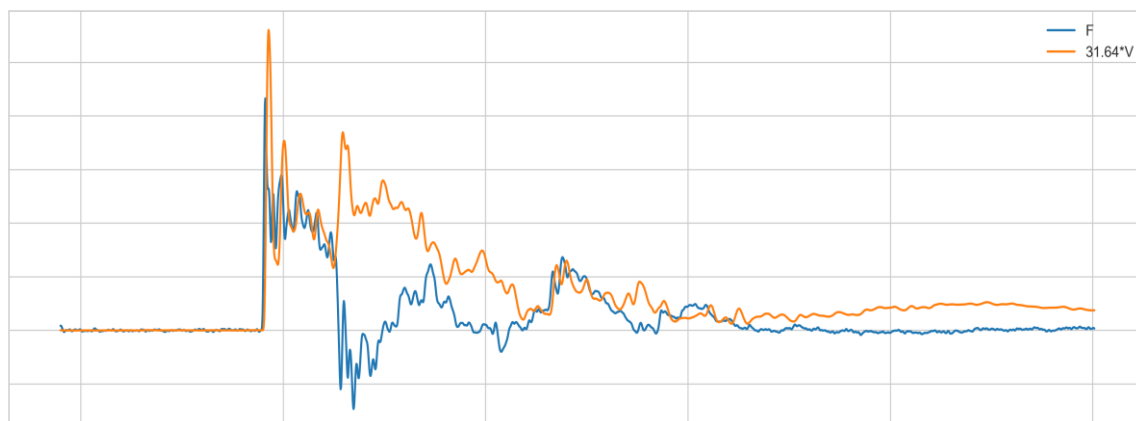
Instr.	Blows	N	N60	Average	Average	Average	Average	Average
Length	Applied	Value	Value	FMX	VMX	BPM	EFV	ETR
m	/150mm			kN	m/s	bpm	J	%
6 - 6.45	[9, 12, 15]	27	31.0	96.7	4.2	23.9	328.1	69.4

Anexo 7

Reporte de ensayo SPT 7 m – 7.45 m

SPT - ENERGY ANALIZER

AR: 7.80595 cm²
 EM: 206843 MPa
 ET: 473 J



F1 : [590AW1] 204.51 PDICAL (1) FF2

F2 : [590AW2] 203.63 PDICAL (1) FF2

A3 (PR): [K13548] 374.7 mv/6.4v/5000g (1) VF2

A4 (PR): [K13329] 394.9 mv/6.4v/5000g (1) VF2

FMX: Maximun Force
 Energy

VMX: Maximum Velocity

BPM: Blows/Minute

EFV: Maximun Energy

ETR: Theoric

BL#	BC	FMX	VMX	BPM	EFV	ETR
	/150mm	kN	m/s	bpm	J	%
1	9	86.46	3.54	16.7	270.29	57.14
2	9	87.84	3.68	18.9	287.2	60.72
3	9	81.64	3.48	23.9	295.02	62.37
4	9	89.78	4.05	21.0	329.86	69.74
5	9	93.8	4.08	17.0	337.69	71.39
6	9	87.4	4.08	21.1	338.28	71.52
7	9	103.95	4.48	20.6	334.27	70.67
8	9	97.58	3.99	22.4	412.47	87.2
9	9	98.34	3.97	21.6	206.14	43.58
10	19	96.7	4.4	16.5	504.28	106.61
11	19	103.13	4.5	15.2	311.62	65.88
12	19	94.82	4.25	18.6	297.4	62.88
13	19	94.17	4.4	17.1	259.41	54.84
14	19	94.52	4.33	22.9	313.64	66.31

