

UNIVERSIDAD LATINA DE COSTA RICA

**FACULTAD DE INGENIERÍAS Y TECNOLOGÍAS DE LA
INFORMACIÓN Y COMUNICACIÓN TIC's**

ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y MECÁNICA

LICENCIATURA EN INGENIERIA MECÁNICA

**Trabajo Final de Graduación para optar por el título de Licenciatura en
Ingeniería Mecánica**

Título:

Aprovechamiento de las ondas sísmicas como nueva fuente limpia y generación de energía eléctrica por medio de un mecanismo con base en la Ley de Faraday

Autor:

Felipe Alonso Díaz Mora

Heredia, Costa Rica

31 de agosto del 2021

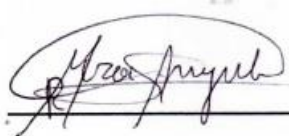
TRIBUNAL EXAMINADOR

Este proyecto titulado: Aprovechamiento de las ondas sísmicas como nueva fuente limpia y generación de energía eléctrica por medio de un mecanismo con base en la Ley de Faraday, por el (la) estudiante: Felipe Alonso Díaz Mora fue aprobado por el Tribunal Examinador de la carrera de Ingeniería Mecánica y Administración de la Universidad Latina, Sede Heredia, como requisito para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería Mecánica y Administración.



Ing. Ricardo Andrés González Fallas

Tutor



Ing. Rodolfo Mora Angulo

Lector



Ing. Oscar Jesús Delgado Jiménez

Representante

Heredia, 28 de agosto de 2021

Sres.

Miembros del Comité de Trabajos Finales de Graduación

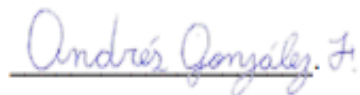
SD

Estimados señores:

He revisado y corregido el Trabajo Final de Graduación, denominado:
Aprovechamiento de las ondas sísmicas como nueva fuente limpia y generación
de energía eléctrica por medio de un mecanismo en base a la Ley de Faraday,
elaborado por el estudiante Felipe Alonso Díaz Mora puedan optar por
Licenciatura en Ingeniería Mecánica y Administración

Considero que dicho trabajo cumple con los requisitos formales y de contenido
exigidos por la Universidad, y por tanto lo recomiendo para su defensa oral ante el
Consejo Asesor.

Suscribe cordialmente,



Ing. Ricardo Andrés González Fallas

Tutor

Heredia, 28 de agosto de 2021

Sres.

Miembros del Comité de Trabajos Finales de Graduación

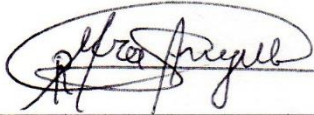
SD

Estimados señores:

He revisado y corregido el Trabajo Final de Graduación, denominado:
Aprovechamiento de las ondas sísmicas como nueva fuente limpia y generación de energía eléctrica por medio de un mecanismo con base en la Ley de Faraday, elaborado por el estudiante Felipe Alonso Díaz Mora puedan optar por **Licenciatura en Ingeniería Mecánica y Administración.**

~~Considero que dicho trabajo cumple con los requisitos formales y de contenido exigidos por la Universidad, y por tanto lo recomiendo para su defensa oral ante el Consejo Asesor.~~

Suscribe cordialmente,



Ing. Rodolfo Mora Angulo

CARTA DEL FILÓLOGO

Heredia, 16 de agosto del 2021

Señores
Tribunal Examinador
Escuela de Ingeniería Eléctrica y Mecánica
Universidad Latina de Costa Rica
S.D.

Estimados Señores:

Leí y corregí el Trabajo Final de Graduación, denominado: **Aprovechamiento de las ondas sísmicas como nueva fuente limpia y generación de energía eléctrica por medio de un mecanismo en base a la Ley de Faraday**, elaborado por el estudiante: **Felipe Alonso Díaz Mora**, cédula de identidad 116600026, para optar por el grado académico de **Licenciatura en Ingeniería Mecánica**.

Corregí el trabajo en aspectos, tales como: construcción de párrafos, vicios del lenguaje que se trasladan a lo escrito, ortografía, puntuación y otros relacionados con el campo filológico, y desde ese punto de vista considero que está listo para ser presentado como Trabajo Final de Graduación, por cuanto cumple con los requisitos establecidos por la Universidad.

Se suscribe de ustedes cordialmente,



Nombre completo: Lic. Zayda Ureña Araya

Número de Carné: 0163860

Teléfono: 87526130

DECLARACIÓN JURADA

Yo, Felipe Alonso Díaz Mora estudiante de la Universidad Latina de Costa Rica, declaro bajo la fe de juramento y consciente de las responsabilidades penales de este acto, que soy Autor Intelectual de la tesis titulada: Aprovechamiento de las ondas sísmicas como nueva fuente limpia y generación de energía eléctrica por medio de un mecanismo con base en la Ley de Faraday.

Por lo que libero a la Universidad de cualquier responsabilidad en caso de que mi declaración sea falsa.

Firmo en Curridabat, 12 de octubre de 2021.



Felipe Alonso Díaz Mora.

“Carta autorización del autor (es) para uso didáctico del Trabajo Final de Graduación”

Vigente a partir del 31 de Mayo de 2016, revisada el 24 de Abril de 2020

Instrucción: Complete el formulario en PDF, imprima, firme, escanee y adjunte en la página correspondiente del Trabajo Final de Graduación.

Yo (Nosotros):

Escriba Apellidos, Nombre del Autor(a). Para más de un autor separe con " ; "

Diaz Mora Felipe Alonso.

De la Carrera / Programa: **Ingeniería Mecánica.**

autor(es) del trabajo final de graduación titulado:

Aprovechamiento de las ondas sísmicas como nueva fuente limpia y generación de energía eléctrica por medio de un mecanismo en base a la Ley de Faraday.

Autorizo (autorizamos) a la Universidad Latina de Costa Rica, para que exponga mi trabajo como medio didáctico en el Centro de Recursos para el Aprendizaje y la Investigación (CRAI o Biblioteca), y con fines académicos permita a los usuarios su consulta y acceso mediante catálogos electrónicos, repositorios académicos nacionales o internacionales, página Web institucional, así como medios electrónicos en general, Internet, intranet, DVD, u otro formato conocido o por conocer; así como integrados en programas de cooperación bibliotecaria académicos, que permitan mostrar al mundo la producción académica de la Universidad a través de la visibilidad de su contenido.

De acuerdo a lo dispuesto en la Ley No. 6683 sobre derechos de autor y derechos conexos de Costa Rica, permita copiar, reproducir o transferir información del documento, conforme su uso educativo y debiendo citar en todo momento la fuente de información; únicamente podrá ser consultado, esto permitirá ampliar los conocimientos a las personas que hagan uso, siempre y cuando resguarden la completa información que allí se muestra, debiendo citar los datos bibliográficos de la obra en caso de usar información textual o paráfrasis de la misma.

La presente autorización se extiende el día (Día, fecha) **Cuatro** del mes **Febrero** de año **2021** a las **7:46 am**. Asimismo doy fe de la veracidad de los datos incluidos en el documento y eximo a la Universidad de cualquier responsabilidad por su autoría o cualquier situación de perjuicio que se pudiera presentar.

Firma(s) de los autores

Según orden de mención al inicio de ésta carta:



Céd: 116600026

Agradecimientos

Les agradezco a los profesores, compañeros y a la Universidad Latina de Costa Rica por su apoyo durante toda mi carrera.

Dedicatoria

La tesis está dedicada a la Virgen de los Ángeles.

Introducción

En el presente documento se realizará el estudio para comprobar si por medio de un mecanismo, se pueden aprovechar las ondas sísmicas para la generación de energía limpia, debido a que en el océano hay un mecanismo denominado “mareomotriz” con base en las ondas mecánicas de las olas. En este caso, se darán los fundamentos físicos-matemáticos para lograr aprovechar esta energía, que emerge de la fuerza de las placas tectónicas y su conversión, mediante la Ley de Faraday para la generación de energía eléctrica.

Por medio de información sobre la rama de la ciencia denominada “sismología”, y en reportes históricos de instituciones nacionales como el OVSICORI y la Red Sismológica Nacional, se especificarán las variables físicas que presentan estos fenómenos naturales que afectarán al sistema.

Con base en los datos de frecuencia de aparición sísmica, acordes con las magnitudes en estudio, se diseñará el mecanismo, usando un generador lineal basado en la Ley de Faraday. Este actuará de acuerdo con el comportamiento sísmico del tipo de roca presente en la región, en el caso de Costa Rica caliza y basalto. Según la forma de desplazamiento de las ondas mecánicas en el medio, se analizarán las características de los componentes del sistema, así como su ubicación conforme a la falla. Se dará un valor cuantitativo de la generación de acuerdo con la magnitud del evento, y según la cantidad de eventos registrados en un año, basándose en los datos proporcionados por el OVSICORI; este producirá 87,5 megavatios de electricidad en el rango de tiempo en estudio.

Índice

Capítulo 1	1
1.1. Síntoma	2
1.2. Causas	2
1.3. Pronóstico	3
1.4. Control del pronóstico	3
1.5. Formulación del problema	3
1.6. Sistematización del problema	4
1.7. Objetivo general	4
1.8. Objetivos específicos	4
1.9. Estado actual de la investigación	4
Capítulo 2	6
Marco situacional	7
Marco teórico	8
2.1. Terremotos	8
2.2. El primer sismógrafo	9
2.3. Sismógrafos actuales	11
2.4. Magnitud Richter	12
2.5. Ondas Sísmicas	13
2.6. Fórmulas sísmicas	15
2.7. Magnitud local (ML) o magnitud Richter	16
2.8. Magnitud superficial	20
2.9. Magnitud de duración o de coda	20
2.10. Magnitud del momento	21

2.11. Ondas mecánicas	22
2.12. Descripción matemática de las ondas mecánicas	24
2.13. Ecuación de la onda mecánica.....	25
2.13.1. Ecuación de la onda mecánica estacionaria.....	25
2.14. Rapidez de una onda mecánica transversal	26
2.15. Energía del movimiento ondulatorio de las ondas mecánicas.....	27
2.16. Tipos de suelo de Costa Rica.....	27
2.16.1. Características de los tipos de suelo de Costa Rica	28
2.17. Velocidades de las ondas sísmicas según el tipo de suelo	29
2.18. Amplificación de las ondas sísmicas	30
2.18.1. Frecuencia natural.....	31
2.19. Energía de un sismo	32
2.20. Generación de energía.....	35
2.20.1. Energía hidráulica	36
2.20.2. Energía eólica.....	36
2.20.3. Energía solar	37
2.20.4. Energía geotérmica.....	37
2.20.5. Petróleo.....	38
2.21. Ley de Faraday	38
2.22. Fórmula de Faraday	39
2.23. Ley de Lenz.....	40
2.23.1. Campos magnéticos variables en el tiempo	40
2.24. Corrientes de Foucault	41
2.25. Aplicaciones de la Ley de Faraday	41
2.25.1. Producción de corriente alterna.....	42

2.25.2. El alternador.....	42
2.25.3. El dinamo	43
2.25.4. Inducción mutua	44
2.26. Energía y el campo magnético.....	44
2.27. Generador eléctrico lineal	44
2.27.1. Generador eléctrico lineal de flujo magnético longitudinal.....	45
2.27.2. Generador eléctrico lineal de flujo magnético transversal	46
2.27.3. Generador lineal de núcleo de aire	47
2.28. Generador lineal híbrido	48
2.29. Aplicaciones de generadores lineales.....	49
2.30. Alcances.....	51
2.31. Limitaciones	51
Marco metodológico	52
Capítulo 3.....	54
3.1. Modelo matemático para la generación	55
3.1.1. Obtención de fuerzas sísmicas.....	55
3.1.2. Potencia de llegada.....	56
3.1.3 Movimiento del sistema	58
3.1.3.1. Resortes en paralelo	58
3.1.3.2. Comportamiento del sistema	58
3.1.3.3. Diseño de los resortes.....	60
3.1.3.4. Diseño del tornillo	63
3.1.3.5. Velocidad del sistema.....	64
3.1.3.6. Placas e imanes.....	64
3.1.3.7. Bobina.....	66

3.1.3.8. Generación eléctrica	67
3.2. Aplicación del modelo matemático de generación	67
3.2.1. Fuerzas sísmicas	68
3.2.2. Potencias sísmicas	68
3.2.3. Comportamiento y características de los resortes	70
3.2.4. Placas, imanes y tornillo	72
3.2.5. Bobina	73
3.2.6. Generación eléctrica	74
3.2.7. Costos	76
3.3. Diseño de piezas en SolidWorks.....	77
3.4. Análisis de resultados	83
3.5. Conclusiones.....	85
3.6. Recomendaciones.....	86
Referencias bibliográficas.....	87
Anexos	93
A1. Tablas de fuerzas sísmicas	94
A2. Planos de piezas del sistema	98

Índice de tablas

Tabla 1. Cantidad de dinamita y poder destructivo en comparativa con un sismo	13
Tabla 2. Datos de A_0 según la distancia.....	18
Tabla 3. Velocidades de las ondas sísmicas en distintos tipos de suelo.....	29
Tabla 4. Comparativa de energías de eventos sísmicos	32
Tabla 5. Estadísticas del USGS de sismos por año según su magnitud.....	34
Tabla 6. <i>Porcentajes de energía por zona sísmica</i>	34
Tabla 7. Comparación de los tipos principales de generadores lineales	48
Tabla 8. Fuerzas sísmicas hasta los 20 kilómetros	68
Tabla 9. Potencia inicial según el tipo de roca	69
Tabla 10. Potencia final en sismos de 1,0 a 2,9 Mw	70
Tabla 11. Potencia final en sismos de 3 a 4,9 Mw	70
Tabla 12. Trabajos del sismo en caliza y basalto	70
Tabla 13. Desplazamientos de los resortes de acuerdo con la magnitud.....	71
Tabla 14. Datos de los resortes para magnitudes de 1,0 a 2,9 Mw.....	71
Tabla 15. Resortes para sismos de 4,0 a 4,9 Mw	72
Tabla 16. Velocidades dependiendo de la magnitud	74
Tabla 17. Frecuencias y tiempos según la magnitud	74
Tabla 18. Generación eléctrica según la magnitud	75
Tabla 19. Producción eléctrica en Costa Rica en el año 2020	75
Tabla 20. Costo del mecanismo en colones.....	76
Tabla 21. Fuerzas sísmicas hasta 5000 metros.	94
Tabla 22. Fuerzas sísmicas hasta 10000 metros	95
Tabla 23. Fuerzas sísmicas hasta 15000 metros	96
Tabla 24. Fuerzas sísmicas hasta 20000 metros	97

Índice de figuras

Figura 1. Daños del terremoto de Alaska	9
Figura 2. Representación del primer sismógrafo	10
Figura 3. Descripción de un sismógrafo	11
Figura 4. Representación de un equipo tipo ETNA	12
Figura 5. Diagrama de tipos de ondas sísmicas.....	14
Figura 6. Representación del movimiento de ondas sísmicas.....	15
Figura 7. Sismógrafo Wood-Anderson	16
Figura 8. Representación del registro de dos sismos locales.....	17
Figura 9. Nomograma utilizado para la medición de la ML.....	19
Figura 10. Ejemplo de cómo se aprecia la amplitud en un sismo.....	19
Figura 11. Sismograma para ondas superficiales	20
Figura 12. Ejemplo de un análisis espectral de una onda	22
Figura 13. Ejemplo de una onda transversal	23
Figura 14. Representación de una onda periódica	23
Figura 15. Ejemplo de una onda estacionaria	26
Figura 16. Matemática de una onda transversal	26
Figura 17. Partes de una onda mecánica de movimiento ondulatorio	27
Figura 18. Tipos de suelos de Costa Rica.....	28
Figura 19. Amplificación de las ondas sísmicas	30
Figura 20. Diagrama de la Ley de Snell en las fallas sísmicas.....	31
Figura 21. Representación de sismos de magnitudes 4, 5 y 6 por medio de esferas	33
Figura 22. Cantidad de sismos en Costa Rica en el 2020.....	35
Figura 23. Costo unitario de energías en España	36
Figura 24. Reservas de petróleo a nivel mundial	38
Figura 25. Experimento de Faraday	39
Figura 26. Ejemplo de un campo magnético variable en un círculo	41
Figura 27. Representación de la generación de corriente alterna	42
Figura 28. Ejemplo de un generador lineal.....	45
Figura 29. Ejemplo de un generador lineal longitudinal.....	46

Figura 30. Ejemplo de un generador lineal transversal	47
Figura 31. Ejemplo de un generador lineal de núcleo de aire	47
Figura 32. Generador lineal híbrido	49
Figura 33. Generador Seabased	50
Figura 34. Movimiento armónico simple	50
Figura 35. Análisis vectorial de la potencia de llegada.	56
Figura 36. Sistema de resortes en paralelo.....	58
Figura 37. Diagrama de placa e imanes.....	65
Figura 38. Movimiento de las placas y los imanes	66
Figura 39. Diagrama de la potencia de llegada al mecanismo	69
Figura 40. Imán de neodimio.	73
Figura 41. Bobina del sistema	77
Figura 42. Corredera parte de arriba.....	77
Figura 43. Corredera parte de abajo	78
Figura 44. Placa de aluminio	78
Figura 45. Resorte 1 para microsismos.....	78
Figura 46. Resorte 2 para microsismos.....	79
Figura 47. Resorte 1 para sismos de 4 grados.....	79
Figura 48. Resorte 2 para sismos de 4 grados.....	79
Figura 49. Tornillo del sistema	80
Figura 50. Mecanismo completo	80
Figura 51. Movimiento del sistema en compresión	81
Figura 52. Movimiento del sistema en estiramiento	81
Figura 53. Placas e imanes atornillados a la corredera.....	81
Figura 54. Posición del mecanismo.....	82
Figura 55. Plano del tornillo.....	98
Figura 56. Plano de la bobina.....	99
Figura 57. Plano de la placa de aluminio.....	100
Figura 58. Plano resorte 1 para microsismos.	101
Figura 59. Plano del resorte 2 para microsismos.	102
Figura 60. Plano del resorte 1 para sismos de 4 grados.	103

Figura 61. Plano del resorte 2 para sismos de 4 grados.	104
Figura 62. Plano de corredera parte superior.	105
Figura 63. Plano corredera sección de abajo.	106
Figura 64. Mecanismo y sus componentes.	107

Capítulo 1.

1.1. Síntoma

El aprovechamiento de las ondas mecánicas sísmicas como fuente de energía, es un tema muy poco conocido. En el año 2016 la Universidad Leicester, en Inglaterra, destacó la propuesta de un grupo de estudiantes, la cual consistía en la utilización de un tipo de generador en los sótanos de los edificios, para almacenar su energía y posteriormente utilizarla una vez acabado el evento sísmico. (Universidad de Leicester, 2016).

Anterior a esta fecha, el periódico *Scientific American* (2011) publicaba un artículo con esta interrogante de si se podría aprovechar para la generación de electricidad. Este medio destaca que no es probable, ya que sería un gran reto en materia de logística para llevarlo a cabo.

Con base en esta opinión, y ante el miedo a nivel mundial a estos fenómenos naturales, los sismos o terremotos son vistos como una energía destructiva e inutilizable, pero en realidad, esta puede llegar a ser una solución.

1.2. Causas

- La carencia de estudios sobre este tópico, debido a la complejidad logística de llevarlo a la realidad. Según datos del USGS (Instituto de Nacional de Prevención Sísmica, 1991), el 75,4% de la energía liberada por el Cinturón de Fuego del Pacífico corresponde a una liberación de forma superficial, y los estudios que existen son solo comparativos de cuánto equivale una magnitud en referencia a las bombas atómicas de Hiroshima y Nagasaki. No hay de momento una hipótesis de cómo aprovechar este poder.
- Falta de análisis y proyección energética, de estos fenómenos que no solo moldean el planeta, sino que también constituyen la fuente más potente de energía que posee la Tierra, y en algún punto inagotable.

1.3. Pronóstico

La generación de energía limpia por medio de ondas sísmicas podría no llegar a concretarse, debido a la gran tarea de logística y a las distintas variables que poseen estos fenómenos naturales, de acuerdo con su origen geográfico. Como consecuencia, la población no tendría acceso a esta nueva fuente, ni obtendría los beneficios de esta, como la poca contaminación que produce y su gran potencial de considerarse infinita.

1.4. Control del pronóstico

- Investigar los conceptos que componen estos fenómenos naturales, así como la referencia histórica.
- Revisar a profundidad las características que componen los sismos, sus ecuaciones matemáticas y unidades físicas, para desarrollar una estrategia científica en cálculos.
- Buscar información de los tipos de roca que componen el suelo de Costa Rica, y las variaciones de velocidad que poseen las ondas sísmicas en estos.
- Mediante historiales sísmicos anuales del país, analizar cuál es la profundidad predominante en la que ocurren estos eventos sísmicos y con qué frecuencia a nivel nacional.
- Calcular la potencia de llegada al área de la máquina según las magnitudes sísmicas.
- Definir los componentes que tendrá el prototipo, y sus dimensiones.
- Simular la generación que tendrá el prototipo diseñado.

1.5. Formulación del problema

La generación de energía eléctrica limpia, mediante las ondas de los movimientos telúricos.