15	19	98.26	4.42	19.4	337.57	71.37
16	19	96.84	4.46	21.5	316.23	66.86
17	19	95.33	4.31	15.3	348.03	73.58
18	19	101.53	4.35	20.5	330.91	69.96
19	19	91.93	4.47	18.7	344.67	72.87
20	19	95.07	4.21	20.9	347.35	73.44
21	19	93.92	4.13	20.0	334.15	70.64
22	19	93.75	4.04	20.3	308.82	65.29
23	19	88.72	4.12	16.3	359.14	75.93
24	19	88.06	3.98	23.6	328.51	69.45
25	19	92.84	4.25	18.1	317.6	67.15
26	19	99.56	3.9	16.6	264.13	55.84
27	19	89.72	3.95	24.6	313.06	66.19
28	19	100.15	4.38	21.9	347.16	73.4
29	25	98.56	4.29	18.9	321.7	68.01
30	25	95.72	4.2	24.4	320.98	67.86
31	25	94.43	4.15	15.7	328.92	69.54
32	25	101.68	4.32	18.5	378.24	79.97
33	25	96.56	4.23	18.8	317.28	67.08
34	25	95.46	4.13	18.2	295.67	62.51
35	25	87.4	3.99	21.8	282.32	59.69
36	25	106.17	4.57	16.3	355.23	75.1
37	25	89.43	4.16	22.1	307.45	65.0
38	25	107.96	4.76	18.8	378.45	80.01
39	25	81.64	4.24	17.8	314.91	66.58
40	25	94.06	4.36	16.1	340.0	71.88
41	25	94.64	3.57	15.4	296.93	62.78
42	25	97.35	3.84	21.6	298.76	63.16
43	25	86.98	3.3	20.1	275.3	58.2
44	25	88.23	3.42	18.4	328.42	69.43
45	25	90.24	3.37	21.9	260.65	55.11
46	25	96.11	3.94	19.6	313.36	66.25
47	25	109.57	3.49	22.7	300.74	63.58
48	25	100.88	4.03	21.3	318.93	67.43
49	25	96.8	4.17	22.6	355.46	75.15
50	25	100.75	4.12	23.8	274.94	58.13
51	25	101.39	4.1	24.9	304.45	64.37
52	25	97.8	4.19	16.8	303.51	64.17

53	25	106.9	4.46	18.6	279.18	59.02
----	----	-------	------	------	--------	-------

Summary result

Instr.	Blows	N	N60	Average	Average	Average	Average	Average
Length	Applied	Value	Value	FMX	VMX	BPM	EFV	ETR
m	/150mm			kN	m/s	bpm	J	%
7 - 7.45	[9, 19, 25]	44	50.0	96.0	4.1	19.8	321.3	67.9

Anexo 8

Reporte de ensayo SPT 8 m – 8.45 m

SPT - ENERGY ANALIZER

AR: 7.80595 cm²
 EM: 206843 MPa
 ET: 473 J



F1 : [590AW1] 204.51 PDICAL (1) FF2

F2 : [590AW2] 203.63 PDICAL (1) FF2

A3 (PR): [K13548] 374.7 mv/6.4v/5000g (1) VF2

A4 (PR): [K13329] 394.9 mv/6.4v/5000g (1) VF2

FMX: Maximun Force
 Energy

VMX: Maximum Velocity

BPM: Blows/Minute

EFV: Maximun Energy

ETR: Theoric

BL#	BC	FMX	VMX	BPM	EFV	ETR
	/150mm	kN	m/s	bpm	J	%
1	10	78.51	3.55	15.3	245.67	51.94
2	10	85.4	3.64	23.3	258.41	54.63
3	10	80.62	3.56	21.3	284.88	60.23
4	10	87.97	3.91	19.6	262.02	55.4
5	10	81.06	3.75	18.1	276.57	58.47
6	10	91.88	3.94	22.5	243.73	51.53
7	10	80.82	3.9	24.4	297.91	62.98
8	10	88.17	4.02	24.3	285.6	60.38
9	10	86.72	4.35	23.3	369.19	78.05
10	10	94.3	4.18	17.7	266.11	56.26
11	15	86.4	4.33	23.2	350.5	74.1
12	15	95.19	3.85	19.1	280.33	59.27
13	15	89.45	4.24	16.1	327.69	69.28

14	15	91.53	4.05	19.2	177.08	37.44
15	15	81.78	4.17	23.6	295.6	62.49
16	15	90.97	4.14	18.6	292.42	61.82
17	15	88.43	3.79	22.9	298.49	63.11
18	15	95.52	4.34	24.6	290.06	61.32
19	15	84.58	4.13	16.4	310.61	65.67
20	15	80.04	3.7	22.1	269.08	56.89
21	15	92.71	4.34	20.6	276.68	58.49
22	15	97.13	4.43	15.0	352.13	74.45
23	15	83.45	4.26	22.0	331.26	70.03
24	15	88.85	3.81	22.6	258.81	54.72
25	15	84.61	4.25	24.4	279.95	59.19
26	24	87.92	3.59	19.9	256.84	54.3
27	24	87.39	4.04	18.2	287.95	60.88
28	24	84.75	4.29	22.0	281.08	59.42
29	24	78.37	3.72	24.2	257.88	54.52
30	24	82.26	3.89	24.0	288.84	61.07
31	24	85.24	4.41	22.9	340.67	72.02
32	24	88.07	4.06	15.5	243.1	51.4
33	24	77.1	4.16	17.1	331.63	70.11
34	24	90.7	4.28	20.4	303.21	64.1
35	24	77.22	4.16	23.7	319.91	67.63
36	24	86.29	3.99	15.7	257.65	54.47
37	24	82.37	4.01	23.7	322.37	68.15
38	24	89.08	3.71	19.1	254.12	53.73
39	24	93.36	4.53	23.3	351.58	74.33
40	24	86.75	3.9	21.4	236.19	49.93
41	24	85.85	4.1	16.9	290.59	61.44
42	24	86.1	3.92	17.7	277.79	58.73
43	24	95.6	4.43	17.6	263.5	55.71
44	24	86.22	4.08	15.4	327.1	69.15
45	24	86.91	4.0	23.7	293.55	62.06
46	24	97.19	3.85	16.5	316.83	66.98
47	24	87.65	4.24	22.0	377.26	79.76
48	24	105.09	4.3	18.7	319.35	67.52
49	24	83.85	4.14	15.1	314.85	66.56

Summary result

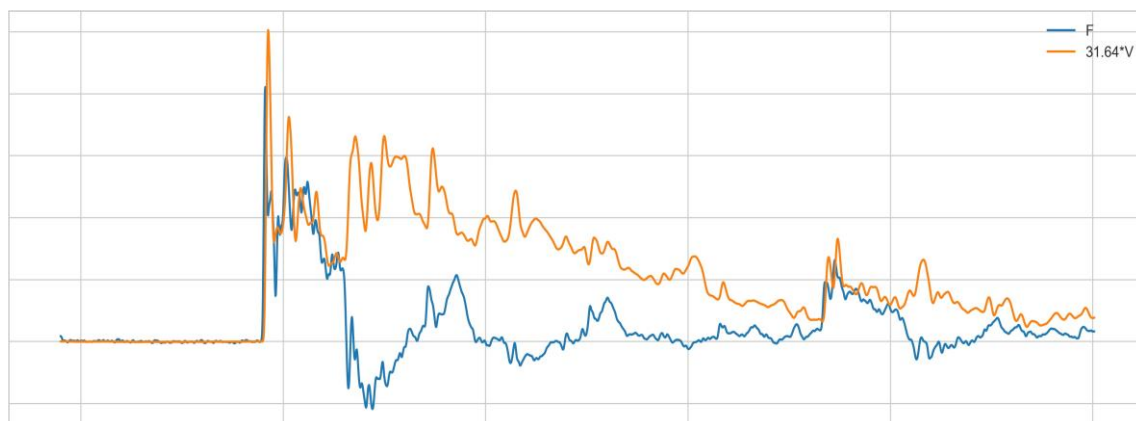
Instr.	Blows	N	N60	Average	Average	Average	Average	Average
Length	Applied	Value	Value	FMX	VMX	BPM	EFV	ETR
m	/150mm			kN	m/s	bpm	J	%
8 - 8.45	[10, 15, 24]	39	41.0	87.7	4.1	20.9	295.0	62.4