Actualmente, después de un movimiento sísmico, muchos lugares quedan sin abastecimiento eléctrico durante varios días. La obtención de esta fuente energética podría solventar en parte esta carencia, en corto y largo plazo.

Se avanzaría, al dar una solución a diferentes lugares según su característica geográfica, supliendo una parte de las necesidades de la población.

1.6. Sistematización del problema

La naturaleza produce energía. El ser humano siempre ha querido controlar esa fuente para su propio beneficio, y con el tiempo logra generar diferentes métodos, llegando a concretar este objetivo.

El presente documento es de tipo investigativo cuantitativo, de carácter descriptivo y exploratorio, debido a la obtención poco explorada y de gran potencial de la energía que poseen los sismos, y capturándola y transformándola a electricidad, se alcanzaría un nuevo tipo de generación. Este fenómeno, con sus características analizadas y fundamentadas por medio de leyes físicas ya establecidas, logró demostrar el objetivo principal, mediante un sistema cualitativo con base en los análisis de datos y variables físicas ejemplificadas por la naturaleza, tales como: magnitudes, trayectorias, profundidades, fuerzas y potencias. Se logró dar un valor a la generación según la magnitud del evento, mediante un mecanismo ya visto y probado, relacionado directamente con este tópico.

1.7. Objetivo general

- Diseñar un mecanismo de tipo lineal para la generación de energía eléctrica utilizando la Ley de Faraday, mediante el aprovechamiento de la energía cinética que liberan las ondas sísmicas.

1.8. Objetivos específicos

- Investigar sobre los movimientos telúricos y sus tipos de ondas mecánicas.
- Diseñar los componentes que integran el mecanismo.
- Simular la cantidad de energía eléctrica que podría genera este mecanismo durante un movimiento sísmico.

1.9. Estado actual de la investigación

El tema de este documento trata sobre el aprovechamiento de las ondas sísmicas, como medio para la generación de una nueva fuente de energía. Este tópico fue propuesto por primera vez por un grupo de estudiantes en una universidad en Inglaterra (Universidad de Leicester, 2016). La búsqueda de nuevas formas de generación de energía y el método de cómo lograr producirlas es una de

las tantas misiones de la ingeniería mecánica. Este tema, aunque tenga información muy reducida, podría aportar un nuevo campo en la investigación de fuentes energéticas. El aporte científico de este tema es extenso, ya que el potencial energético que poseen los sismos es colosal, e incluso podría llegar a considerarse como una fuente inagotable.

En este campo, poco explorado, pero de gran interés, innovará cualquier aporte que se dé para lograr el objetivo, presente y futuro, con el único fin de beneficiar a la mayor cantidad de personas, su seguridad y calidad de vida.

Capítulo 2.

Marco situacional

Las investigaciones para la búsqueda de nuevas fuentes de energía son la meta de la comunidad científica mundial, debido a que los recursos del planeta se agotan cada día. Ante este problema, los proyectos basados en nuevas formas de obtención son muy necesarios para el avance tecnológico. La sustracción de electricidad usando las ondas sísmicas podría ser la respuesta ante esta y muchas incógnitas. Este tópico históricamente ya fue propuesto por un grupo de estudiantes de la Universidad de Leicester en Inglaterra (Universidad de Leicester, 2016), el cual consiste en utilizar los sótanos de los edificios, más precisamente en la torre Millennium, ubicada en San Francisco en los Estados Unidos; según sus cálculos, este prototipo de 1300 metros cuadrados generaría 770 W de potencia durante un sismo de 7,2; el propósito de estos jóvenes fue almacenarla para después utilizarla una vez hubiera terminado el evento sísmico.

En materia de fuentes de energía, en España se destaca el gran potencial en las olas del océano, y resaltan que el 90% del uso del petróleo se implementa para satisfacer la demanda energética. Por ende, la necesidad de proponer nuevas ideas en esta materia es crucial, a causa del agotamiento de las reservas a nivel mundial de petróleo. (Colino Martínez y Caro, 2010). De acuerdo con un artículo lanzado por la revista Forbes, en el 2019, para esa fecha ya todos los recursos naturales están agotados, pues la población se endeudó con el planeta debido a la creencia de fuentes infinitas de materia prima. (Forbes, 2019).

En el Acuerdo de París, firmado en el 2015 por la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, se da como objetivo principal y fundamental el refuerzo de respuestas a todos los países ante el aumento de la temperatura del planeta, y otra propuesta mencionada es elevar la capacidad de los países para poder enfrentar los efectos del cambio climático. Para concretar esta hazaña, es necesario proponer un nuevo marco tecnológico, que sea accesible ante los territorios en vías de desarrollo. (Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, 2019).

La obtención, mediante métodos poco dañinos con el ambiente, es la meta propuesta a nivel mundial. En el caso de Costa Rica, es considerado líder en materia de generación, utilizando fuentes como: hidroeléctrica, geotérmica, biomasa, eólica y solar. El país en el año 2019 cerró con una producción del 99% en estas fuentes, y los proyectos que más destacaron fueron: Dengo, Reventazón, Arenal, Angostura, Cachí y Miravalles II. (Instituto Costarricense de Turismo, 2020).

Marco teórico

2.1. Terremotos

Un terremoto es el movimiento brusco de la tierra, causado por la violenta liberación de energía acumulada durante un largo tiempo. Este fenómeno natural posee formas de origen como la subducción de las placas tectónicas, choque entre estas o una erupción volcánica; estas poseen la característica de poseer un espesor de 70 kilómetros, y están localizadas a lo largo de toda la superficie terrestre (Universidad de La Coruña, 2003). Los eventos sísmicos que se originan dentro del espesor de estas son conocidos como superficiales, pues solo un 10% de ellos ocurre fuera de estos parámetros; si esto se manifiesta se conocen como intermedios, debido a su rango de aparición, que oscila desde los 70 kilómetros hasta los 300 kilómetros, y si esta medida se supera se les considera profundos. Lo que define esta categorización se conoce como hipocentro.

El estudio de los movimientos telúricos se lleva a cabo en la rama de la ciencia denominada sismología, la cual es muy reciente, pues se tiene conocimiento a partir del siglo XVIII, con base en los registros sismológicos de una zona, ya que de esa época los datos son escasos y no se tenía una idea clara del porqué ocurrían estos fenómenos. La primera hipótesis que surgió ante la duda fue la liberación de aire de las cavernas. Según datos históricos, el primer sismo registrado fue en el año 1177 a.C. en China (Universidad de La Coruña, 2003). En el continente europeo se tiene referencia de eventos sísmicos desde el año 580 a.C., específicamente en la época medieval. En América, se posee el conocimiento de sismos ocurridos en los territorios de México a finales del siglo XIV. Mientras que, en la zona sudamericana, específicamente en Perú, el dato más antiguo data de 1741, pero

debido a la falta de descripciones concretas, no se sabe cómo fue el evento, ni su magnitud. Desde el siglo XVII comenzaron los relatos de sismos, que en su mayoría eran muy exagerados y distorsionados.

En la región norte del continente americano, entre los años 1811 y 1812, ocurrieron varios terremotos en la zona de New Madrid, Missouri, llegando el más importante a 8 grados (Universidad de La Coruña, 2003). Décadas más tarde, concretamente en 1906, San Francisco fue golpeada por un potente evento sísmico, considerado como el mayor en la historia de los Estados Unidos, el cual dejó como saldo 700 fallecidos y aproximadamente 250000 personas sin hogar. En el año de 1964, en Alaska, ocurrió una de las liberaciones más grandes de energía, y tuvo magnitud de 9,2 grados en la escala Richter. Como esta región poseía poca densidad demográfica, dio como resultado pocas víctimas, pero se sintió en 500000 millas cuadradas, según reportes de esa época; fue tan fuerte que arrancó árboles de raíz, como se muestra en la figura 1.



*Figura 1. Daños del terremoto de Alaska
Fuente: López, A. (2020).*

2.2. El primer sismógrafo

El primer registro de este sistema data del año 132, cuando el inventor chino Zhang Heng diseñó el primer prototipo de sismógrafo, al cual lo bautizó como Hou

Feng Di Dong Yi. Este mecanismo fue fabricado en cobre, con forma ovalada, en su parte superior poseía ocho cabezas de dragón y un péndulo en su interior. (O'Connor y Robertson, 2003), como se aprecia en la figura 2. Las esferas caían cuando ocurría un terremoto; al caer la bola de cobre producía ruido, y debido a la dirección de la cabeza de dragón de la parte superior, se podían saber las coordenadas del sismo. Un día ocurrió este evento y Zhang le informó, al emperador, que el sismo ocurrió en el oeste, basándose en la dirección de la esfera que cayó. Varios días después de este acontecimiento llegaron reportes de un terremoto, que había ocurrido a miles de kilómetros al noroeste.



Figura 2. Representación del primer sismógrafo
Fuente: López Cotelo (2011).

En 1877, mientras estaba en una investigación de campo en los volcanes de Japón, el inglés John Milne descubrió que los terremotos sentidos en esa región no provenían directamente de ellos, y que ninguno poseía una conexión directa.

En 1880, se dio cuenta de la importancia de la instrumentación en caso de medición, ya que era necesario un mecanismo que pudiera registrar los movimientos del suelo. Esto llevó a la invención del sismógrafo Milne-Gray, que fue producido en Gran Bretaña por James White en la ciudad de Glasgow en 1881.

Desde el año 1892, su trabajo se extendió por todo el territorio de Japón para incluir terremotos más distantes; al final de este periodo, se habían colocado casi mil estaciones para su registro sísmico. (Godsmark, 2012).

2.3. Sismógrafos actuales

Los sismógrafos actuales poseen el mismo principio del sismógrafo Zhang Heng, basado en un movimiento de inercia en un péndulo suspendido por un soporte rígido, y debajo de este se coloca un lápiz y un cilindro rotatorio, como se observa en la figura 3. Cuando el soporte rígido se comienza a mover junto con el suelo, la masa del péndulo permanece y el cilindro de la base se comienza a mover, a la velocidad de un segundero de un reloj actual; por medio del lápiz como puntero se va trazando el dibujo que corresponde a las ondas sísmicas, debido a que estas se mueven en diversas direcciones. (Universidad de Costa Rica, 2011).

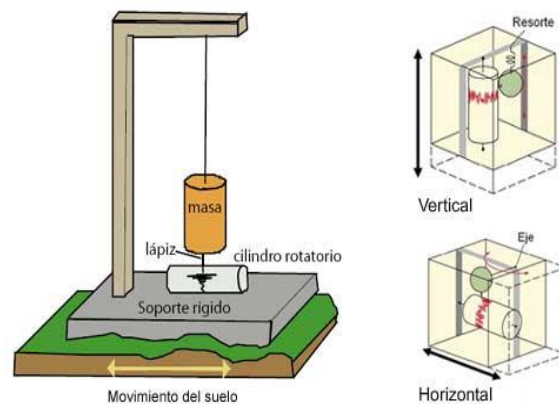


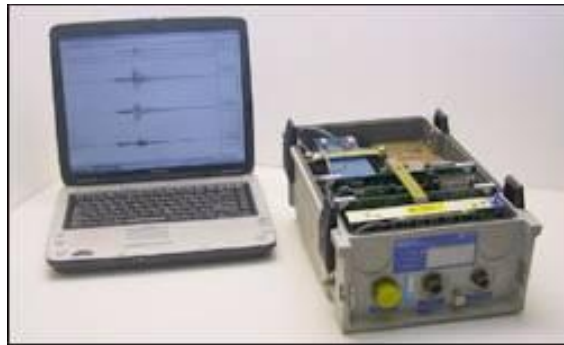
Figura 3. Descripción de un sismógrafo
Fuente: Universidad de Costa Rica (2011).

Otro instrumento que los componen se conoce como acelerógrafo, que se encarga de registrar la aceleración del suelo durante un evento sísmico. Este instrumento generalmente se utiliza en análisis de terremotos, porque sus movimientos son muy potentes, y este aparato no sufre ningún tipo de daño, ya que fue diseñado para resistir el movimiento.

Actualmente, los LIS (Laboratorios de Ingeniería Sísmica) se componen únicamente de acelerógrafos. Los LIS originalmente usaban instrumentos de tipo

SMA-1, los cuales funcionaban a base de película fotográfica. En estos aparatos, cuando ocurría un sismo por medio de un pequeño rayo de luz, se revelaba esta película, creando un registro del paso de las ondas sísmicas, y después era registrado, procesado y analizado por medio de computadoras. (Universidad de Costa Rica, 2011).

En la actualidad se utilizan equipos modernos de tipo ETNA o K2, observados en la figura 4, que son básicamente computadoras para registrar sismos fuertes.



*Figura 4. Representación de un equipo tipo ETNA
Fuente: Universidad de Costa Rica (2011).*

2.4. Magnitud Richter

“Trata de la energía liberada en cada evento sísmico, en base al registro sismográfico” (Universidad de La Coruña, 2003, párr 22). Esta escala es de tipo potencia y semilogarítmica, y en esta escala cada punto puede significar un aumento de 10 veces o más.

Magnitudes Richter y sus efectos

- Sismos menos de 3,5: son los que generalmente no se perciben por la población, pero sí se registran, y a estos se les conoce como microsismos.
- Sismos de 3,5 a 5,4: sí se pueden sentir por la población y, dependiendo de su profundidad, pueden ocasionar daños menores, como caídas de objetos.
- Sismos de 5,5 a 6,0: son los que pueden generar daños menores a edificaciones.

- Sismos de 6,1 a 6,9: pueden ocasionar daños moderados o severos en las edificaciones.
- Sismos de 7,0 a 7,9: pueden ocasionar daños graves en las edificaciones.
- Sismos de 8,0 a mayor: son de destrucción total, y se catalogan como grandes terremotos, debido a que los daños que generan son de categoría de catástrofe.

Según la escala Richter, se puede dar una idea de cómo sería la liberación de energía mediante una comparativa con cantidad de dinamita, tal como se representa en la tabla 1.

Tabla 1. *Cantidad de dinamita y poder destructivo en comparativa con un sismo*

Magnitud Richter	Equivalente en TNT	Ejemplo
-1,5	1 gramo	Romper una piedra
1,0	6 oz	Barreno pequeño
1,5	2 libras	
2,0	13 libras	
2,5	63 libras	
3,0	397 libras	
3,5	1000 libras	Mina
4,0	6 ton	
4,5	32 ton	Tornado
5,0	199 ton	
5,5	500 ton	Terremotos
6,0	1270 ton	
6,5	31550 ton	
7,0	199000 ton	
7,5	1 Megatón	
8,0	3,27 Megatones	
8,5	31,55 Megatones	
9,0	200 Megatones	
10,0	6300 Megatones	Falla de San Andrés
12,0	1 Gigatón	Romper la tierra en 2

Fuente: Universidad de La Coruña (2003).

2.5. Ondas Sísmicas

En la corteza terrestre se generan ondas mecánicas, las cuales reciben el nombre de ondas sísmicas; esto se produce por una gran liberación de energía, a partir de un punto llamado hipocentro. (Rojas, 2019). Estos fenómenos mecánicos

poseen gran parecido con las que se producen cuando una gota o roca cae en un lago, distribuyéndose en forma esférica hacia afuera. Cuanta más distancia recorran, menor será el impacto, pero también la sensación será mayor dependiendo directamente de la profundidad del evento.

Existen dos tipos de ondas como se representa en la figura 5: superficiales e internas, las cuales se componen de cuatro tipos diferentes que son: P , L , S y R , como se muestra en la figura 6.

Estas ondas poseen velocidad específica para cada tipo:

- Las ondas P poseen una velocidad de 7 km/s.
- Las ondas S poseen una velocidad de 4 a 6 km/s.
- Las ondas L poseen una velocidad de 2 a 3 km/s
- Las ondas R poseen una curiosidad, ya que su velocidad es equivalente al 90% de las ondas S .

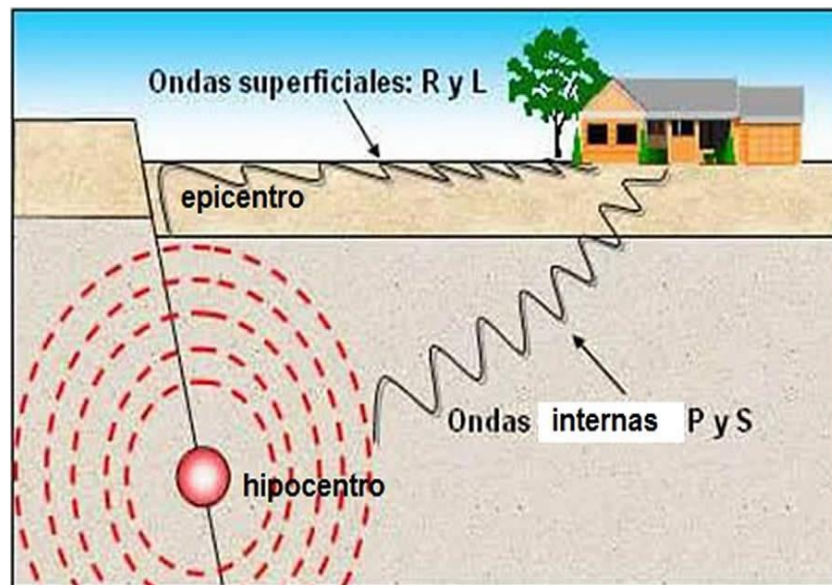


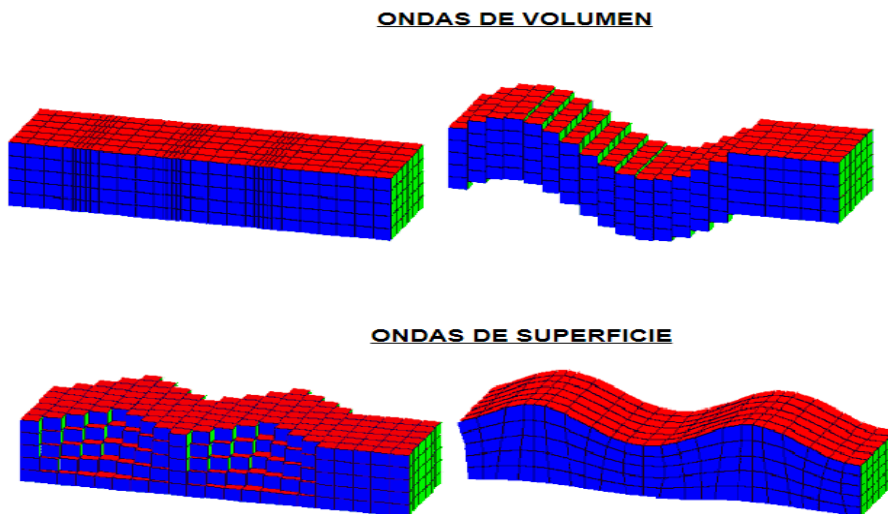
Figura 5. Diagrama de tipos de ondas sísmicas
Fuente: Rojas, A. (2019).

Las ondas P se desplazan en la dirección de propagación; consisten principalmente en la transmisión de compresiones y refracciones de las piedras. Esta clase de onda es la más rápida de los cuatro tipos de ondas sísmicas, y posee

la característica de que es la primera en llegar a un punto específico, sentida, y ser registrada por los sismógrafos al momento de un sismo. (Universidad de La Coruña, 2003).

Por su parte, el tipo S u ondas de corte tiene característica de que sus partículas se desplazan de manera perpendicular a la dirección de propagación. Están directamente asociadas con la deformación del terreno tipo cizalla. Este tipo no posee la misma velocidad que las primarias, que en realidad son más lentas.

Existe un tercer tipo, el de las llamadas superficiales, debido a que solo se propagan por las capas más exteriores de la Tierra, decreciendo su amplitud con la profundidad. Dentro de este tipo de ondas se pueden diferenciar dos modalidades, denominadas la Rayleigh y la Love, en honor a los científicos que demostraron teóricamente su existencia. (Universidad de La Coruña, 2003).



*Figura 6. Representación del movimiento de ondas sísmicas
Fuente: Universidad de La Coruña (2003).*

2.6. Fórmulas sísmicas

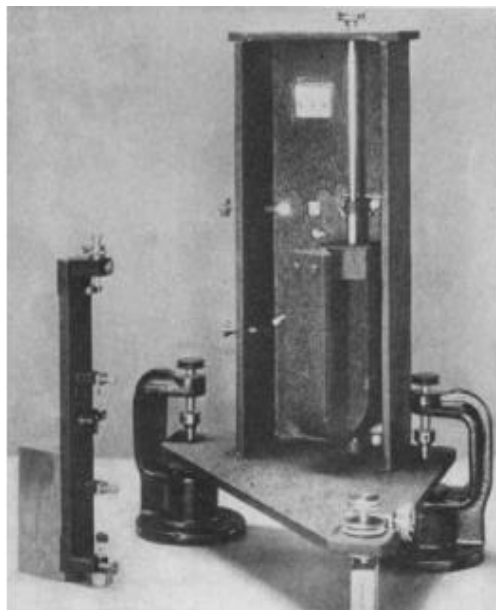
“El concepto de magnitud fue introducido en 1935 por Charles Francis Richter”. (Vizconde Campos, p. 24) Él fue el primero en definir este término, para la medición de sismos, con esta se estima la cantidad de energía liberada del evento para su comparación con otros ya registrados. Este concepto fue dado por analogía al

concepto magnitud estelar, usado en Astronomía, el cual significa un brillo intrínseco entre las estrellas. (Peláez, 2011).

Existen diferentes tipos de magnitudes, dependiendo del tipo de onda sísmica:

1. Magnitud local.
2. Magnitud de ondas superficiales.
3. Magnitud de ondas de volumen.
4. Magnitud de duración.

Cuando el terremoto se considera estándar se le colocará una magnitud cero, el cual ocurre a una distancia de 100 kilómetros, este es percibido por un sismograma que le otorgará un valor de la amplitud máxima equivalente a milésimas de milímetro. (Peláez, 2011).



*Figura 7. Sismógrafo Wood-Anderson
Fuente: Peláez (2011).*

2.7. Magnitud local (ML) o magnitud Richter

Esta escala depende del tipo de sismógrafo que se implemente. Antiguamente se utilizaban los sismógrafos de torsión Wood-Anderson, como se muestra en la figura 7, estos amplificaban el movimiento de la tierra unas 2800

veces; a estos se les conoce como de corto periodo, midiendo los desplazamientos que poseen una frecuencia superior a 2 Hz. (Peláez, 2011). Es medida como:

$$M = \log A - \log A_0 \quad (1)$$

Donde A y A_0 , según la tabla 2, es el valor de la amplitud máxima en milímetros tomada del registro del sismógrafo, mostrado en la figura 8.

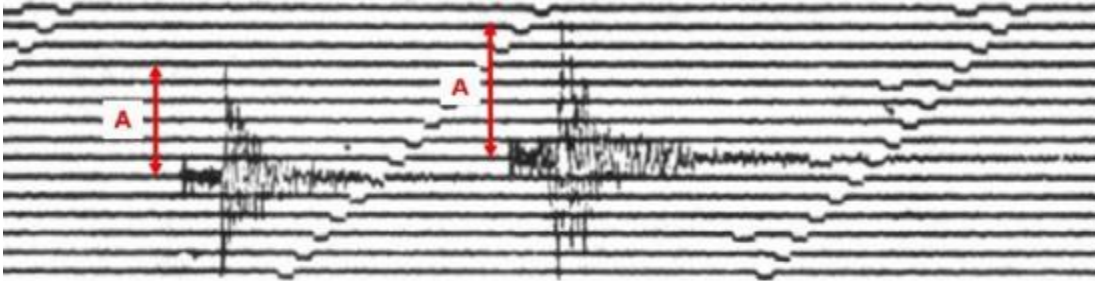


Figura 8. Representación del registro de dos sismos locales
Fuente: **Peláez (2011)**.

Usando papel fotográfico, se elaboraban los registros, pero Richter no especificó qué onda se utiliza. Sino que se usaba la mayor amplitud registrada hasta ese momento.

Se debe descartar el hecho de que esta escala se define por terremotos superficiales.

Este concepto es directamente logarítmico, basado en la máxima amplitud utilizada en el sismógrafo, si este estuviera ubicado a 100 kilómetros del epicentro del evento.

Tabla 2. *Datos de A_0 según la distancia*

Δ (km)	$-\log A_0$	Δ (km)	$-\log A_0$	Δ (km)	$-\log A_0$
0	1,4	150	3,3	390	4,4
5	1,4	160	3,3	400	4,5
10	1,5	170	3,4	410	4,5
15	1,6	180	3,4	420	4,5
20	1,7	190	3,5	430	4,6
25	1,9	200	3,5	440	4,6
30	2,1	210	3,6	450	4,6
35	2,3	220	3,65	460	4,6
40	2,4	230	3,7	470	4,7
45	2,5	240	3,7	480	4,7
50	2,6	250	3,8	490	4,7
55	2,7	260	3,8	500	4,7
60	2,8	270	3,9	510	4,8
65	2,8	280	3,9	520	4,8
70	2,8	290	4,0	530	4,8
80	2,9	300	4,0	540	4,8
90	3,0	310	4,1	550	4,8
95	3,0	320	4,1	560	4,9
100	3,0	330	4,2	570	4,9
110	3,1	340	4,2	580	4,9
120	3,1	350	4,3	590	4,9
130	3,2	360	4,3	600	4,9
140	3,2	370	4,3		
		380	4,4		

Fuente: Peláez (2011).

Otro implemento muy utilizado para la medición de esta magnitud es conocido como nomograma, el cual, a partir de la máxima amplitud registrada en la escala derecha en milímetros y a la izquierda, muestra la distancia al terremoto, lo que es equivalente al tiempo tarda entre la onda P y la llegada de la S. (Peláez, 2011).

Si ambas marcas se unen dibujando una línea recta, esto indica la magnitud del sismo mostrado en la figura 9.

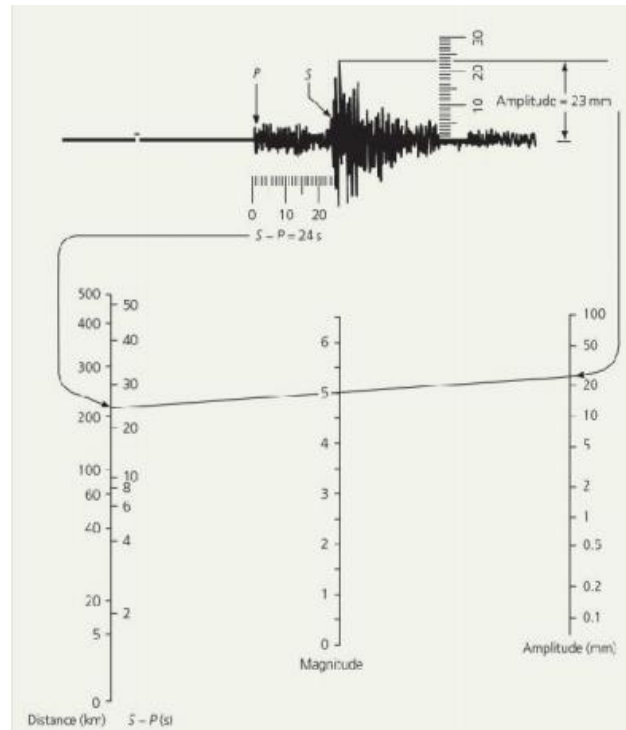


Figura 9. Nomograma utilizado para la medición de la ML
Fuente: Peláez (2011).

Pero en general, la mayor cantidad de escalas se basa en esta fórmula:

$$M = \log\left(\frac{A}{T}\right) \max + Q(\Delta, h) \quad (2)$$

Donde el valor de A corresponde a la amplitud máxima registrada por el sismógrafo, T es equivalente al tiempo de la amplitud, Q es una función de la distancia epicentral Δ y h es equivalente a la profundidad, representado en la figura 10.

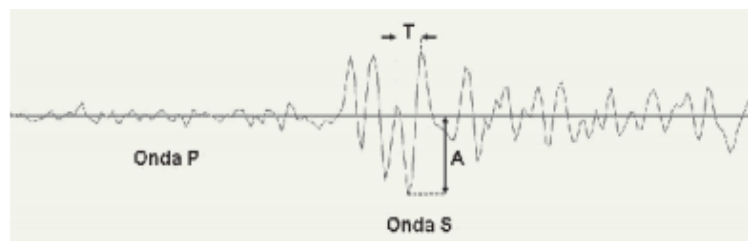


Figura 10. Ejemplo de cómo se aprecia la amplitud en un sismo
Fuente: Peláez (2011).

2.8. Magnitud superficial

Los sismógrafos de banda ancha son los encargados de registrar esta magnitud, con una frecuencia más alta que los otros modelos, ya que son de corto periodo. Estas ondas poseen un intervalo de 3 y 60 segundos, aunque el que se da con más frecuencia es el de 20 segundos.

Actualmente se cuantifica como:

$$M_s = \log\left(\frac{A}{T}\right) + 1,66 * \log(D) + 33 \quad (3)$$

Para esta ecuación, se debe utilizar la amplitud máxima de las ondas superficiales que lo componen, y estas oscilarán entre periodos de 18 y 22 segundos. La escala se utiliza para terremotos con profundidades a no menos de 60 kilómetros, en rango de distancias angulares entre los 20° y los 160°. A partir de las magnitudes de 8,0, los datos comenzarán a saturarse en el registro. (Peláez, 2011).

También, para medir este tipo de magnitud, se posee una fase que se denomina sismograma de ondas superficiales, que se muestra en la figura 11.

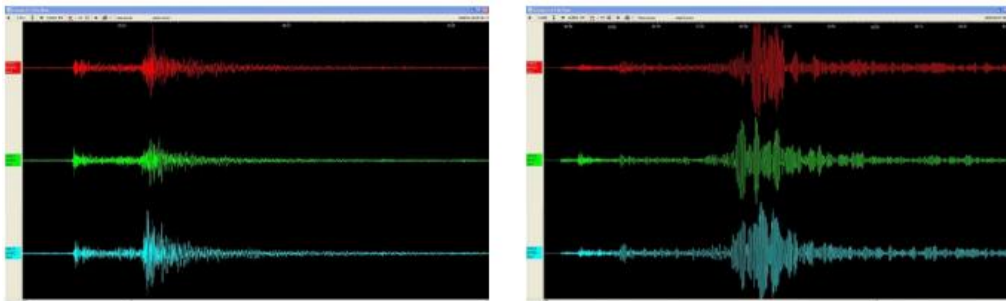


Figura 11. Sismograma para ondas superficiales
Fuente: Peláez (2011).

2.9. Magnitud de duración o de coda

Es una de las escalas más utilizada en el caso de terremotos locales. Esta se basa directamente en la duración del registro del sismógrafo, desde que la onda P comienza hasta que la cola o coda de la S se confunde con el nivel de ruido; en otras palabras, el final del registro del sismo. Esta escala es de suma

importancia para áreas locales donde ocurre un evento sísmico, porque no es posible calcular la amplitud, debido a que los sistemas se saturan. Esta se calcula por medio de las redes ubicadas en Marruecos y Argelia, en el caso de España, estas se dan por medio del Instituto Andaluz de Geofísica (IAG) y del Real Instituto y Observatorio de la Armada (ROA) .(Peláez, 2011).

Se utiliza la fórmula:

$$M_t = a * \log(t_{coda}) + b * r + c \quad (4)$$

Donde t_{coda} es el tiempo que dura el registro, r es la distancia hipocentral.

Es una de las escalas más fuertes, y es totalmente dependiente de la atenuación y depresión de las ondas sísmicas de la zona.

En el caso del IAG, a posee un valor de 2,99, b es igual a 0 y c es 3,25, pero solo para los eventos sísmicos con magnitud mayor a 3,1; en cambio, para la ROA, a tiene un valor de 2,24, b de 0 y c de -1,44.

2.10. Magnitud del momento

Es la escala más utilizada en la actualidad; su principal ventaja es que no se satura como las otras. Pero su principal desventaja es que no es intuitivo y su cálculo no es inmediato, pero sí su definición. Esta magnitud fue determinada por los científicos Hanks y Kanamori en 1979 (Peláez, 2011), y se utiliza la fórmula:

$$M_w = \frac{2}{3} \log M_0 - 1,66\mu \quad (5)$$

Donde la incógnita de M_0 es llamada magnitud del momento, y su unidad de expresión es dina-centímetros.

A su vez, se expresa de la siguiente manera:

$$M_0 = \mu * A * D \quad (6)$$

El μ es conocido como el módulo de rigidez, A es igual al área de superficie de ruptura, y D se conoce como desplazamiento medio de la superficie.

Esta fórmula muestra lo que condiciona el momento sísmico, y la magnitud del terremoto. Esto no es solo la superficie de la ruptura, también el producto de la

superficie y el desplazamiento; μ es un parámetro elástico que relaciona los esfuerzos y las deformaciones cortantes. (Peláez, 2011). Para el caso de la corteza terrestre es usual tomar un valor medio de $3,2 \times 10^{11}$ dinas entre centímetros cuadrados, pero este dato varía completamente para el manto con un valor de $7,5 \times 10^{11}$ dinas entre centímetros cuadrados.

En estos casos se usa una medición espectral para pasar las ondas al dominio de la frecuencia, mostrada en la figura 12.

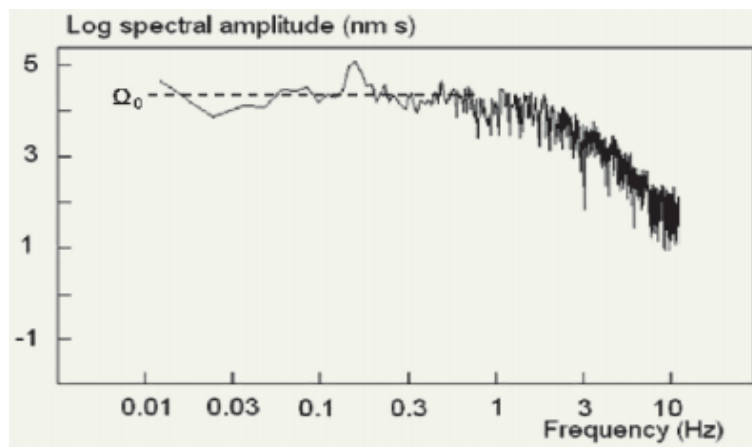


Figura 12. Ejemplo de un análisis espectral de una onda
Fuente: Peláez (2011)

2.11. Ondas mecánicas

Los movimientos sísmicos ocurren por medio de ondas, pero estas son mecánicas. Como lo definen Young y Freeman (2009): “Es una perturbación que viaja a través de un material o una sustancia que es el medio de esta”. (p. 488)

Cuando sus partículas que se encuentran en el medio, al momento que ocurre este fenómeno, estas sufrirán distintos tipos de desplazamientos, dependiendo directamente de la naturaleza de la onda.

Se dividen en tres tipos:

- Transversales.
- Longitudinales.
- Periódicas.

Las ondas transversales ocurren cuando los desplazamientos del medio se manifiestan de manera perpendicular o de forma transversal, y viajan a la misma dirección que la onda a través del material mostrado en la figura 13.



Figura 13. Ejemplo de una onda transversal
Fuente: Corty, Rodríguez, Magallon, Lauterio y Tabares (2015).

Si una onda transversal posee un movimiento en el plano X positivo, su oscilación se manifestará en dirección de arriba a abajo en el plano $Y-Z$.

En el caso de las ondas longitudinales, sus partículas poseen un movimiento de adelante hacia atrás, pero siempre en la misma dirección en la que viaja el fenómeno. Uno de los ejemplos más comunes para asociarlas es el de las ondas sísmicas. (Young y Freeman, 2013).

Las ondas periódicas son las que poseen un movimiento de partículas cada vez que se propague la onda, como cuando se aplica una agitación repetitiva en una cuerda, mostrada en la figura 14.

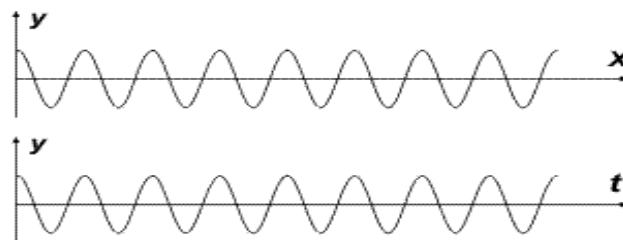


Figura 14. Representación de una onda periódica
Fuente: Cabrera (2009).

2.12. Descripción matemática de las ondas mecánicas

Muchas características que poseen las ondas periódicas se pueden describir utilizando los términos de rapidez, amplitud, periodo, frecuencia y longitud. Pero es necesaria una descripción más detallada de sus posiciones y de los movimientos de las partículas del medio durante la propagación de la onda. (Young y Freeman, 2013).

En el caso de las ondas periódicas, la longitud de la onda mecánica, expresada con el símbolo λ , esta indicará la distancia entre un valle y el otro. Su ecuación se demuestra como:

$$X_k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (7)$$

La fórmula va directamente relacionada con el número de onda angular o X_k .

El periodo de una onda mecánica, representado con el símbolo T , se manifiesta como el tiempo requerido para que este fenómeno complete un ciclo cuando está oscilando.

A la vez, matemáticamente hablando, hay otro fenómeno relacionado directamente con la fórmula del periodo, el cual se denomina frecuencia; este tiene por definición como la cantidad de ciclos completados por unidad de tiempo T ; su simbología se denota por la letra f , y su unidad se representa por medio de los hercios. Se utiliza la fórmula:

$$f = \frac{1}{T} \quad (8)$$

La frecuencia angular ω se representa en radianes por segundo. Está relacionada por:

$$\omega = 2\pi \times f \quad (9)$$

En este tema de ondas mecánicas, posee dos tipos de velocidades enlazadas directamente: el primer tipo es velocidad de la onda periódica V_j , que

indica la rapidez con la cual la onda se propaga por medio del producto de la longitud de la onda λ y la frecuencia f , y se manifiesta:

$$V_j = \lambda \times f \quad (10)$$

El otro tipo es denominado como velocidad de fase, la cual se define como la velocidad de las variaciones en la forma de la amplitud que se propaga por el espacio; esta es la derivada de la frecuencia angular ω dividiendo la derivada del número de onda k , y se compone:

$$\frac{\partial x}{\partial t} = \frac{\omega}{k} \quad (11)$$

2.13. Ecuación de la onda mecánica

Cuando se habla de una onda mecánica unidimensional que se transmite a lo largo del eje X a una velocidad v , y que posee una amplitud u , que por lo general depende directamente de x y del tiempo t , su ecuación sería descrita por:

$$\frac{1}{v^2} * \frac{\partial^2 y(x,t)}{\partial t^2} = \frac{\partial^2 y(x,t)}{\partial x^2} \quad (12)$$

Esa ecuación se utiliza cuando este fenómeno viaja en sentido x positivo; esta expresión es considerada de las más importantes en física, pues siempre que ocurre, se deducirá que una perturbación viajará a lo largo del plano horizontal con una rapidez v , y este no siempre se representará de forma senoidal. (Young y Freeman, 2013).

2.13.1. Ecuación de la onda mecánica estacionaria

Se define como la que posee la cualidad que permanece, y esto quiere decir que no se aprecia movimiento en el medio. Este aparece cuando dos ondas con características similares viajan en direcciones opuestas. Pero si esta se desplaza se conocerá como onda viajera. (Young y Freeman, 2009).

Se asume que:

$$Y_1(x, t) = -A \cos(kx + \omega t) \quad (13)$$

$$Y_2(x, t) = A\cos(kx - \omega t) \quad (14)$$

Se puede deducir una función para este tipo de ondas sumando las ecuaciones (13) y (14), suponiendo que estos fenómenos poseen amplitud, periodo y longitud iguales, pero con la condición de que viajen en direcciones contrarias, lo cual está mostrado en la figura 15.

El cambio del signo entre ambas fórmulas corresponde a un desfase de 180 grados, lo que es igual a π .

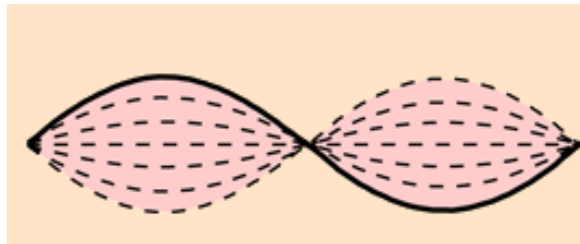


Figura 15. Ejemplo de una onda estacionaria
Fuente: Universidad Estatal de Georgia (2017).

2.14. Rapidez de una onda mecánica transversal

Una de las características principales de una onda es su rapidez, dependiendo del medio en el que se desplacen, como se muestra en la figura 16. Las características físicas que la determinaran serán la masa por unidad de longitud o masa lineal, si esta se aumenta su movimiento disminuiría y si se reduce aumentaría. (Young y Freeman, 2013).

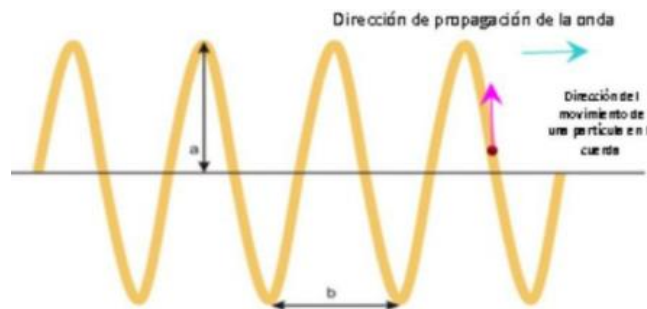


Figura 16. Matemática de una onda transversal
Fuente: Zapata (2019).

2.15. Energía del movimiento ondulatorio de las ondas mecánicas

Todo movimiento ondulatorio posee energía, como las ondas de radiación solar o las mecánicas telúricas, cuando estas se propagan cada sección ejerce una fuerza y realiza un trabajo sobre la porción adyacente. De esta forma, ellas transportan energía de una región del medio a otra. (Young y Freeman, 2013). Para generar este tipo de movimiento, se necesita la aplicación de una fuerza a una parte del medio; este punto de aplicación se mueve y de esta forma se efectúa un trabajo en el sistema. Al avanzar, cada sección ejerce estas características a la adyacente, pero hay que mencionar que cuanto más distancia recorra la fuerza de llegada, el trabajo será menor. Como se muestra en la figura 17.