Anexo 9

Reporte de ensayo SPT 9 m – 9.45 m

SPT - ENERGY ANALIZER

AR: 7.80595 cm²
 EM: 206843 MPa
 ET: 473 J



F1 : [590AW1] 204.51 PDICAL (1) FF2

F2 : [590AW2] 203.63 PDICAL (1) FF2

A3 (PR): [K13548] 374.7 mv/6.4v/5000g (1) VF2

A4 (PR): [K13329] 394.9 mv/6.4v/5000g (1) VF2

FMX: Maximun Force
 Energy

VMX: Maximum Velocity

BPM: Blows/Minute

EFV: Maximun Energy

ETR: Theoric

BL#	BC	FMX	VMX	BPM	EFV	ETR
	/150mm	kN	m/s	bpm	J	%
1	6	82.08	3.18	24.4	263.82	55.78
2	6	84.95	3.5	17.9	210.26	44.45
3	6	87.91	3.45	17.4	200.34	42.36
4	6	88.61	3.66	17.3	248.73	52.59
5	6	76.78	3.46	19.9	271.86	57.48
6	6	94.5	3.77	19.7	221.49	46.83
7	18	86.47	2.86	20.9	227.27	48.05
8	18	80.45	3.34	15.3	219.61	46.43
9	18	86.56	3.01	21.7	247.32	52.29
10	18	85.68	3.61	21.1	273.52	57.83
11	18	82.0	3.52	22.1	241.45	51.05
12	18	91.77	3.15	16.0	233.21	49.3
13	18	102.02	3.06	18.7	360.56	76.23
14	18	93.74	3.44	22.4	279.2	59.03

15	18	85.99	3.49	22.9	230.98	48.83
16	18	81.46	3.42	23.9	216.42	45.75
17	18	87.5	3.98	17.3	257.15	54.37
18	18	86.57	3.66	16.2	288.12	60.91
19	18	96.54	3.8	18.6	284.17	60.08
20	18	109.09	4.5	18.4	362.21	76.58
21	18	93.91	3.84	24.9	228.4	48.29
22	18	84.04	4.15	24.2	311.3	65.81
23	18	81.65	4.03	22.5	353.06	74.64
24	18	86.35	4.1	24.8	289.89	61.29
25	25	95.32	3.98	21.4	272.04	57.51
26	25	85.99	3.92	21.1	324.58	68.62
27	25	93.22	4.27	18.0	328.66	69.48
28	25	89.94	4.35	22.6	299.96	63.42
29	25	87.46	4.3	24.1	323.44	68.38
30	25	89.42	4.47	24.1	326.53	69.03
31	25	94.48	4.05	20.6	297.95	62.99
32	25	90.35	4.4	18.2	308.47	65.22
33	25	89.2	4.43	16.0	322.28	68.14
34	25	82.26	4.12	23.8	263.24	55.65
35	25	100.87	4.12	21.5	314.25	66.44
36	25	97.25	4.27	22.4	322.76	68.24
37	25	92.54	4.46	19.6	332.67	70.33
38	25	90.34	4.02	19.4	345.75	73.1
39	25	86.55	4.42	24.7	306.36	64.77
40	25	87.52	4.56	15.3	360.05	76.12
41	25	97.47	4.16	23.7	346.09	73.17
42	25	94.75	4.21	23.4	245.3	51.86
43	25	84.03	4.03	24.7	323.11	68.31
44	25	88.26	4.3	24.7	305.21	64.53
45	25	97.62	4.41	15.6	277.78	58.73
46	25	97.0	4.51	16.4	315.62	66.73
47	25	91.92	4.09	23.5	307.46	65.0
48	25	81.79	3.97	16.9	301.2	63.68
49	25	100.34	3.86	17.0	315.78	66.76