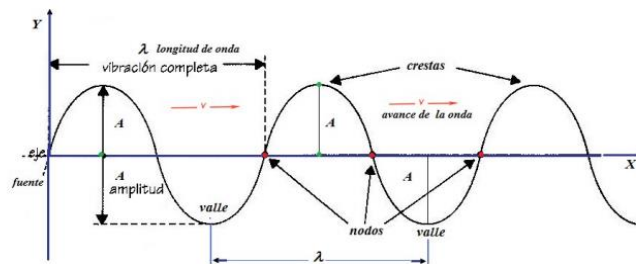


Figura 17. Partes de una onda mecánica de movimiento ondulatorio
Fuente: Xunta de Galicia (2017).

2.16. Tipos de suelo de Costa Rica

Para comprender el fenómeno sísmico en Costa Rica y a nivel mundial, primero hay que entender el comportamiento de las ondas mecánicas en los distintos tipos de suelos que lo componen.

Ejecutado, en el 2012, el mapa de suelos con la leyenda WRB, por sus siglas en inglés *World Reference Base for Soil Resources 2007*, se realizó el mapa de los suelos de Costa Rica a escala de 1:200 000, mostrado en la figura 18.

El mapa muestra los tipos de suelos dominantes, de acuerdo con el sistema de clasificación y correlación de suelos WRB. En Costa Rica se presentan 15, y además se observa un segundo nivel de generalización, que corresponde al nombre del Grupo de Suelo de Referencia, más distintos calificadores. (Mata Chinchilla, Vásquez Morera y Rosales Ibarra, 2012).

8. Vertisoles: compuestos mayormente por suelos arcillosos, se localizan principalmente en el río Tempisque, y poseen bajo contenido de azufre. En temporadas secas se les originan grietas.
9. Fluvisoles: se presentan en llanuras aluviales.
10. Phaeozems: conocido como el suelo normal, posee una profundidad de un metro.
11. Plinthosoles: ubicados en la Zona Norte del país, compuestos de pinita (hierro y manganeso), son pobres en humus, arcilla y cuarzo.
12. Stagnosoles: son suelos pasados por agua, mayormente erosionados, y se encuentran en la Zona Norte.
13. Histosoles: son compuestos de material orgánico.
14. Podzoles: superficiales, por lo general están compuestos de ceniza, óxido de hierro. Se ubican principalmente en la cordillera de Talamanca.
15. Arenosoles: comúnmente conocidos como arenisca, se localizan en las playas del litoral Pacífico y Atlántico.

2.17. Velocidades de las ondas sísmicas según el tipo de suelo

Las ondas sísmicas, y sus cualidades físicas, varían dependiendo del tipo de suelo que compone la zona de falla o epicentro donde ocurra el evento sísmico.

Un estudio de velocidades sísmicas, realizado mediante un geófono por la Universidad Nacional de Colombia, la cual tabuló las velocidades de las ondas en distintos tipos de suelo, se muestra en la tabla 3.

Tabla 3. *Velocidades de las ondas sísmicas en distintos tipos de suelo*

Medio	Velocidad de la onda primaria (m/s)	Velocidad de la onda secundaria (m/s)
Granito	5200	3000
Basalto	6400	3200
Calizas	2400	1350
Areniscas	3500	2150

Fuente: Universidad Nacional de Colombia (2012).

En este estudio se observó que en los suelos de alto contenido rocoso los daños en la superficie eran mínimos; en cambio, en los suelos de composición suave como areniscas, las ondas amplían su fuerza y su distancia de propagación.

2.18. Amplificación de las ondas sísmicas

Las ondas sísmicas viajan desde donde se origina el sismo o terremoto hasta la roca basal; la trayectoria o dirección de propagación comienza a viajar cada vez más en forma vertical, a través de las distintas capas que componen ese suelo. Este fenómeno se estudia en Física, y se describe mediante lo que se conoce como la Ley de Snell: cuando la onda llega a una interfase entre dos tipos de suelo y el de la parte superior es más “blando”, la trayectoria de las ondas se hace más vertical, como se muestra en la figura 19. (Universidad de Puerto Rico-Recinto de Mayagüez, 2020).

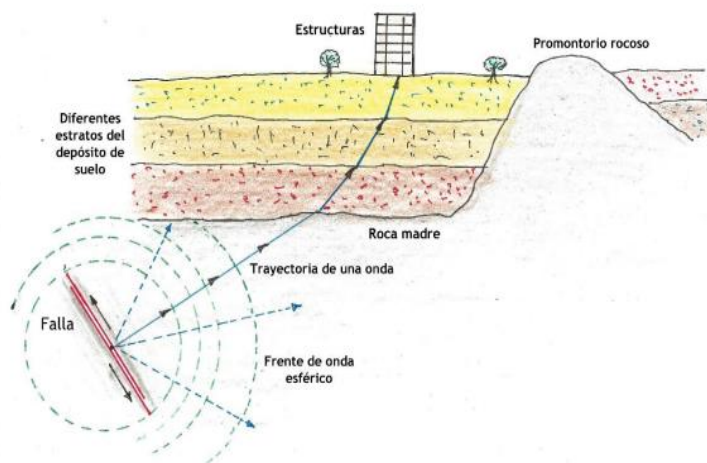


Figura 19. Amplificación de las ondas sísmicas
Fuente: Universidad de Puerto Rico-Recinto de Mayagüez (2020).

La Ley de Snell, tal como se muestra en la figura 20, se aplica cuando hay un suelo blando, para demostrar que cuando la onda sísmica viaja a través del material, su ángulo y su trayectoria cada vez serán más verticales.

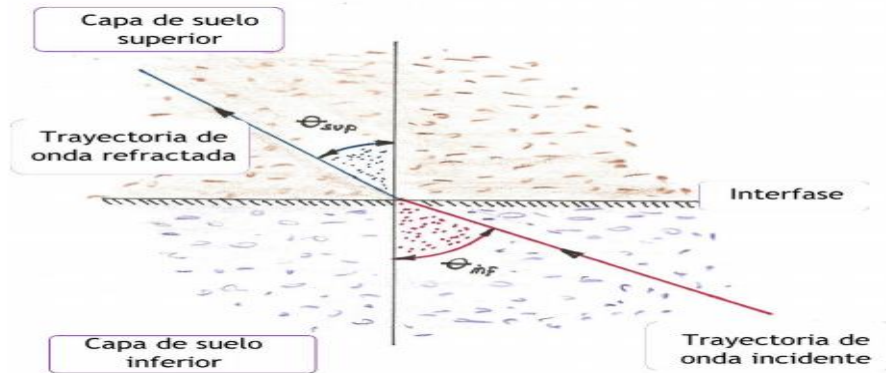


Figura 20. Diagrama de la Ley de Snell en las fallas sísmicas
Fuente: Universidad de Puerto Rico-Recinto de Mayagüez (2020).

La velocidad es en función del módulo de corte del material G ; esta se propaga a través de las capas que se desplacen, y dependiendo de su composición. Como se observó en la tabla 3, su velocidad aumenta o disminuye, esto se ve reflejado en el principio de la conservación de la energía: si la energía cinética disminuye, la potencial de deformación aumentará. (Universidad de Puerto Rico-Recinto de Mayagüez, 2020).

Cuando las ondas se encuentran con capas de suelo de composición suave, este problema aumentará exponencialmente, al contrario del modo como ocurriría en una composición rígida.

2.18.1 Frecuencia natural

Esta ocurre cuando un sistema vibra por sí mismo, después de sufrir una aplicación de fuerza externa inicial, este comenzara a oscilar naturalmente, a este fenómeno se le conoce como frecuencia natural. Este dependerá de la cantidad de grados de movimiento, ya que, al tener más de uno, poseerá múltiples frecuencias. (Rao, 2012).

Según la Universidad de Puerto Rico-Recinto de Mayagüez (2020), en caso de ondas sísmicas, esta se expresará por la siguiente fórmula matemática:

$$f_{nat} = \frac{V_s}{4H} \quad (15)$$

En esta ecuación, la V_s representa la velocidad de la onda sísmica que viaja hacia la superficie, y H la profundidad de donde se origina.

2.19. Energía de un sismo

Los sismos poseen una unidad de medición de energía, denominada ergio; su ecuación, conformada por logaritmos, indica la cantidad liberada en el momento. Se estima que, debido a fracturas repentinas por terremotos alrededor de todo el mundo, es de 10^{25} y 10^{26} ergios. (Instituto Nacional de Prevención Sísmica, 1991).

Un ergio equivale a 1×10^6 de joules.

$$\log.ES = 11,8 + 1,5.MS \quad (16)$$

En la ecuación (16) no es el total de la energía liberada por un sismo, sino la que irradia en forma de ondas sísmicas, la cual representa una pequeña parte del total liberado cuando ocurre un terremoto.

Si esta fórmula está en términos prácticos, se puede calcular la cantidad de energía para cada magnitud de sismo. Si se usa esta ecuación, por ejemplo, con un sismo de 5,5 Mw, se da como resultado que este sería aproximadamente 10^{20} ergios. Si la magnitud se incrementa en una unidad, esto equivale a un aumento de un factor de $10^{1,5}$, que vendría siendo 32 veces. (Instituto Nacional de Prevención Sísmica, 1991).

Tabla 4. *Comparativa de energías de eventos sísmicos*

Magnitud (Mw)	Energía (erg)
8,5	$3,60 \times 10^{24}$
8,0	$6,30 \times 10^{23}$
7,5	$1,10 \times 10^{23}$
7,0	$2,10 \times 10^{21}$
6,5	$3,60 \times 10^{21}$
6,1	$8,90 \times 10^{20}$
6,0	$6,30 \times 10^{20}$
5,5	$1,10 \times 10^{20}$
5,0	$2,00 \times 10^{19}$
4,8	$1,00 \times 10^{19}$
4,5	$3,60 \times 10^{18}$
4,0	$6,30 \times 10^{17}$

Fuente: Instituto Nacional de Prevención Sísmica (1991).

Como dato para resaltar de la tabla 4, en la magnitud de 6,1, su energía liberada equivale a la bomba nuclear de Hiroshima al final de la Segunda Guerra Mundial. Mientras, con valor de 4,8 Mw, lo cual es una magnitud común en términos de ocurrencia, es la misma que impactó en el atolón Bikini durante pruebas de material nuclear entre los años 1949 y 1958. (Instituto Nacional de Prevención Sísmica, 1991).

Para tener un parámetro con una unidad conocida, el ergio se puede convertir a kWh, que posee un valor de $3,6 \times 10^6$ joules o $3,6 \times 10^{13}$ ergios.

Otra manera de representar la energía de un sismo es por medio de una esfera, tal como se muestra en la figura 21, con base en su fórmula de volumen, ya que su tamaño representará la cantidad de energía liberada por el sismo; por ejemplo, en una magnitud 2 Mw, que equivale a $6,3 \times 10^{14}$ ergios, se representará con un radio 2,5 centímetros, que es el tamaño de una pelota de golf.

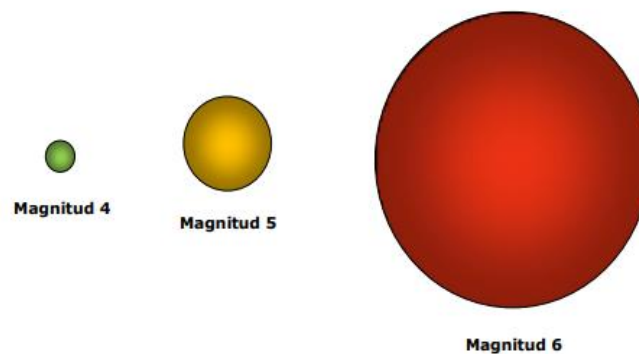


Figura 21. Representación de sismos de magnitudes 4, 5 y 6 por medio de esferas
Fuente: Instituto Nacional de Prevención Sísmica (1991).

En la tabla 5, que contiene datos del USGS (Instituto de Prevención Sísmica, 1991), se explica la cantidad de sismos por año; estos dan el número de eventos sísmicos según los rangos de magnitudes, de los 2,0 Mw hasta los mayores a 8,0 Mw., Los eventos con valores muy elevados son los más escasos en aparición a nivel global.

Tabla 5. *Estadísticas del USGS de sismos por año según su magnitud*

Magnitud	Frecuencia anual esperada
2,0-2,9	1,300,000 (estimado)
3,0-3,9	130,000 (estimado)
4,0-4,9	13,000 (estimado)
5,0-5,9	1329
6,0-6,9	134
7,0-7,9	15
Mayores a 8,0	1

Fuente: Instituto Nacional de Prevención Sísmica (1991).

Como se puede apreciar, la mayor cantidad de sismos que ocurren en periodo de un año son los que se clasifican como microsismos, ya que son registrables pero la población por lo general no los siente. También, el USGS han generado datos que demuestran el porcentaje de energía que se irradia dependiendo de la zona, ya sea en el Cinturón de Fuego del Pacífico o Asia y su profundidad (Instituto Nacional de Prevención Sísmica, 1991), representados en la tabla 6.

Tabla 6. *Porcentajes de energía por zona sísmica.*

Región	Energía %		
	Superficiales	Intermedios	Profundos
Circum-Pacífico	75,4	89	100
Mediterránea y Trans-Asiática	22,9	11	0
Otras	1,8	0	0
Total	100%	100%	100%

Fuente: Instituto Nacional de Prevención Sísmica (1991).

En el caso de Costa Rica, la sismicidad por año, en este caso el 2020, tuvo una cantidad de eventos mayor al año 2010, con 12739 eventos registrados por los instrumentos del OVSICORI, donde la región con más sismos fue la del Pacífico central, como se muestra en la figura 22.

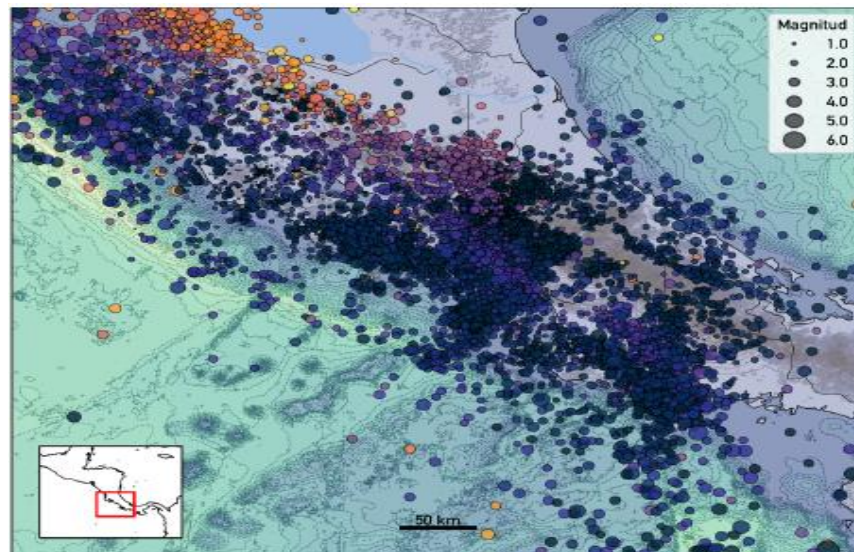


Figura 22. Cantidad de sismos en Costa Rica en el 2020
Fuente: OVSICORI (2020).

2.20. Generación de energía

En materia de generación de energía eléctrica, existen a nivel mundial varias formas de obtención. El avance en este campo es crucial para el bienestar de la sociedad, así como la constante búsqueda de una fuente inagotable. Según datos de Colino Martínez y Caro, se estiman los siguientes costos unitarios en la figura 23. Se puede decir que los costes de la generación de energía se desglosan entre los gastos de capital que corresponden a la inversión inicial, referentes al combustible de cada sistema de producción y derivados del mantenimiento, en conjunto con la operación de las plantas generadoras. (Colino Martínez y Caro, 2010). Las energías renovables, tales como la eólica y la solar, presentan un impacto económico menor a las tradicionales, en cuestiones operativas y de mantenimiento, pero la instalación, junto con la puesta en marcha, afectan directamente el precio final de la electricidad.

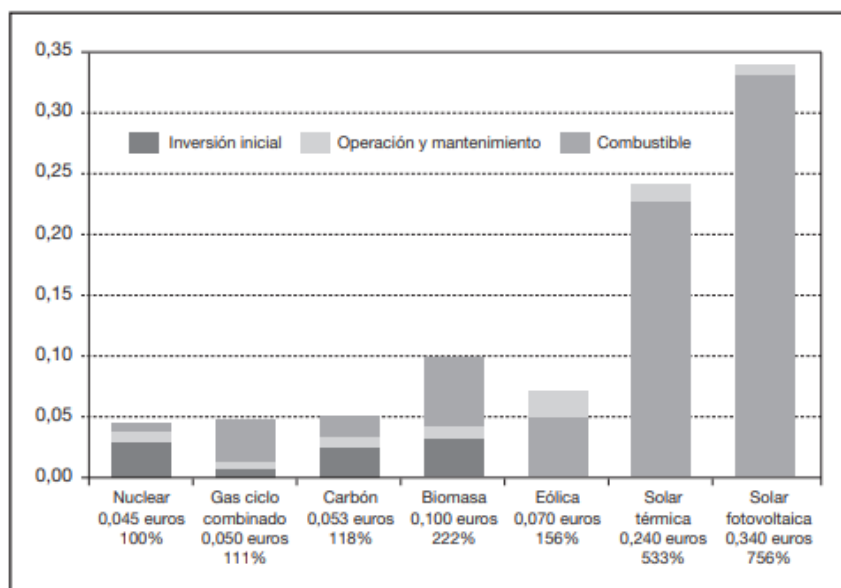


Figura 23. Costo unitario de energías en España

Fuente: Colino Martínez y Caro (2010).

2.20.1. Energía hidráulica

Mayormente conocida como energía hidroeléctrica, posee una gran cantidad de características, en comparación con las otras fuentes de energía existentes, tales como: acumulable, de flexibilidad de respuesta y reutilizable. En un país como España, esta producción asciende a los 50 megavatios (Colino Martínez y Caro, 2010). Pero desafortunadamente se ha visto agotada en prácticas de pequeños emplazamientos. Aún existen pequeñas centrales hidroeléctricas con capacidad de 10 megavatios, y estos aprovechan embalses para su generación.

2.20.2. Energía eólica

Este tipo de fuente es una de las más antiguas que existen; su primera mención data del año 1180, en un documento de occidente. Este mecanismo consta de un eje, el cual fue construido de forma vertical, y al extremo unos brazos que se movían de acuerdo con la dirección del viento. Posteriormente, en el siglo XV, se comenzaron a construir con ejes horizontales, y su principal función pasó a ser de bombas de agua en Holanda, y en esta zona llegó a tener más de 8000 molinos. En

el año 1745, Edmund Lee patentó el timón que orientaba automáticamente a la dirección del viento. Los molinos utilizados para serrar madera producían desempleo, debido a esto, molinos como el Limehouse, fue destruido en 1778 por la muchedumbre. (Colino Martínez y Caro, 2010). Este tipo de energía tuvo la oportunidad de utilizarse en la crisis del petróleo de 1973, demostrando su gran campo de aplicación, e incluso se pueden aprovechar los vientos marinos.

2.20.3. Energía solar

Esta idea ha estado presente desde las sociedades antiguas orientales, egipcias y griegas, donde en ellas se consideraba que el sol era una fuente de energía inagotable, pero ante la ausencia de conocimiento, no hicieron uso de ella. Esta se puede transformar de radiación solar a energía eléctrica, en modalidades como: el termoelectrico y el fotoelectrico. (Colino Martínez y Caro, 2010). En la primera modalidad, la electricidad se produce mediante la radiación solar, mientras que en el segundo tipo la energía de los fotones, es aprovechada para la producción, por medio de la conversión de energía solar a eléctrica, basándose en la fuerza electromotriz de un material semiconductor.

En España el llamado huerto o huerta solar, que está compuesto por distintas instalaciones, es el más común y pueden llegar a una potencia de 100 kilovatios.

2.20.4. Energía geotérmica

Esta fuente se basa en la obtención de calor del interior de la tierra. La energía geotérmica se da por la diferencia de temperaturas que existen entre el núcleo de la Tierra y la corteza, lo que causa un flujo de calor hacia la superficie. (Colino Martínez y Caro, 2010). En épocas recientes, se utiliza con fines de calefacción y para la generación de electricidad.

En Costa Rica se desarrollan proyectos de este tipo, debido a la gran presencia de volcanes, como el proyecto Miravalles. Su generación alcanza los 165,5 Mw en capacidad instalada, mientras que su producción mensual es de 84,8 gigawatts-hora. (Instituto Costarricense de Electricidad, 2015).

2.20.5. Petróleo

Es el modelo más productivo, ya que el 90% está siendo utilizado para cumplir con las demandas energéticas. Actualmente, las grandes reservas están en territorio de Oriente Medio, el cual posee el 60% a nivel mundial, representado en la figura 24. Esta fuente es la que tiene a la comunidad científica preocupada, debido a que no es un recurso infinito, y se requiere buscar un reemplazo para el futuro. (Colino Martínez y Caro, 2010).