Summary result

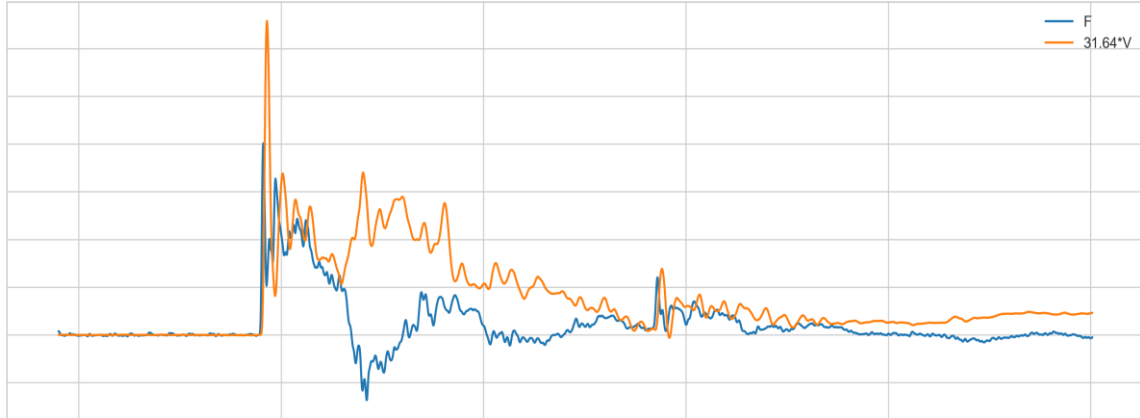
Instr.	Blows	N	N60	Average	Average	Average	Average	Average
Length	Applied	Value	Value	FMX	VMX	BPM	EFV	ETR
m	/150mm			kN	m/s	bpm	J	%
9 - 9.45	[6, 18, 25]	43	45.0	90.4	4.0	22.2	295.1	62.4

Anexo 10

Reporte de ensayo SPT 10 m – 10.45 m

SPT - ENERGY ANALIZER

AR: 7.80595 cm²
 EM: 206843 MPa
 ET: 473 J



F1 : [590AW1] 204.51 PDICAL (1) FF2

F2 : [590AW2] 203.63 PDICAL (1) FF2

A3 (PR): [K13548] 374.7 mv/6.4v/5000g (1) VF2

A4 (PR): [K13329] 394.9 mv/6.4v/5000g (1) VF2

FMX: Maximun Force VMX: Maximum Velocity BPM: Blows/Minute EFV: Maximun Energy ETR: Theoric Energy

BL#	BC	FMX	VMX	BPM	EFV	ETR
	/150mm	kN	m/s	bpm	J	%
1	6	80.26	4.16	18.7	235.7	49.83
2	6	88.24	4.28	22.7	204.2	43.17
3	6	93.18	4.46	20.6	304.32	64.34
4	6	95.27	4.53	22.0	287.35	60.75
5	6	91.63	4.36	17.4	258.65	54.68
6	6	90.05	4.43	21.7	347.07	73.38
7	11	93.45	4.32	16.5	275.92	58.33
8	11	96.14	4.61	21.9	299.5	63.32
9	11	88.6	4.34	22.7	310.41	65.63
10	11	93.99	4.36	22.3	299.18	63.25
11	11	94.53	4.44	22.7	326.88	69.11
12	11	92.63	4.08	24.2	304.46	64.37
13	11	93.38	4.52	23.6	280.3	59.26
14	11	92.07	4.43	22.3	327.42	69.22

15	11	87.78	4.21	25.0	234.92	49.67
16	11	88.36	4.24	19.0	276.05	58.36
17	11	91.29	3.91	20.9	286.18	60.5
18	9	91.31	4.4	16.0	250.88	53.04
19	9	89.81	4.13	15.7	189.57	40.08
20	9	93.17	4.17	19.5	265.18	56.06
21	9	96.72	4.38	24.7	270.01	57.08
22	9	100.49	4.48	21.2	194.04	41.02
23	9	85.04	4.14	19.8	301.05	63.65
24	9	100.4	4.52	17.9	293.3	62.01
25	9	93.22	4.29	23.8	231.21	48.88
26	9	99.12	4.59	20.0	277.87	58.75

Summary result

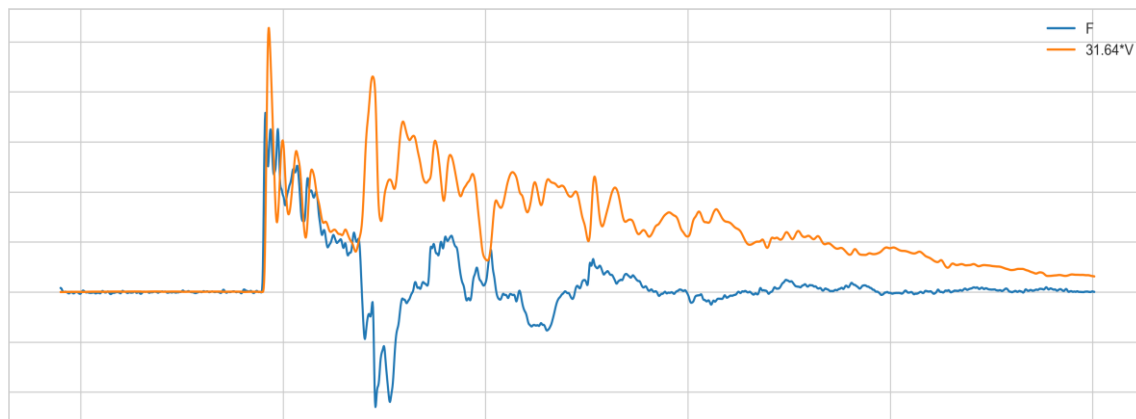
Instr.	Blows	N	N60	Average	Average	Average	Average	Average
Length	Applied	Value	Value	FMX	VMX	BPM	EFV	ETR
m	/150mm			kN	m/s	bpm	J	%
10 - 10.45	[6, 11, 9]	20	19.0	93.1	4.3	24.4	274.7	58.1

Anexo 11

Reporte de ensayo SPT 11 m – 11.45 m

SPT - ENERGY ANALIZER

AR: 7.80595 cm²
 EM: 206843 MPa
 ET: 473 J



F1 : [590AW1] 204.51 PDICAL (1) FF2

F2 : [590AW2] 203.63 PDICAL (1) FF2

A3 (PR): [K13548] 374.7 mv/6.4v/5000g (1) VF2

A4 (PR): [K13329] 394.9 mv/6.4v/5000g (1) VF2

FMX: Maximun Force
 Energy

VMX: Maximum Velocity

BPM: Blows/Minute

EFV: Maximun Energy

ETR: Theoric

BL#	BC	FMX	VMX	BPM	EFV	ETR
	/150mm	kN	m/s	bpm	J	%
1	5	71.59	3.34	23.5	218.7	46.24
2	5	86.65	3.64	23.5	258.54	54.66
3	5	97.94	3.88	16.9	341.83	72.27
4	5	91.95	4.07	20.2	241.25	51.0
5	5	91.31	4.08	20.0	275.94	58.34
6	5	75.87	3.36	24.8	257.51	54.44
7	5	74.35	3.59	17.0	312.64	66.1
8	5	71.32	3.49	22.0	284.26	60.1
9	5	72.35	3.61	24.6	249.21	52.69
10	5	84.46	4.05	17.7	296.63	62.71
11	8	95.78	4.6	20.7	346.54	73.26
12	8	83.88	4.25	20.3	309.66	65.47
13	8	75.17	3.26	20.5	244.97	51.79
14	8	83.42	4.14	17.8	280.1	59.22

15	8	70.5	3.75	18.8	266.44	56.33
16	8	81.58	4.44	20.9	355.23	75.1
17	8	89.27	4.33	18.5	303.97	64.26
18	8	90.53	4.29	23.0	332.92	70.38

Summary result

Instr.	Blows	N	N60	Average	Average	Average	Average	Average
Length	Applied	Value	Value	FMX	VMX	BPM	EFV	ETR
m	/150mm			kN	m/s	bpm	J	%
11 - 11.45	[5, 5, 8]	13	14.0	80.7	3.9	16.0	295.4	62.4