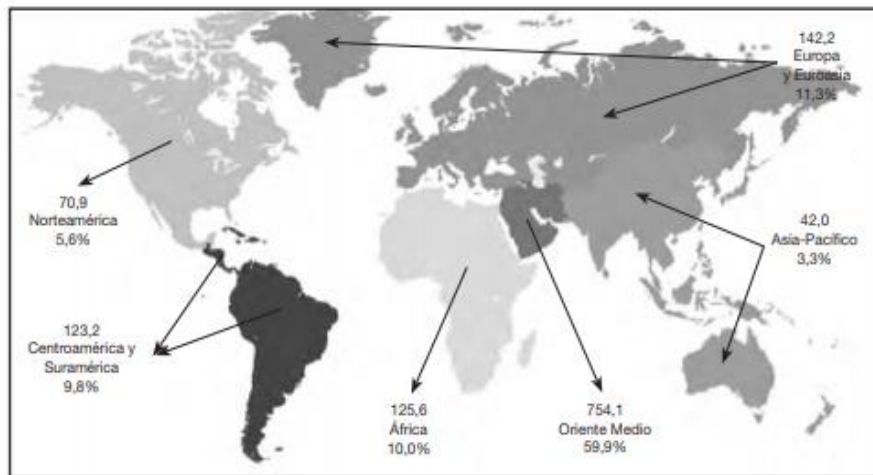


Figura 24. Reservas de petróleo a nivel mundial
Fuente: Colino Martínez y Caro (2010).

2.21. Ley de Faraday

Este científico británico, en la década de 1831, se dispuso a determinar cómo se generaba las corrientes eléctricas inducidas, para esto utilizó un imán con un devanado de la bobina, mostrado en la figura 25. Descubrió que cuando el imán entraba y salía de la bobina, producida una corriente inducida en esta, el magneto posee lo que Faraday describe como líneas de fuerza. Estas se apreciaban cuando se colocaban partículas de hierro sobre ellos, lo que originó la ley de producción de electricidad mediante imanes; la cual indica que la magnitud de la corriente se relaciona con la cantidad de líneas de fuerza cortadas por el conductor en un determinado tiempo. (Pearce Willimas, 2021).

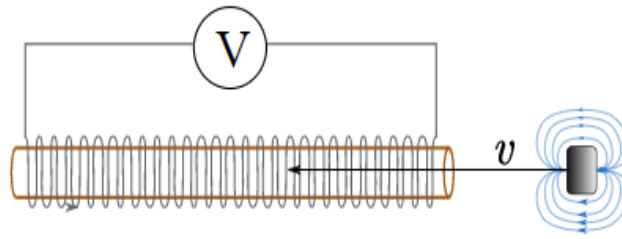


Figura 25. Experimento de Faraday
Fuente: Khan Academic (2017).

2.22. Fórmula de Faraday

Este científico notó un cambio en el flujo magnético, en el momento en que un imán pasaba por la bobina en un determinado periodo. La Ley de la inducción de Faraday dice que la fuerza electromotriz inducida, ε , en un circuito es igual al valor negativo de la rapidez con la cual está cambiando el flujo que atraviesa este. (Universidad Nacional de La Plata, 2016). Se representa por la siguiente fórmula:

$$\varepsilon = -\frac{d\Phi_B}{dt} \quad (17)$$

Esta ecuación indica el cambio de un flujo magnético Φ_B , inducido a través de tiempo t . Cuantas más veces ocurre este fenómeno, más fuerza electromotriz ε se generará, y por consecuencia más voltaje.

El símbolo negativo es un claro indicador de la fuerza electromotriz inducida; si la bobina posee un N número de vueltas, esta fuerza electromotriz ε aparecerá en cada vuelta de la bobina, y los casos más comunes son los tiroides y solenoides, como lo indica la fórmula:

$$\varepsilon = -N \frac{d\Phi_B}{dt} = -\frac{d(N\Phi_B)}{dt} \quad (18)$$

Esta expresión se puede interpretar, mencionando que la fuerza electromotriz inducida en un circuito dependerá de la rapidez con la que cambia el

flujo magnético que lo atraviesa, y directamente relacionado al número de espiras del inducido.

2.23. Ley de Lenz

Esta ley explica el sentido de las corrientes inducidas, que a la vez puede ser explicada por la Ley de la conservación de la energía. La producción de una corriente eléctrica requiere un consumo de energía, y la acción de una fuerza desplazando su punto de aplicación da como resultado la ejecución de un trabajo. Cuando el polo norte de un imán se acerca a una espira, la corriente inducida circulará frente al magneto para que posea la misma dirección, en este caso el norte; por lo que ejercerá una fuerza contraria sobre este, debido a su igualdad de polaridad; por consiguiente, presentará una atracción magnética por el polo opuesto. (Universidad Nacional de la Plata, 2016).

En la inducción electromagnética, el trabajo realizado en contra de las fuerzas magnéticas que aparecen entre espira e imán, suministraría la energía necesaria para mantener la corriente inducida. Si no hay desplazamiento, el trabajo es nulo, no se transfiere energía al sistema y las corrientes inducidas no aparecerían. (Universidad Nacional de La Plata, 2016).

2.23.1. Campos magnéticos variables en el tiempo

Si una espira conductora se coloca en el campo magnético, cambiará el flujo que pasa por ella, y se producirá una fuerza electromotriz inducida en esta. Esto se puede observar en forma microscópica, este cambio de flujo producirá un campo eléctrico en distintos puntos de la espira, mostrado en la figura 26, y a su vez este tiene características similares que uno producido por cargas estáticas. (Universidad Nacional de La Plata, 2016).

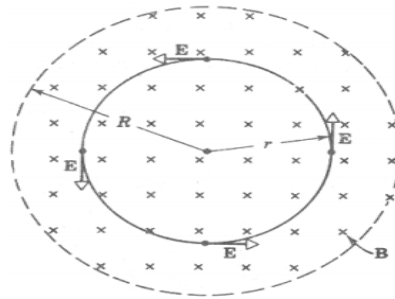


Figura 26. Ejemplo de un campo magnético variable en un círculo
Fuente: Universidad Nacional de La Plata (2016).

2.24. Corrientes de Foucault

Para entender este fenómeno, se podría tomar como ejemplo un campo magnético variable y perpendicular a una cara de un conductor, donde el campo eléctrico inducido generará en su interior corrientes eléctricas conocidas como corrientes de Foucault o corrientes en remolino, que se producen también cuando el conductor se mueve dentro del campo magnético. El resultado es una disipación de energía por calentamiento. (Universidad Nacional de La Plata, 2016).

Un conductor puede aumentar su temperatura debido a este tipo de corrientes; a este proceso se le llama calentamiento inducido.

2.25. Aplicaciones de la Ley de Faraday

Este físico, nacido en Londres, Inglaterra, en 1791, es considerado uno de los más grandes científicos del siglo XIX. Entre sus logros destacados está la generación de corriente eléctrica con base en el flujo magnético. Él fue el inventor del primer motor eléctrico, y este descubrimiento le dio una nueva visión de la electricidad, y con ello explorar diferentes campos y su potencial de aplicación. (Pearce Willimas, 2021).

No solo creó esta idea, sino que también, por medio de los fundamentos de su ley, se lograron realizar grandes avances como: el generador o alternador, el transformador, el freno magnético, las cocinas de inducción y el dinamo.

2.25.1. Producción de corriente alterna

La corriente alterna se caracteriza porque su sentido cambia alternativamente con el tiempo. Esto ocurre cuando el generador que la produce invierte periódicamente sus dos polos eléctricos, convirtiendo el positivo en negativo, muchas veces por segundo y viceversa. (Universidad Nacional de La Plata, 2016).

Como ya se había mencionado, la Ley de Faraday dicta que se induce una fuerza electromotriz en un círculo eléctrico siempre que varíe el campo magnético B que lo atraviesa. La ecuación del campo magnético inducido se representa de la siguiente manera:

$$\Phi_B = \int B ds = \int B ds * \cos(\theta) \quad (19)$$

Este puede variar si su área s cambia limitando al conductor; también esto se ve afectado dependiendo de la intensidad del campo magnético que la atraviesa, e incluso es propensa a cambiar dependiendo de la orientación entre ambas directamente en su ángulo, como se muestra en la figura 27.

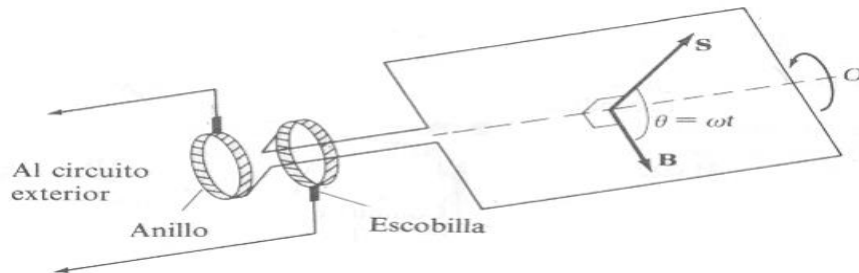


Figura 27. Representación de la generación de corriente alterna
Fuente: Universidad Nacional de La Plata (2016).

2.25.2. El alternador

Este es el nombre que recibe el generador de la corriente alterna; se basa directamente en la producción de fuerza electromotriz por medio del fenómeno de inducción electromagnética.

El imán que proporciona este campo magnético se denomina inductor, mientras que a la bobina que recibe la fuerza electromotriz se le llama inducido. Por lo general esta bobina se coloca en un núcleo de hierro, y se encuentra impermeabilizada a los efectos del magnetismo.

Los dos extremos de hilo conductor del inducido se conectan a unos anillos colectores que giran junto con la bobina. Las escobillas, que suelen ser de grafito, están en contacto permanente, mediante fricción, con los anillos colectores, y transmiten la tensión eléctrica producida a los bornes del generador, donde puede conectarse a un circuito exterior. (Universidad Nacional de La Plata, 2016).

Una característica que poseen los alternadores más grandes es que el inducido está fijo, mientras que el inductor se encuentra en movimiento; en estos casos no son necesarios los anillos colectores ni las escobillas, y estos dispositivos son esenciales para las centrales eléctricas, debido a la alta tensión que se maneja. Son cruciales en las plantas de generación, ya que transmiten alta tensión por medio de una red de tendido, y es transformada en instalaciones intermedias para ser distribuidas a la población con una corriente de 220 voltios, dependiendo del país. En Argentina, su frecuencia de oscilación equivale a 50 ciclos por segundo. (Universidad Nacional de La Plata, 2016)

2.25.3. El dinamo

“Puede ser considerada como una modificación del alternador que permite generar corrientes continuas”. (Universidad Nacional de La Plata, 2016, p.9) Este logra que la bobina solo tenga un sentido en generación; en caso de invertir la conexión, la fuerza electromotriz también cambiará, y para ello se sustituyen los anillos colectores por un cilindro metálico, compuesto de dos mitades aisladas y conectadas entre sí al extremo del conductor. A esta pieza se le denomina conmutador, posee la característica que cambia en cada media vuelta la polaridad del generador.

Un claro ejemplo de la implementación del dinamo es el de ciertos modelos de bicicletas, los cuales producen luz mediante el movimiento. Si la velocidad

desciende la luminosidad también, mientras que si aumenta esta también lo hará de la misma forma.

2.25.4. Inducción mutua

Si se colocan dos bobinas una cerca de la otra, una producirá un flujo en la otra. Si este flujo cambia cuando lo hace la corriente, aparecerá una fuerza electromotriz inducida en la segunda bobina, de acuerdo con la Ley de Faraday. Sin embargo, no se necesitan dos bobinas para poner de manifiesto un efecto de inducción. (Universidad Nacional de La Plata, 2016).

Cuando aparece la fuerza electromotriz inducida en la bobina se cambia la corriente de esta; a este fenómeno se le conoce como autoinducción, y la fuerza electromotriz también percibe esta propiedad.

2.26. Energía y el campo magnético

La energía también posee la propiedad de almacenarse en un campo magnético; por ejemplo, cuando dos alambres llevan una corriente en el mismo sentido, estos se atraen entre sí, y para lograr separarlos se debe realizar un trabajo para conseguirlo.

Esta energía perdida se guarda en el campo magnético que existe entre estos; si se quiere recuperar, lo único que se debe hacer es colocarlos en su posición inicial en otras palabras juntos. (Universidad Nacional de la Plata, 2016).

2.27. Generador eléctrico lineal

Este tipo de máquina, como su propio nombre lo indica, aprovecha un movimiento lineal para la generación de energía eléctrica, a diferencia de los rotativos, que utilizan la potencia mecánica existente en el giro de un eje. (González Cubero, 2011). El rotor es el responsable de la inducción magnética, la cual se puede hacer utilizando imanes permanentes o por medio de una corriente de excitación; esta determinará el resto de los subsistemas involucrados en la producción. Este mecanismo está siendo utilizado en dispositivos de conversión del tipo absorbedor puntual, que se encargan de absorber el movimiento oscilatorio del oleaje, de manera directa, sin necesidad de pasos adicionales para lograr su

conversión. Cabe resaltar que su principio de funcionamiento está basado en la Ley de Faraday, debido a sus bajas velocidades verticales, mostrado en la figura 28.

Existen varios tipos de generadores lineales:

- Generador lineal de flujo magnético longitudinal.
- Generador lineal de flujo magnético transversal.
- Generador lineal tubular de núcleo de aire

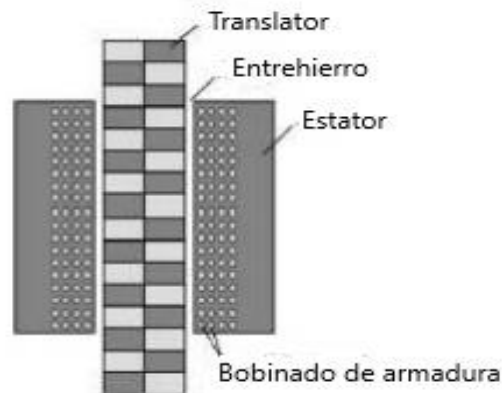


Figura 28. Ejemplo de un generador lineal
Fuente: González Cubero (2011).

2.27.1 Generador eléctrico lineal de flujo magnético longitudinal

En esta tipología, el camino seguido por el flujo magnético a la hora de concatenar las espiras a lo largo de la máquina se realiza en un plano, que contiene el eje longitudinal propio del generador. Como ventaja podemos citar su geometría, dando la posibilidad de una construcción simétrica, reduciendo el efecto de las fuerzas normales. (González Cubero, 2011).

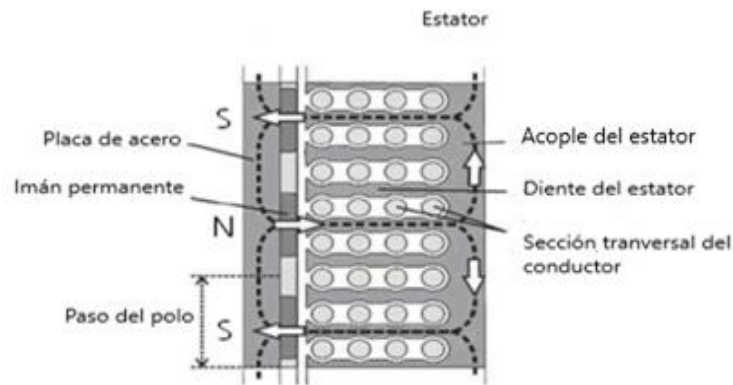


Figura 29. Ejemplo de un generador lineal longitudinal
Fuente: González Cubero (2011).

En esta clase de generadores, mostrado en la figura 29, comúnmente, sus imanes están localizados en el rotor, de modo que sus polaridades se vayan alternando para que se pueda crear un circuito magnético cerrado.

El devanado inducido está instalado en una dentadura implantada en el estator, y su configuración puede concatenar el flujo creado por los imanes. Estos generadores poseen una reactancia síncrona pequeña y una composición del estator muy simple, a pesar de tratarse de una máquina robusta. (González Cubero, 2011).

2.27.2 Generador eléctrico lineal de flujo magnético transversal

El camino recorrido por el flujo magnético se realiza en el plano perpendicular a la dirección del movimiento; este se encuentra compuesto por imanes permanentes, colocados de forma que sus polaridades se vayan alternando para que, mediante unos núcleos que poseen forma de una c, que a su vez están rodeados por unas bobinas, estas puedan ser inducidas y se cierre el circuito magnético siempre en una orientación longitudinal, que se muestra en la figura 30.

En comparación con el tipo anterior de generador lineal, se destaca que este presenta una eficiencia mayor, pero su compleja estructura del estator, lo convierte en un gran reto de construcción. (González Cubero, 2011).

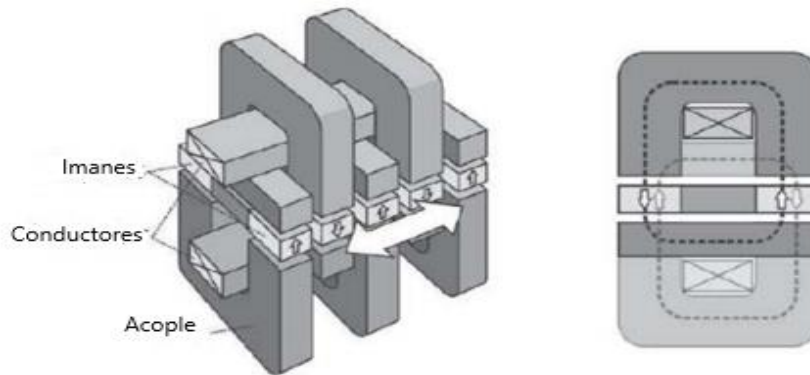


Figura 30. Ejemplo de un generador lineal transversal
Fuente: **González Cubero (2011)**.

2.27.3. Generador lineal de núcleo de aire

Se trata de un generador de forma tubular, que utiliza un núcleo de aire para cerrar el circuito magnético. Los imanes son colocados de forma que el flujo creado siempre tenga una dirección axial; también se pueden posicionar de manera que sus polaridades se vayan alternando, y sus devanados están rodeados de imanes, tal como se muestra en la figura 31. El diseño elimina las fuerzas normales de atracción entre el rotor lineal y estator, lo que proporciona una gran facilidad constructiva de este. (González Cubero, 2011). Una desventaja que posee es la de las grandes pérdidas magnéticas y un flujo menor al normal; esto causa que la potencia baje considerablemente, en comparación con los prototipos anteriores.

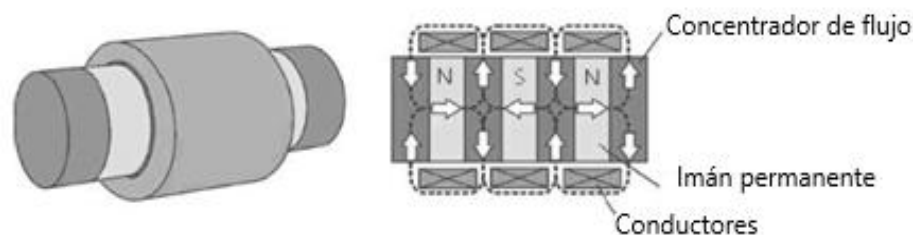


Figura 31. Ejemplo de un generador lineal de núcleo de aire
Fuente **González Cubero (2011)**.

En este tipo de generador las fuerzas normales se eliminan, a causa de la carencia de material ferromagnético en el estator, mejorando en gran medida sus posibilidades constructivas.

Pero debido a que su circuito se cierra con aire, el flujo magnético creado es mucho menor, pues la reluctancia magnética es muy alta, y consecuentemente su potencia generada por área entre hierro es significativamente más baja, en comparación con los dos tipos anteriores, demostrado en la tabla 7.

Tabla 7. Comparación de los tipos principales de generadores lineales

Tipo de generador	Potencia por área entre hierro (kW/m ²)	Ratio de flujo	Ventajas	Inconvenientes
Flujo longitudinal	~ 25	0,1-0,5	Baja reactancia síncrona, estátor simple y robusto	Baja potencia por área de entrehierro
Flujo transversal	~50	1,6-2,6	Alta potencia por área de entrehierro	Alta reactancia síncrona, estator complejo
Núcleo de aire	> 12,8	< 0,3	No hay fuerzas normales en el entrehierro	Muy baja potencia por área de entrehierro

Fuente: González Cubero (2011).

2.28. Generador lineal híbrido

Su característica más importante es la eliminación de los imanes permanentes en el rotor lineal, y la inducción magnética mediante la corriente de excitación en el embobinado, resultando de esto, que no haya presencia de fuerzas y la atracción de imanes a estructuras, mostrado en la figura 32. Este recibe ese nombre, debido a su flujo magnético circular. (Gómez León, 2010)

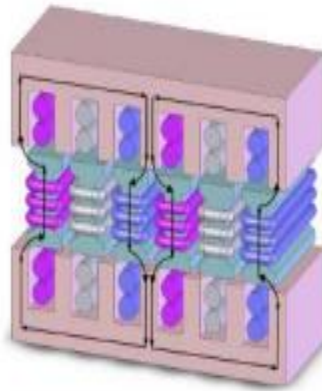


Figura 32. Generador lineal híbrido
Fuente: Gómez León (2010).

2.29. Aplicaciones de generadores lineales

Mencionados anteriormente, estos mecanismos son utilizados para la producción energética undimotriz, como el *Archimedes Wave Swing* (AWS), que fue diseñado para generar una potencia pico de 2,0 MW. Fue el primer prototipo en emplear este tipo de sistema; posee dos caras, lo cual reduce las fuerzas normales, y por medio de la geometría de los imanes se imposibilita el efecto cogging. (Gómez León, 2010). El modo de funcionamiento de este dispositivo es diferente a lo comúnmente visto; este se encuentra totalmente sumergido, y la presión que ejerce la columna de agua hace que la cámara descienda. Posteriormente, cuando este efecto pasa, se libera un gas, lo que ocasiona el ascenso de esta.

Otro generador, construido para este mismo campo, fue el propuesto por la Universidad de Uppsala, de Suecia, en conjunto con la empresa *Seabased*. Este posee una potencia máxima de 100 kW. Posee un diseño de “*small is beautiful*”, y esto define la idea de utilizar mecanismos de dimensiones pequeñas, a usar en proporciones superiores. (Gómez León, 2010).

Está compuesto por una boya, que flota en la superficie, mientras que el sistema se encuentra sumergido, mostrado en la figura 33. Como el caso anterior, este alcanza niveles de eficiencia del 86%. (Gómez León, 2010).



Figura 33. Generador Seabased
Fuente: Seabased (2020).

Estos generadores lineales se basan en un sistema oscilatorio con resortes en paralelo, con la aplicación del movimiento armónico simple. La masa que poseen estos es directamente afectada por la fuerza elástica producida, y la fuerza que actúa sobre esta es directamente proporcional al desplazamiento, pero opuesta a él en dirección, basada en el principio de la Ley de Hooke. (Resnick, Halliday, y Krane, 1993). Esta se puede visualizar por la figura 34.

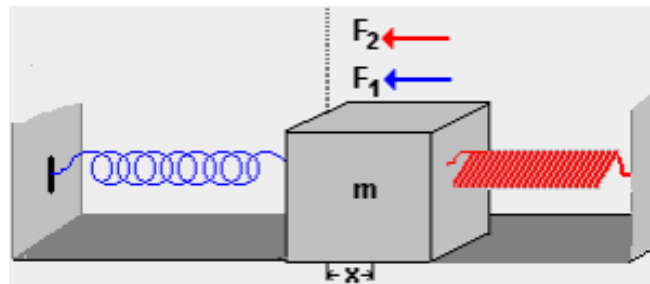


Figura 34. Movimiento armónico simple
Fuente: Universidad de Antioquia (2001).

Al depender de las condiciones presentes, la masa puede producir una fuerza contraria a la de los resortes, conocida como fricción, o en el caso que el medio intervenga directamente sobre el desempeño elástico, puede existir la fuerza de arrastre, que impedirá la oscilación y provocará vibraciones mecánicas en el sistema.

2.30. Alcances

- Generar electricidad por medio de las ondas mecánicas, suministradas por un evento sísmico.
- Diseñar un mecanismo de tipo lineal, para aprovechar la energía cinética emitida por movimiento telúricos.
- Poder representar la electricidad generada en un valor cuantitativo y su potencial, de acuerdo con la frecuencia de ocurrencia de evento a nivel nacional en periodo anual.

2.31. Limitaciones

- En el presente documento no se contempla el diseño de una estructura externa tipo contenedor.
- En esta investigación no se cuenta con el análisis de un cable conductor para transportar la electricidad desde el mecanismo hasta una batería.

Marco metodológico

Para generar electricidad por medio de las ondas mecánicas emitidas por un evento sísmico, lo primero es analizar los conceptos e historia que poseen estos fenómenos, sus magnitudes, y expresarlos en sus unidades ya comentadas en el marco teórico. El ergio se puede convertir directamente a la unidad de energía joule, para determinar la fuerza que posee según su valor en la escala Richter. Por medio de la ecuación de Gutenberg se calcula la energía liberada según la característica del evento; esta fórmula consiste en un despeje logarítmico, junto con constantes ya proporcionadas. Por medio de una división de unidades, en este caso entre la distancia hipocentral del movimiento telúrico, se indicará la fuerza según la profundidad del acontecimiento. Ya con la fuerza calculada, se procederá a investigar sobre el comportamiento fisicomatemático en distintos tipos de medios, a causa de sus comportamientos mecánicos, tales como velocidades y la superficie perpendicular, la cual será el prototipo.

Los datos fueron proporcionados por un estudio, que utilizó un geófono para medir la velocidad de las ondas secundarias internas en composiciones como caliza y basalto (Universidad Nacional de Colombia, 2012), los cuales están presentes en Costa Rica, y se usan estas magnitudes debido a que sus velocidades corresponden a un 90% de las que se perciben en la superficie.

Para calcular la potencia de llegada a la superficie de la máquina, se realizó un promedio de fuerzas según su magnitud hasta los 20 kilómetros de profundidad, y en promedio las fuerzas equivalentes para expresiones entre 1,0 y 1,9 Mw (Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Costa Rica, 2020), apreciando que la gran mayoría de los sismos ocurren desde 0 a 20 kilómetros. La superficie para utilizar será un área hipotética para los denominados microsismos, mayor a la del imán, a causa de su poca percepción, para magnitudes entre los rangos de 3,0 y 4,0 Mw, y el área utilizada será la del imán de neodimio.

Este mecanismo se posiciona a una distancia de cuatro kilómetros para la sensibilidad de los eventos imperceptibles para la población, hasta los 3,0 Mw, y en

el caso de una medida superior a esta, se coloca superficialmente, debido a que la energía liberada es mayor.

Para obtener la potencia que se ejercerá en el área del imán, se despejará por medio de la multiplicación de esta por la potencia inicial del sismo según su magnitud, y dividido entre el área de la onda sísmica, la cual posee un comportamiento tridimensional, y todo esto se multiplica por el coseno del ángulo de llegada al mecanismo. El cálculo de la oscilación del mecanismo se define como el trabajo realizado por el sismo, según el tiempo de llegada al área. Ya conociendo las variables físicas de llegada, y por medio de la utilización de un sistema de resortes en paralelo, se calcula el desplazamiento de estos y sus velocidades, al momento de su estiramiento y posterior retorno a su forma inicial.

La frecuencia del movimiento oscilatorio se obtiene por medio de la división de la velocidad del sistema entre la distancia que recorrerá; en este caso se utilizó una corredera de 1,5 metros aproximadamente, para eliminar cualquier tipo de fricción. Se utiliza la fórmula del periodo para averiguar el tiempo que tardará en oscilar; ya obtenido, se procede a calcular el voltaje con la fórmula de la Ley de Faraday, y este se multiplica por la cantidad de eventos sísmicos por año a nivel nacional. (M. Protti, E. Chaves, comunicación personal, 12 de marzo de 2021).

Capítulo 3.

3.1. Modelo matemático para la generación

Debido al comportamiento mecánico de las ondas sísmicas, en conjunto con sus magnitudes físicas, basado en el principio de generadores eléctricos lineales, se diseña un prototipo capaz de producir electricidad mediante las vibraciones de los eventos sísmicos según la magnitud del evento. Con base en un modelo matemático, se demuestran las dimensiones y comportamientos del sistema ante un sismo, y sus rangos de aplicación de acuerdo con la geología que compone a Costa Rica.

3.1.1. Obtención de fuerzas sísmicas

La magnitud de los sismos se representa en la unidad ergio, la cual se puede transformar en la unidad de joules. Esta indica la energía para realizar un trabajo en una distancia, lo que conlleva al análisis de cuánta fuerza genera con base en la distancia hipocentral, según su magnitud. Por medio de la ecuación de Gutenberg (ecuación 20), se obtiene la energía disipada en la unidad utilizada en sismología el ergio, donde la M representará la magnitud del evento, y las constantes de 11,8 junto con 1,5 son predisuestas por los creadores de la fórmula Beno Gutenberg y Francis Richter en 1956. (Instituto de Nacional de Prevención Sísmica, 1991).

$$\log. ES = 11,8 + 1,5 \times M \quad (20)$$

Esta expresión matemática es el resultado de un despeje de logaritmos, la cual quedaría de la siguiente forma:

$$ES = 10^{11,8+1,5 \times M} \quad (21)$$

El ergio se puede transformar en joule cuando se aplica un factor de conversión, y al momento de dividir un trabajo entre la distancia, en este caso la profundidad, se obtiene su fuerza, que dispersará el sismo según su magnitud:

$$\frac{\frac{Kg \times m^2}{s^2}}{m} \quad (22)$$

Sus valores se afectarán, a causa de su localización hipocentral, asunto mostrado en la tabla 8, y serán directamente proporcionales a la magnitud del

evento en cuestión, debido a la diferencia de fuerzas respecto a la distancia desde el punto de origen hasta la superficie. Estas se pueden apreciar en la tabla 8, la cual indica que cuanto mayor sea la profundidad al momento en que ocurre el sismo, menor será la fuerza de llegada a la superficie o al mecanismo diseñado; por ende, su potencia de llegada se afectará, al igual que la generación que efectuará el mecanismo.

También, la potencia de llegada se verá reducida o aumentada, dependiendo del medio en el que se desplaza la onda mecánica sísmica.

3.1.2. Potencia de llegada

A causa de que Costa Rica posee, en las zonas de Guanacaste, el tipo de piedra llamada caliza, y también tiene la presencia de rocas de origen volcánico, conocidas como basalto, en las ondas sísmicas, específicamente las secundarias, las cuales poseen un gran porcentaje de las superficiales, sus velocidades son diferentes, debido a la composición del medio en el que se desplazan. Según la Universidad Nacional de Colombia (2012), estas poseen valor, mostrado en la tabla 3, lo cual posicionará el mecanismo en una zona con la misma composición que donde se originó el sismo, mostrado en la figura 35.

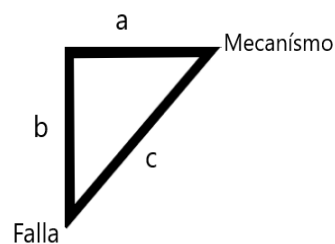


Figura 35. Análisis vectorial de la potencia de llegada.
Fuente: Elaboración propia.

Este teorema se representa por medio de

$$a^2 + b^2 = c^2 \quad (23)$$

El cateto b indicará la distancia hipocentral del sismo, y el cateto a es la distancia lineal con respecto a la falla sísmica.

Las ondas sísmicas poseen un comportamiento tridimensional. Al considerar el teorema mencionado, la hipotenusa del triángulo que se forma será el radio de la esfera, y su área A_e se representa por

$$A_e = 4 \times \pi \times c^2 \quad (24)$$

Mediante un promedio de fuerzas según las magnitudes sísmicas, f_{sis} , se obtiene la fuerza hasta la distancia necesaria, en este caso en un promedio ya dispuesto por los datos del OVSICORI (2020); esto, multiplicado por la velocidad de las ondas mecánicas, v_{os} , correspondientes al medio de desplazamiento, indicará la potencia inicial, p_i , en los rangos de magnitudes, mostrado por

$$P_i = f_{sis} \times v_{os} \quad (25)$$

El área que golpeará el sismo es igual al área del imán o la placa A_m , debido a que ambos poseen la misma dimensión en el caso de magnitudes no consideradas como microsismos; por tanto, para despejar la potencia final o de llegada, P_f , se expresaría como

$$P_f = \frac{P_i \cdot A_m}{A_e} * \cos \alpha \quad (26)$$

Al recordar la figura 35, esta fórmula será multiplicada por el ángulo adyacente, hasta una posición totalmente perpendicular; al estar en el segundo cuadrante, la única variable que poseerá será el signo, el cual indica el sentido del análisis.

La potencia inicial se calcula con base en la ecuación 25, en conjunto con los datos de la tabla 3 del marco teórico, donde esta indica la velocidad de las ondas sísmicas en las rocas en estudio, tales como caliza y basalto.

En el caso de los denominados microsismos, el área que recibirá la magnitud no podrá ser la de los imanes. Debido al casi nulo movimiento que efectuará, esta tendrá que ser un valor hipotético, por la razón de que el mecanismo no posee una estructura externa.

3.1.3 Movimiento del sistema

3.1.3.1. Resortes en paralelo

El funcionamiento de este mecanismo se compone de una pareja de resortes ubicados en paralelo, mostrado en la figura 36. Los eventos sísmicos poseen una frecuencia muy elevada, y esto provocará una oscilación de la masa, que a su vez generará corrientes parásitas, conocidas como corrientes de Foucault.

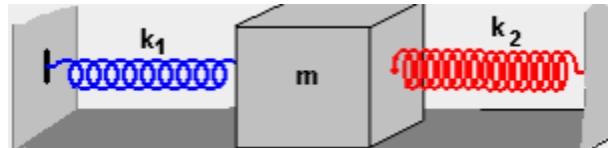


Figura 36. Sistema de resortes en paralelo
Fuente: Universidad de Antioquia (2001).

En este tipo de mecanismos la masa no ejercerá ninguna fuerza sobre los resortes; al contrario, esta será afectada por las fuerzas elásticas aplicadas por estos, como se muestra en la figura 36.

3.1.3.2. Comportamiento del sistema

Para demostrar el estiramiento y contracción del sistema de resortes en paralelo, con respecto al promedio de potencia de llegada en los rangos de magnitudes estudiados, la potencia sísmica de llegada se convierte en trabajo, W_{sis} , el cual sería el realizado por el sismo en su desplazamiento desde el punto de origen, en este caso la falla tectónica hasta su arribo al mecanismo, y este se ve demostrado por

$$W_{sis} = P_{ll} \times t \quad (27)$$

La variable P_{ll} se identifica como el promedio de la potencia de llegada, para el tiempo t ; para averiguar este, se aplica primero la ecuación 28, la cual es la frecuencia H con la que viaja el sismo, será la velocidad de la onda sísmica en el medio, v_{os} , entre la distancia, c , a utilizar en este caso se usa la distancia obtenida de la ecuación 23.

$$H = \frac{v_{os}}{c} \quad (28)$$

Esta conversión de energía sería cinética a potencial y viceversa; debido a que el sistema se encuentra en reposo antes de un evento, este será afectado por el trabajo que realiza el sismo, mostrado en la ecuación 27, que a su vez desplazará los resortes, ocasionando un estiramiento y compresión en estos.

$$W_{sis} = W_{R1} + W_{R2} \quad (29)$$

El trabajo de un resorte, W_R , está representado por

$$W_R = \frac{1}{2} \times k \times X_f - \frac{1}{2} \times k \times X_o \quad (30)$$

Esta ecuación se compone por la fórmula de energía potencial elástica U , la cual está compuesta por la constante elástica k multiplicada por la posición final X_f o la inicial X_o , que está representada por la expresión

$$U = \frac{1}{2} \times k \times X^2 \quad (31)$$

Está relacionada con la fuerza elástica basada en la Ley de Hooke, debido a que esta afectará directamente a una partícula en sistema de oscilación. (Resnick et al., 1993).

Al agregar las variables en la ecuación 29, esta se expresaría por

$$W_{sis} = \frac{1}{2} \times k_1 \times X_f^2 - \frac{1}{2} \times k_1 \times X_o^2 + \frac{1}{2} \times k_2 \times X_f^2 - \frac{1}{2} \times k_2 \times X_o^2 \quad (32)$$

La variable k es la constante elástica del resorte, la X_f y X_o representan las posiciones del resorte, en este caso final e inicial, a causa de que la longitud del resorte utilizada es la longitud libre, y esta no estará trabajando en compresión; por lo tanto, su energía potencial inicial en ambos casos se expresa

$$U_0 = \frac{1}{2} \times k \times X_o^2 = 0 \quad (33)$$

La energía potencial inicial de ambos resortes tendrá un valor de 0, que será representada de la siguiente forma

$$W_{sis} = \frac{1}{2} \times k_1 \times X_f^2 - \frac{1}{2} \times k_2 \times X_f^2 \quad (34)$$

Mediante un despeje de variables, se denota un diferencial de posiciones finales de ambos resortes, por medio del uso de una constante elástica equivalente. Esta se representa

$$W_{sis} = \frac{1}{2} \times k_e \times \Delta X_f^2 \quad (35)$$

Se tiene en cuenta que el desplazamiento del resorte 1, X_{fr1} afectará directamente al resorte 2, L_{R2} , y su compresión se mostrará por

$$X_{fr2} = X_{fr1} - L_{R2} \quad (36)$$

3.1.3.3. Diseño de los resortes

Se calcula la carga con base en las posiciones que pueden soportar estos resortes, según el valor de la constante elástica K .

$$K = \frac{P}{X_f - X_0} \quad (37)$$

Para los microsismos, el valor de K debe ser muy bajo debido a la sensibilidad; en estos se toma considerando el máximo de elongación del resorte con base en una carga P .

El esfuerzo de estos está dado por

$$S_y = 0,45 \times \left(\frac{\sigma_{material}}{D_a^{0.190}} \right) \quad (38)$$

Según Budynas y Nisbett (2015), el exponente que eleva el diámetro del alambre, D_a , dependerá del material escogido.

Los esfuerzos del resorte para calcular el índice del resorte, C , esfuerzo de fluencia a la torsión α y del factor de concentración de esfuerzos β , se demuestran por

$$\alpha = \frac{S_{sy}}{n} \quad (39)$$

Donde S_{sy} es el esfuerzo con el calibre de alambre entre un factor de seguridad n ; según Budynas y Nisbett (2015), está descrito por $n \geq 12$.

El otro factor para el índice del resorte β se demuestra por

$$\beta = \frac{8(1+\xi) \times F_{max}}{\pi \times d^2} \quad (40)$$

Esta expresa la multiplicación de fuerza máxima o carga, F_{max} , multiplicada por el rebase fraccional al cierre ξ . Este debe poseer un valor de $\xi \geq 0,15$ (Budynas y Nisbett, 2015), dividido entre el diámetro del alambre d , según el calibre escogido.

El índice del resorte, C , se calcula por

$$C = \frac{2 \times \alpha - \beta}{4 \times \beta} + \sqrt{\left(\frac{2 \times \alpha - \beta}{4 \times \beta}\right)^2 + \frac{3 \times \alpha}{4 \times \beta}} \quad (41)$$

El índice debe cumplir con el criterio de $4 \leq C \leq 12$; este rango da un valor que no pone en riesgo el resorte. (Budynas y Nisbett, 2015).

El diámetro del orificio del resorte, D_o , está dado por

$$D_o = C \times D_a \quad (42)$$

Este es el producto del índice del resorte C , por el diámetro del alambre escogido D_a .

El factor de Bergstrasser, K_B , se da por medio de

$$K_B = \frac{4 \times C + 2}{4 \times C - 3} \quad (43)$$

Según Budynas y Nisbett (2015), este factor, en comparación con el factor Wahl, sus resultados difieren en un 1%.

El esfuerzo que soportará el resorte, σ_s , y para determinar si es permisible se obtiene por medio de

$$\sigma_s = K_B \times \left(\frac{8 \times (1 + \xi) \times F_{max} \times D_o}{\pi \times D_a^2} \right) \quad (44)$$

Este producto, entre valores anteriormente calculados y definidos, indicará si el resorte soportará la carga ejercida, F_{max} , según el diámetro de alambre escogido D_a .

El número de vueltas del resorte, N_a , se denotará por

$$N_a = \frac{G \times d^4 \times L_{min}}{8 \times D^3 \times F_{max}} \quad (45)$$

Según Budynas y Nisbett (2015), el número de vueltas del resorte está compuesto por el módulo de elasticidad G , multiplicado por el diámetro del alambre escogido d , junto con la longitud mínima que se comprimirá el resorte, y es este caso acorde con la ecuación 45, dividido por el diámetro del orificio D , por la fuerza máxima o carga. La cantidad de vueltas debe estar entre el rango $3 \leq N_a \leq 15$. (Budynas y Nisbett, 2015). Si eso no se encuentra en este estimado, se tendrá que cambiar el calibre del alambre escogido.

La cantidad de vueltas totales del resorte será representada por

$$N_t = N_a + 2 \quad (46)$$

La longitud comprimida del resorte se denota por

$$L_s = D_a \times N_t \quad (47)$$

Esta se muestra como la multiplicación entre el diámetro del alambre, D_a , acorde con el calibre escogido y las vueltas total N_t , calculadas en la ecuación 46.

Su longitud de operación se muestra de la forma

$$L_o = L_s + (1 + \xi) \times 2 \quad (48)$$

La longitud comprimida L_s , sumada por el producto de rebase fraccional al cierre ξ , multiplicado por dos.

El diámetro externo del resorte OD , será dado por

$$OD = D_o + D_a \quad (49)$$

La sumatoria del diámetro del orificio, calculado en la ecuación 49, se hará por el diámetro del alambre que se escogió para el diseño.

3.1.3.4. Diseño del tornillo

Las placas estarán conectadas con la corredera por medio de un tornillo; este es diseñado mediante la sumatoria de fuerzas elásticas ejercidas por los resortes a la masa. El factor de precarga del tornillo, F_p , según Norton (2011), está dado por

$$F_p = P_{er} \times \sigma_p \times A_T \quad (50)$$

El porcentaje P_{er} , es acorde con el diseño del tornillo, multiplicado por el esfuerzo de prueba σ_p , según el grado escogido, por el área por esfuerzo de tensión del perno A_T basado en el tamaño del tornillo escogido.

La longitud de la cuerda, l_c , del perno se denota por medio de

$$l_c = 2 \times d + 0,25 \quad (51)$$

Según Norton (2011), el diámetro nominal d se utiliza de acuerdo con el tamaño de perno escogido. Su longitud sin cuerda, l_{sc} , está dado por:

$$l_{sc} = l_p - l_c \quad (52)$$

La longitud del perno, l_p , se da acorde con lo necesitado para el correcto funcionamiento del sistema.

La rigidez del perno, RS , en diseño, se denota por

$$\frac{1}{RS} = \frac{l_t}{A_t \times E} + \frac{l_s}{A_b \times E} \quad (53)$$

Según Norton (2011), A_t , el área de tensión según el tamaño escogido se multiplica por el módulo de elasticidad E , y este también por la variable A_b , es el área del perno, y esta se da por

$$A_b = \frac{\pi \times r^2}{4} \quad (54)$$

El esfuerzo máximo, σ_{Max} , que sufrirá el tornillo se calcula por medio de

$$\sigma_{Max} = \frac{C_{max}}{A_T} \quad (55)$$

El área por esfuerzo de tensión del perno A_T se basa en el tamaño escogido, y la carga máxima, C_{max} , es la sumatoria de las fuerzas elásticas ejercidas en la masa.

3.1.3.5. Velocidad del sistema

El método de solución en este tipo de problemas matemáticos se puede elaborar de dos formas: obteniendo una constante elástica equivalente, o en el caso de este estudio, usando cada constante para observar y analizar el comportamiento de cada resorte, mostrado por

$$W_{R1} = \frac{1}{2} \times m \times v_f^2 - W_{R2} \quad (56)$$

Al recordar la ecuación 33, la energía potencial en la posición inicial del resorte tendrá un valor de 0, y la expresión despejada se demuestra por

$$\frac{1}{2} \times k_1 \times X_f^2 + \frac{1}{2} \times k_2 \times X_f^2 = \frac{1}{2} \times m \times v_f^2 \quad (57)$$

La expresión despejada es en función de la velocidad final v_f , en función del movimiento, dependiendo de la magnitud.

La frecuencia de oscilación Z es la velocidad de los resortes, V_R , entre la distancia de la corredera, X_c , y esta se utiliza para eliminar la fricción del desplazamiento de la masa. La expresión está dada por

$$Z = \frac{V_R}{X_c} \quad (58)$$

Esta afectará el tiempo que tardan en desplazarse los imanes a través de la longitud de la corredera X_c , debido a que, si posee una distancia mayor, su frecuencia será menor, y en caso contrario, a menor distancia mayor frecuencia.

3.1.3.6. Placas e imanes

Para que esta generación se clasifique como poca o nula contaminante, se diseña con base en la Ley de Faraday, mediante un cambio en el flujo magnético

en el tiempo, que generará una fuerza electromotriz. Para esto se utiliza un imán de neodimio, y estos tipos de magnetos están compuestos de neodimio, hierro y boro. (Centro Magnético, 2016).

La masa de los imanes y las placas se calcula por medio del concepto denominado densidad, introducido por Arquímedes, que indica el grado de compacidad de una sustancia, esta su vez se define como la propiedad de la relación de la masa m entre el volumen v (Day y Capri, 2013), mostrada por

$$\rho = \frac{m}{v} \quad (59)$$

El volumen de estas piezas se calcula con base en la fórmula de un cilindro, ya que estas poseen esta forma geométrica con variaciones en el espesor entre ambas, y se denota por

$$v = \pi \times r^2 \times h \quad (60)$$

Esta ecuación es la multiplicación de π por el radio r , multiplicado por el espesor h .

El resultado de este despeje equivaldría a la masa, m , de un imán y de una placa; para obtener la total, debe ser multiplicada por la cantidad de placas e imanes que se utilizaron N , demostrado por

$$M_{total} = m \times N \quad (61)$$

Las placas deben poseer un espesor mayor al de los imanes, debido al ancho de la bobina para que el cambio en el flujo magnético sea más rápido, y por consecuencia haya más voltaje, como se muestra en la figura 37.

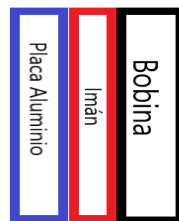


Figura 37. Diagrama de placa e imanes
Fuente: Elaboración propia.

Por cada placa se coloca una bobina, debido a que cuando el sismo actúa sobre el mecanismo, el resorte desplazará la placa dentro de ella, y por consiguiente ocurrirá una reacción en cadena, obligando al imán a pasar a través de la bobina y quedando al frente de ella, como se muestra en la figura 38.

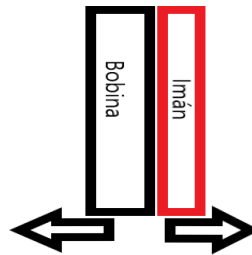


Figura 38. Movimiento de las placas y los imanes
Fuente: Elaboración propia.

3.1.3.7. Bobina

Para aplicar el principio de la Ley de Faraday, el cual dicta que: un cambio en el flujo magnético $d\Phi_B$ en un diferencial de tiempo dt producirá una fuerza electromotriz ε (Universidad Nacional de La Plata, 2016), se muestra por

$$\varepsilon = -\frac{d\Phi_B}{dt} \quad (62)$$

En el caso de utilizar un embobinado para producir este voltaje, la expresión anterior se multiplicará por el número de vueltas N , demostrado por

$$\varepsilon = -N \frac{d\Phi_B}{dt} \quad (63)$$

El símbolo negativo, en esta expresión, indica el sentido del voltaje producido.

La bobina utilizada posee dimensiones vistas en el mercado; su única personalización es el diámetro interno, debido a los diámetros de las placas e imanes, y también por la presencia de una corredera que evitará la fricción en el desplazamiento.

El campo magnético, producido por esta bobina con sus datos, se representa por

$$B = \frac{\mu \times N \times I}{D_i} \quad (64)$$

La constante μ de la expresión es dada directamente, y posee las unidades de teslas entre amperios, esto multiplicado por el número de vueltas N , y por la corriente I que posee la bobina según el tipo de alambre dado por la tabla AWG, dividido entre el diámetro interno D_i .

El campo magnético producido se expresará en teslas; en este mecanismo el imán poseerá un campo magnético mayor al de la bobina, ya que por sí mismas estas no generan grandes campos.

3.1.3.8. Generación eléctrica

Este mecanismo generará una fuerza electromotriz, para la producción en Watts, por medio de

$$P = V \times I \quad (65)$$

La potencia eléctrica P sería igual al producto del voltaje, o en este caso la fuerza electromotriz V producida por el cambio magnético en el tiempo, basado en el principio de la Ley de Faraday, multiplicado por la corriente I del cable de la bobina según su calibre, basado en la tabla AWG. Este valor se multiplica por la cantidad de sismos diarios y anuales N para saber la producción eléctrica del sistema, P_e , según su magnitud de registro, la cual se representa de la forma:

$$P_e = P \times N \quad (66)$$

3.2. Aplicación del modelo matemático de generación

Por medio de un análisis de datos del OVSICORI (2020), se utilizan los sismos de magnitudes de 1,0 Mw a 4,9 Mw. Según Protti (2020), estos son los que poseen mayor frecuencia de aparición en el territorio de Costa Rica. El sistema de

diseñado soportará estas magnitudes en los tipos de roca caliza y basalto, presentes en la geología del país.

3.2.1. Fuerzas sísmicas

Se calculan mediante la conversión de ergios a joules, ecuación 21, los cuales poseen un valor de 10000000 J; cada magnitud poseerá una fuerza diferente dependiendo de su profundidad, esto debido a que, a menor distancia de ocurrencia, sus pérdidas no serán significativas, pero si uno de estos sismos, con magnitudes entre 1,0 Mw y 2,9 Mw, ocurre en distancias superiores de los cinco kilómetros en adelante, la población no los percibirá, tal como se muestra en la tabla 8. La distancia máxima utilizada es tomando referencia del Reporte anual de sismología (2020) de Costa Rica del OVSICORI.

Tabla 8. Fuerzas sísmicas hasta los 20 kilómetros

Distancias hasta 20 kilómetros	
Magnitudes (Mw)	Fuerzas promedios (N)
1 a 1,9	$2,66 \times 10^3$
2 a 2,9	$8,43 \times 10^4$
3 a 3,9	$2,66 \times 10^6$
4 a 4,9	$8,43 \times 10^7$

Fuente: Elaboración propia.

3.2.2. Potencias sísmicas

La tabla 8 proporciona la fuerza promedio entre los rangos de las magnitudes en estudio, multiplicadas por las velocidades de las ondas secundarias en el tipo de roca caliza y basalto; estas poseen valores de 1300 metros entre segundo y 3200 metros entre segundo. (Universidad Nacional de Colombia, 2012). Ubicadas en la tabla 3 del marco teórico, dan la potencia inicial, y se utilizan las ondas secundarias por la razón de que estas componen el 90% de las primarias, y poseen la característica de que son superficiales.

El comportamiento en estos dos tipos de rocas se muestra en la tabla 9.

Tabla 9. Potencia inicial según el tipo de roca

Magnitudes (Mw)	Potencia Inicial	
	Caliza	Basalto
1 a 1,9	$3,60 \times 10^6$	$8,53 \times 10^6$
2 a 2,9	$1,14 \times 10^8$	$2,70 \times 10^8$
3 a 3,9	$3,60 \times 10^9$	$8,53 \times 10^9$
4 a 4,9	$1,14 \times 10^{11}$	$2,70 \times 10^{11}$

Fuente: Elaboración propia.

Al aplicar la ecuación 24, se calcula el área de la esfera, que es a partir de la posición del mecanismo, en cuyo caso este se localiza enterrado a cuatro kilómetros de profundidad. Con base en este dato en las minas con mayor extensión en el mundo, a partir de esta posición soportarán sismos con hipocentros de diez kilómetros, y el área de la esfera posee un valor de $1,27 \times 10^9$ metros cuadrados.

El cambio en la potencia de llegada depende de la inclinación del hipocentro con respecto al mecanismo, como se muestra en la figura 39.

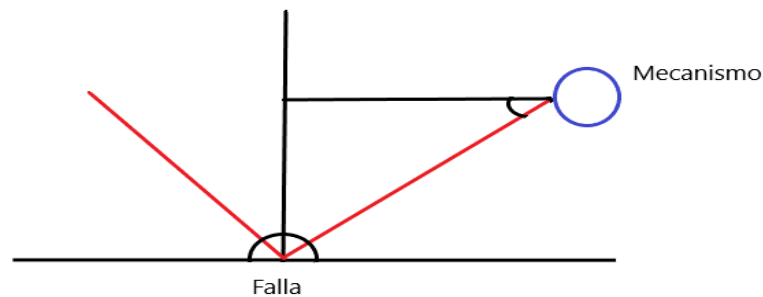


Figura 39. Diagrama de la potencia de llegada al mecanismo
Fuente: Elaboración propia.

El área del mecanismo utilizada para los sismos entre rangos de 1,0 Mw a 2,9 Mw corresponde a una circunferencia de 85 centímetros de radio, debido a la poca sensibilidad en estas magnitudes.

Según el tipo de roca, sus resultados se muestran en la tabla 10.

Tabla 10. Potencia final en sismos de 1,0 a 2,9 Mw

Magnitudes (Mw)	Potencia final promedio	
	Caliza (W)	Basalto (W)
1 a 1,9	0,042	0,099
2 a 2,9	0,132	0,313

Fuente: Elaboración propia.

Para valores superiores, el área tomada será la de las placas de aluminio en un radio de 5 centímetros, como se muestra en la tabla 11.

Tabla 11. Potencia final en sismos de 3 a 4,9 Mw

Magnitudes (Mw)	Potencia final promedio	
	Potencia final caliza (W)	Potencia final basalto (W)
3 a 3,9	0,0140	0,0340
4 a 4,9	0,109	0,257

Fuente: Elaboración propia.

3.2.3. Comportamiento y características de los resortes

Mediante el cálculo de trabajo realizado del sismo al momento de llegar al mecanismo, tendrá comportamientos distintos, dependiendo del tipo de roca en que la onda sísmica se desplace, usando la ecuación 27, como se muestra en la tabla.

Tabla 12. Trabajos del sismo en caliza y basalto

Magnitudes (Mw)	Trabajo del sismo	
	Caliza (J)	Basalto (J)
1 a 1,9	0,0313	0,0307
2 a 2,9	0,990	0,970
3 a 3,9	0,1080	0,1060
4 a 4,9	2,00	2,00

Fuente: Elaboración propia.

Por medio de la ecuación 35, se calcula el desplazamiento y compresión de los resortes, dependiendo de la magnitud, como se muestra en la tabla 13.

Tabla 13. Desplazamientos de los resortes de acuerdo con la magnitud

Comportamiento de los resortes en roca tipo caliza y basalto				
Rangos de magnitudes (Mw)	Desplazamiento de resortes 1 y 2 caliza		Desplazamiento de resortes 1 y 2 basalto	
	Final Resorte 1	Final Resorte 2	Final Resorte 1	Final Resorte 2
	(m)	(m)	(m)	(m)
1 a 1,9	0,110	0,0900	0,110	0,0900
2 a 2,9	0,156	0,044	0,155	0,045
3 a 3,9	0,118	0,082	0,118	0,082
4 a 4,9	0,180	0,0800	0,180	0,0800

Fuente: Elaboración propia.

La fuerza elástica utilizada para el diseño de los resortes utilizados para los microsismos equivale al desplazamiento hasta su longitud mínima, que actuará como una carga sobre el resorte 2 y sobre su homónimo; esta equivale para el resorte 1 35 newton de carga, y el resorte 2 soportará hasta 27 newton. Sus fuerzas son distintas, debido a la constante elástica de cada uno. Las características de los resortes se muestran en la tabla 14.

Tabla 14. Datos de los resortes para magnitudes de 1,0 a 2,9 Mw

Resortes para microsismos		
Características	Resorte 1	Resorte 2
Material	A227	A227
K (N/m)	291	334
Longitud libre (cm)	10,0	10,0
Longitud mínima (cm)	2,54	2,54
Carga máxima (N)	35,0	27,0
Calibre	16	17
Diámetro de orificio (cm)	1,30	1,30
Número de vueltas	9	8
Vueltas totales	11	10
Diámetro exterior (cm)	1,40	1,40

Fuente: Elaboración propia.

Para los sismos de 4,0 a 4,9 Mw, sus resortes tendrán constantes elásticas k más altas, debido a la fuerza expulsada por el evento. Sus datos se muestran en la tabla 15.

Tabla 15. Resortes para sismos de 4,0 a 4,9 Mw

Resortes para sismos		
Características	Resorte 1	Resorte 2
Material	A227	A227
K (N/m)	700	848
Longitud libre (cm)	13,0	13,0
Longitud mínima (cm)	2,54	2,54
Carga máxima (N)	45,0	40,0
Calibre	15	16
Diámetro de orificio (cm)	1,50	1,14
Número de vueltas	7	11
Vueltas Totales	9	13
Diámetro exterior (cm)	1,68	1,30

Fuente: Elaboración propia.

Estos se diseñaron, debido a que, si se utilizan los mostrados en la tabla 14, ponen en riesgo la integridad del sistema.

3.2.4. Placas, imanes y tornillo

Para este mecanismo de energía limpia se utilizan imanes de neodimio, grado N52. Estos poseen la característica de ser los magnetos más poderosos en el mercado, pues tienen la capacidad de levantar 10 kg, y su temperatura de operación es de 80 grados centígrados, pero en casos específicos se pueden fabricar para soportar entre 100 y 120 grados centígrados. Como este mecanismo se basa en el principio de la Ley de Faraday, es necesaria una fuente de gran cantidad de campo magnético para la generación de una fuerza electromotriz. Los magnetos de este grado poseen un campo magnético de entre 14800 y 15000 gauss (Centro Magnético, 2016), 7000 kilogramos entre metro cúbico (Lenntech, 2009); las dimensiones del imán son de diez centímetros de diámetro y dos centímetros de espesor, como se muestra en la figura 40.



Figura 40. Imán de neodimio.

Fuente: Imanes de neodimio soluciones. (2018).

Estos estarán sujetos por placas de aluminio intercaladas, poseen el mismo diámetro, pero con un espesor de cuatro centímetros. El aluminio se escogió, debido a que el mecanismo para microsismos se localiza bajo la superficie y su temperatura no afectaría a estas placas, a causa de que puede soportar temperaturas superiores a los 600 grados centígrados, y su densidad corresponde a 2700 kilogramos entre metro cúbico. (Lenntech, 2009). En conjunto, las 25 placas y 24 imanes pesarán 46 kilogramos.

Estas placas de aluminio se sujetan a la corredera, la cual posee 1,50 metros de largo y dos centímetros de espesor, por medio de un tornillo, el cual está diseñado de grado SAE número 7 para soportar 4450 newtons; en este diseño se supuso que corresponde a $7,75 \times 10^7$ pascales, y el módulo de elasticidad del material escogido en este caso, el aluminio, corresponde a 207 megapascales. (Mott, 2006).

Se destaca que, para el grado escogido, su esfuerzo de prueba corresponde a 7,2 megapascales y su cabeza posee forma hexagonal; su área de torsión posee un valor de 0,685 centímetros cuadrados y de paso estándar 60°. (Mott, 2006).

El esfuerzo máximo que soportará el tornillo será equivalente a 64 kilopascales, y su dimensión es de tres centímetros.

3.2.5. Bobina

Esta pieza se basa en una encontrada en el mercado con diámetro de alambre de 2,0 milímetros. Según la tabla AWG, este tipo es para corrientes de 5,2 amperios.

Su diámetro interno es equivalente a 14 centímetros. Debido a la presencia de dos correderas, una en la base y otra en la parte superior dentro de la bobina, el ancho máximo de esta será equivalente al mismo de las placas de aluminio, para que la frecuencia de oscilación del imán al entrar y salir de esta sea elevada. Su inductancia tendrá un valor de 200 uH, y la cantidad de vueltas que posee serán 2000.

El campo magnético producido por la bobina se calcula mediante la ecuación 64, donde su valor será igual a 0,030 teslas.

3.2.6. Generación eléctrica

Por medio de la ecuación 57, y con los datos del desplazamiento de los resortes dependiendo de la magnitud, sus velocidades se muestran en la tabla 16.

Tabla 16. Velocidades dependiendo de la magnitud

Velocidades de los resortes en caliza y basalto		
Rangos de magnitudes (Mw)	Caliza (m/s)	Basalto (m/s)
1 a 1,9	0,370	0,370
2 a 2,9	0,410	0,408
3 a 3,9	0,370	0,370
4 a 4,9	0,780	0,780

Fuente: Elaboración propia.

Su frecuencia de oscilación, ecuación 58, en conjunto con sus tiempos, se muestran en la tabla 17.

Tabla 17. Frecuencias y tiempos según la magnitud

Frecuencias y tiempos				
Rangos de magnitudes (Mw)	Caliza		Basalto	
	Frecuencia (Hz)	Tiempo (s)	Frecuencia (Hz)	Tiempo (s)
1 a 1,9	0,250	4,00	0,250	4,00
2 a 2,9	0,270	3,65	0,272	3,67
3 a 3,9	0,250	4,00	0,250	4,00
4 a 4,9	0,520	2,00	0,520	2,00

Fuente: Elaboración propia.

La generación por medio de la Ley de Faraday en voltios y watts se muestra en la tabla 18.

Tabla 18. Generación eléctrica según la magnitud

Generación eléctrica				
Magnitudes	Caliza		Basalto	
	F.E.M. (V)	Potencia (W)	F.E.M. (V)	Potencia (W)
1 a 1,9	735	3822	735	3822
2 a 2,9	805	4186	801	4165,2
3 a 3,9	735	3822	735	3822
4 a 4,9	1470	7644	1470	7644

Fuente: Elaboración propia.

La producción anual, de acuerdo con la frecuencia de aparición de las magnitudes en estudio, del año 2020, se muestra en la tabla 19.

Tabla 19. Producción eléctrica en Costa Rica en el año 2020

Generación eléctrica en Costa Rica en el 2020					
Magnitudes	Cantidad de sismos	Caliza		Basalto	
		Diario (W)	Anual (W)	Diario (W)	Anual (W)
1 a 1,9	5513	$5,77 \times 10^4$	$2,11 \times 10^7$	$5,77 \times 10^4$	$2,11 \times 10^7$
2 a 2,9	4446	$5,10 \times 10^4$	$1,86 \times 10^7$	$5,07 \times 10^4$	$1,85 \times 10^7$
3 a 3,9	852	$8,92 \times 10^3$	$3,26 \times 10^6$	$8,92 \times 10^3$	$3,26 \times 10^6$
4 a 4,9	114	$2,39 \times 10^3$	$8,71 \times 10^5$	$2,39 \times 10^3$	$8,71 \times 10^5$

Fuente: Elaboración propia.

Si se realiza una sumatoria de la generación entre los dos tipos de roca en estudio, Costa Rica en el 2020 generó 87,5 megavatios de electricidad, provenientes de las ondas sísmicas.

3.2.7. Costos

Al tomar como referencia los costos del mercado de los componentes que integran el sistema, estos se muestran en la tabla 20.

El costo de instalación en el caso de los microsismos se elimina, debido a que se pueden utilizar minas o ductos volcánicos extintos para su ubicación, y para los rangos de 4,0 a 4,9 Mw se pueden colocar superficialmente.

Tabla 20. Costo del mecanismo en colones

Costos mecanismo (colones)	
Resortes 1 microsismo	629 059
Resortes 2 microsismos	679 563
Imanes	456 000
Barra de aluminio	472 000
Bobinas	14 808
Corredera	185 760
Tornillos	19 200
Resortes 3	894 174
Resortes 4	875 000
Total	4 225 564

Fuente: Elaboración propia.

El costo en dólares, dependiendo del tipo de cambio, sería equivalente a 7000 dólares (Banco Central de Costa Rica, 2021). En referencia a un proyecto de energía limpia como el del Reventazón, este representaría un gasto equivalente al poner dos millones de sistemas de generación sísmica en el país.

3.3. Diseño de piezas en SolidWorks

Por medio de un programa de diseño, se les dio forma a las partes que componen el sistema de generación, cuyos planos están adjuntados en el anexo 2, y estas son:

Bobina, como se muestra en la figura 41.



Figura 41. Bobina del sistema
Fuente: Elaboración propia.

Corredera parte de arriba (figura 42), junto con la parte de abajo (figura 43).



Figura 42. Corredera parte de arriba
Fuente: Elaboración propia.

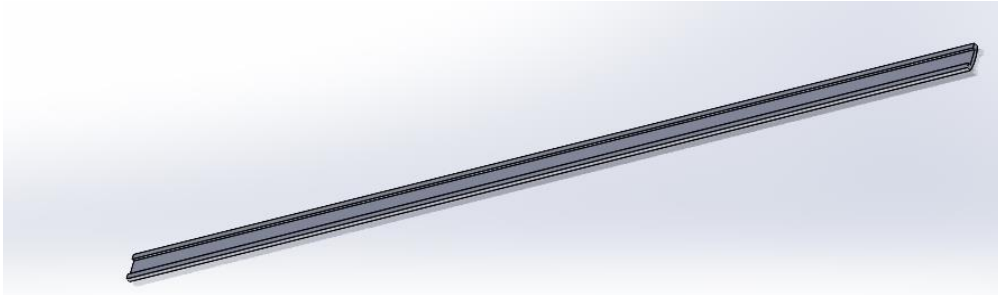


Figura 43. Corredera parte de abajo
Fuente: Elaboración propia.

Placas de aluminio, como se observa en la figura 44: poseen dos orificios con rosca, debido a que están ancladas a la corredera para evitar el movimiento de los imanes, y provocar un cambio en el flujo magnético.

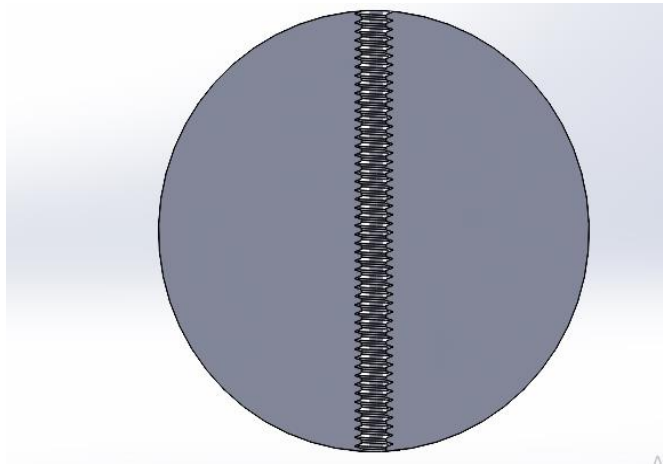


Figura 44. Placa de aluminio
Fuente: Elaboración propia.

Los resortes en este caso son dos pares, uno para los microsismos, de acuerdo con las figuras 45 y figura 46.

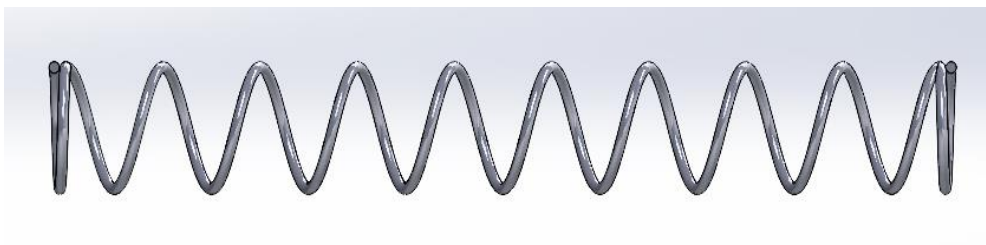


Figura 45. Resorte 1 para microsismos
Fuente: Elaboración propia.

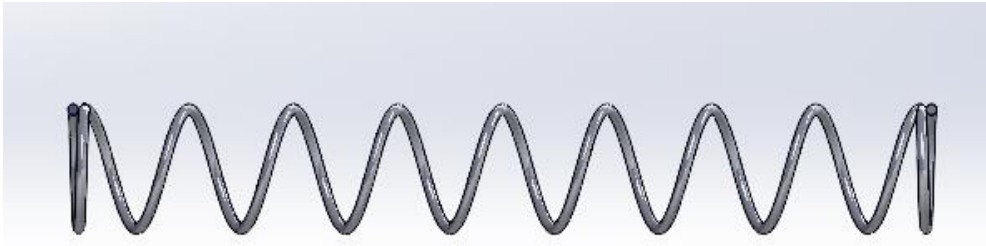


Figura 46. Resorte 2 para microsismos
Fuente: Elaboración propia.

El otro par de resortes es para los eventos de magnitudes 4 hasta 4,9 Mw, según las figuras 47 y 48.

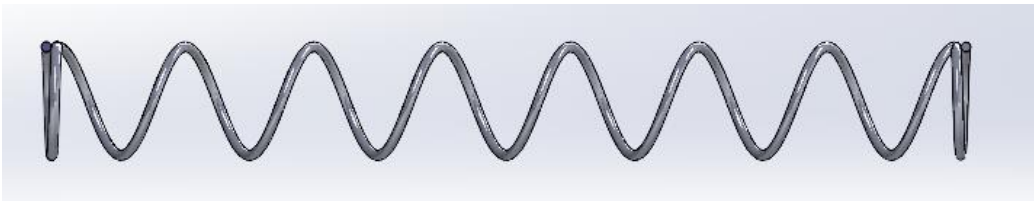


Figura 47. Resorte 1 para sismos de 4 grados
Fuente: Elaboración propia.

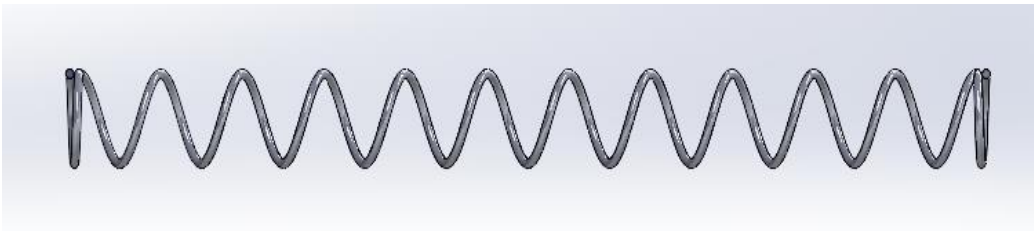


Figura 48. Resorte 2 para sismos de 4 grados
Fuente: Elaboración propia.

El tornillo que sujeta las placas a la corredera se muestra en la figura 48.



Figura 49. Tornillo del sistema
Fuente: Elaboración propia.

El prototipo totalmente ensamblado se muestra en la figura 50.

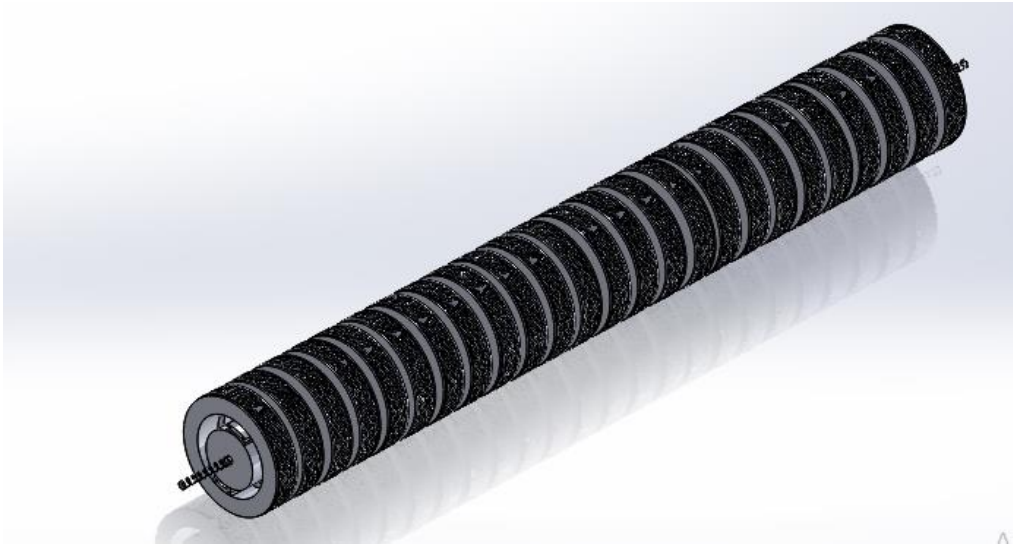


Figura 50. Mecanismo completo
Fuente: Elaboración propia.

El movimiento del sistema está en las figuras 51 y 52.



Figura 51. Movimiento del sistema en compresión
Fuente: Elaboración propia.

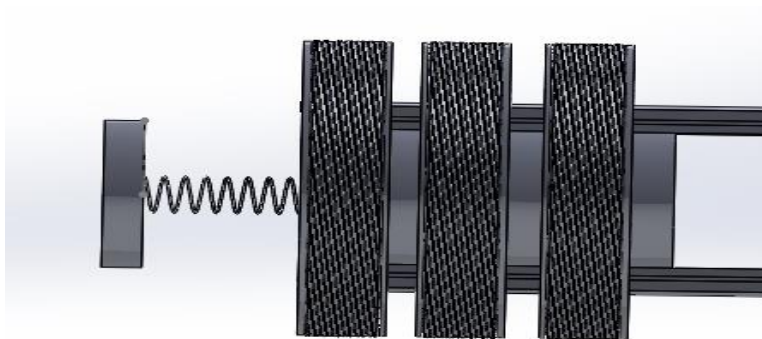


Figura 52. Movimiento del sistema en estiramiento
Fuente: Elaboración propia.

Los tornillos conectados a las placas en conjunto con la parte superior de la corredera se muestran en la figura 53.

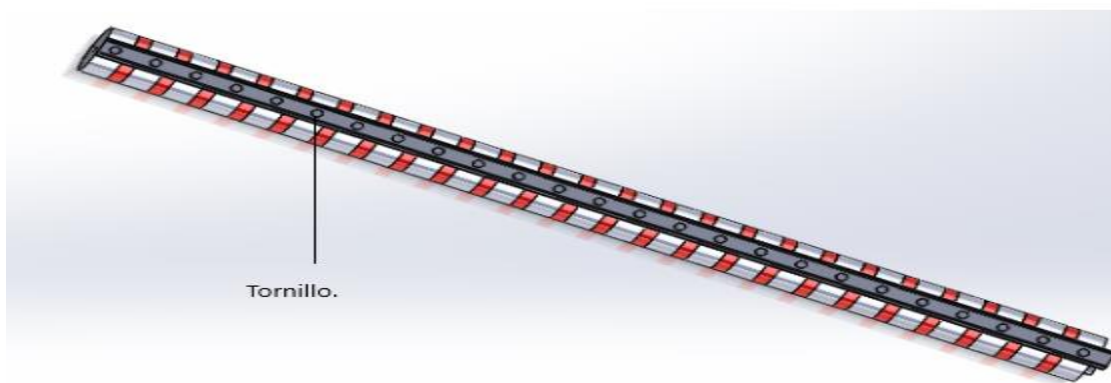


Figura 53. Placas e imanes atornillados a la corredera.
Fuente: Elaboración propia.

La posición del mecanismo al momento de un evento sísmico se muestra en la figura 54.



Figura 54. Posición del mecanismo.
Fuente: Red Sismológica Nacional (2014).

3.4. Análisis de resultados

Con base en el modelo con ciertas condiciones analizadas y otras predispuestas para trabajos futuros, el mecanismo diseñado generará la misma cantidad de voltaje, tanto en caliza como en basalto, debido a que estos solo afectan el tiempo de llegada de las ondas mecánicas sísmicas. El área para los microsismos debe ser de las dimensiones mencionadas en la sección 3.1.2., a causa del casi nulo movimiento de los resortes al impacto sísmico, para magnitudes de 3,0 a 4,9 Mw. Esta área puede ser la superficie del imán, como consecuencia de que las fuerzas sísmicas por cada magnitud aumentan diez veces su poder. Como el mecanismo para los microsismos debe poseer un área para canalizar la potencia sísmica, y con respecto a los desplazamientos en referencia a las magnitudes 4,0 a 4,9 Mw, estos se moverán un máximo de cinco centímetros.

Los resortes se moverán debido a la conversión de energía potencial a cinética; las cargas máximas de cada uno se basan en el desplazamiento y en sus constantes elásticas. El resorte 1 para los microsismos y hasta la magnitud 3,9, soporta una fuerza máxima equivalente a 35 newtons, ya que el resorte 2 en este modelo, con su constante elástica al momento del retorno a su longitud libre, ejercerá una carga equivalente a 30 newtons. El resorte 2 tiene una capacidad de 27 newtons, por la fuerza aplicada del resorte 1 con su constante elástica al momento de su desplazamiento.

En el caso de los sismos en rangos de 4,0 a 4,9 Mw, el resorte 1 soporta hasta 45 newtons, a causa de la gran liberación de fuerza en este parámetro, y el resorte 2 resiste a 40 newtons por la misma condición.

Las constantes elásticas de los resortes para los sismos de 4,0 a 4,9 Mw serán mayores a las utilizadas en los microsismos, porque ponen en riesgo el funcionamiento del mecanismo, pues si se utilizan los valores para magnitudes pequeñas, la masa se asemejará a un proyectil, y las piezas del sistema no soportarán. Los resortes utilizados para los microsismos poseen constantes elásticas más bajas, debido a la sensibilidad del mecanismo con respecto a estas magnitudes.

El tornillo soportará la sumatoria de fuerzas elásticas de ambos resortes, y su comportamiento al momento de un sismo será sujetar las placas e imanes. En conjunto con la corredera, esta posee una forma circular basada en las placas e imanes, para evitar un movimiento giratorio en este producto de la gran agitación del medio según su magnitud. La otra parte de la corredera se acoplará a lo interno de la bobina basada en su diámetro. Esta posee el espesor de las placas de aluminio, para que la generación eléctrica basada en la alta frecuencia de oscilación sea mayor; si se coloca una medida inferior o superior puede comprometer el funcionamiento del sistema.

Este mecanismo está diseñado para ubicarse bajo la superficie, aproximadamente 4000 metros enterrado para magnitudes pequeñas; se ubicará a 1000 metros lineales con respecto a la falla, para que la potencia de llegada sea percibida y mueva el mecanismo.

El posicionamiento para los sismos de 4,0 a 4,9 será mayor, ya que es necesario, por la integridad del sistema ante la gran liberación de energía, que esté ubicado a 5000 metros lineales de la falla. Para el funcionamiento correcto del prototipo, es necesario que existan pérdidas con respecto a la distancia del epicentro. Estas son requeridas, para que el sistema intercepte la potencia emanada por el sismo, sin sufrir ningún tipo de fallo.

Se utiliza el principio de la Ley de Faraday, en conjunto con un sistema oscilatorio para que se catalogue como una fuente de energía limpia. Sus bobinas poseen un campo de 0,03 teslas y 2000 vueltas de alambre tipo calibre 16; estas tienen un diámetro interno de 14 centímetros, para que se posicionen las correderas, los imanes y las placas que producirán una fuerza electromotriz ante el cambio en el flujo magnético.

Para la eficacia de este sistema se utilizan imanes de neodimio calibre N52, por su gran campo magnético.

3.5. Conclusiones

En este trabajo se ha presentado un modelo para el cálculo de la energía de un sismo, y el diseño de un mecanismo que permita el aprovechamiento de esta energía para la producción de energía eléctrica. Primero se describió el fundamento cinético de la sismología, incluyendo su historia, variables físicas, escalas y representaciones gráficas del campo en esta rama y, con base en lo investigado, se postula un mecanismo con los criterios que debe tener su dimensionamiento.

Finalmente, se seleccionó un rango de magnitudes de los sismos, para diseñar un sistema en particular y verificar el modelo matemático propuesto. Los resultados de este ejemplo numérico arrojaron una generación anual de 87,5 megavatios en Costa Rica.

Una vez terminado el trabajo, se obtienen algunas conclusiones:

1. La generación de electricidad, mediante los denominados microsismos, sí es posible, debido al análisis de fuerzas y variables de velocidad según el tipo de roca que predomina en Costa Rica.
2. El mecanismo diseñado soportará hasta sismos de 4,9 Mw, a causa de la frecuencia de aparición de este rango a nivel nacional, y para magnitudes superiores a 5,0 Mw se requiere otro tipo de estrategia en posicionamiento y análisis físicos, debido a su poca presencia en el periodo de un año.
3. Con base en el punto anterior, este mecanismo, para los eventos mencionados, será rentable en zonas como Alaska, Oceanía, Japón, por mencionar algunas, y en eventos recientes de Europa Central, por sus magnitudes altas.
4. Las dimensiones de este sistema lo hacen transportable a cualquier parte del mundo, y su instalación les dan gran acceso a comunidades carentes de energía eléctrica en cualquier parte del mundo.
5. El costo de fabricación de este prototipo es bajo, en comparación con otros proyectos de generación eléctrica en Costa Rica, ahorrando en infraestructura, mano de obra y espacio.

6. Este mecanismo no le produce ningún tipo de contaminación al ambiente, y su producción e instalación no ejercen un impacto negativo que puede desequilibrar el ecosistema.

Para trabajos futuros, el compartimiento que llevará el sistema será analizado, debido a la gran variedad de tipos de rocas, así como sus variables físicas y comportamientos cuando ocurre un sismo. Al depender de la zona geográfica a nivel mundial, su eficiencia y eficacia será evaluada de acuerdo de su localización. Para la distribución de energía eléctrica por medio de este método, se deberán estudiar las condiciones para transmitirla, por medio de un suelo de tipo rocoso que no se vea afectado por los sismos.

Se analizará pérdidas relacionadas al calor dependiendo de la profundidad y espacio donde se ubique el sistema.

3.6. Recomendaciones.

Para la instalación del prototipo, es necesario el diseño de una estructura externa tipo contenedor, para evitar que las fuerzas sísmicas lo dañen al momento de un evento, estas dependerán del tipo de roca que componga la zona geográfica donde se posicione el sistema., Para Costa Rica, este sistema puede estar ubicado en las regiones de Guanacaste y Zona Sur, debido a la presencia de caliza y basalto.

Si el mecanismo se instala en otro país, se debe realizar un estudio de los tipos de roca que componen ese territorio, para su correcto funcionamiento.

Referencias bibliográficas.

Banco Central de Costa Rica. (13 de julio de 2021). *Tipo de cambio*. Recuperado de:

<https://gee.bccr.fi.cr/indicadoreseconomicos/Cuadros/frmVerCatCuadro.aspx?idioma=1&CodCuadro=%20400>

Budynas, R., y Nisbett, K. (2015). Resortes mecánicos. En *Diseño en ingeniería mecánica de Shigley*. México: McGraw-Hill Education.

Cabrera, R. (enero de 2009). *Qué son las ondas periódicas*. Recuperado de: https://ricuti.com.ar/no_me_salén/ondas/Ap_ond_02.html

Centro Magnético. (2016). *Imanes*. Recuperado de: <https://centromagnetico.com/imanés-iman-imanés-magnéticos-imanés-de-neodimio-imanés-de-ferrita/>

Colino Martínez, A., y Caro, R. (2010). Sistemas de generación. En *La nueva geopolítica de la energía* (pp. 35-54). España: Ministerio de Defensa, Instituto Español de Estudios Estratégicos.

Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. (2019). *¿Qué es el Acuerdo de París?* Recuperado de: <https://unfccc.int/es/process-and-meetings/the-paris-agreement/que-es-el-acuerdo-de-paris>

Corty, F., Rodríguez, S., Magallon, R., Lauterio, G., y Tabares, J. (24 de febrero de 2015). *Ondas longitudinales y ondas transversales*. Recuperado de: <https://fisicabordas.tumblr.com/>

Day, M., y Capri, A. (12 de setiembre de 2013). *Densidad*. Recuperado de: <https://www.visionlearning.com/es/library/CienciasGenerales/3/Densidad/37>

Forbes. (29 de julio de 2019). *Se acabaron los recursos renovables del planeta para 2019*. Recuperado de: <https://www.forbes.com.mx/se-acabaron-los-recursos-renovables-del-planeta-para-2019/>

Godsmark, K. (agosto de 2012). *John Milne*. Recuperado de: <http://www.isc.ac.uk/about/history/milne/>

Gómez León, D. (2010). *Análisis de los Generadores de Accionamiento Directo en Tecnología Undimotriz*. Sevilla: Universidad de Sevilla. Recuperado de: <https://biblus.us.es/bibing/proyectos/abreproy/4994/fichero/5.An%C3%A1lisis+de+los+Generadores+de+Accionamiento+Directo.pdf>

González Cubero, J. (2011). *Análisis de requisitos eléctricos para el diseño de un parque offshore de energía undimotriz*. Sevilla: Universidad de Sevilla. Recuperado de:

<https://biblus.us.es/bibing/proyectos/abreproy/4991/fichero/4+Sistemas+de+generaci%C3%B3n.pdf>

Imanes de neodimio soluciones. (17 de Diciembre de 2018). *Imán de neodimio N52*. Recuperado de: <https://imanesneodimiosoluciones.com/producto/iman-neodimio-100mm-x-20mm-gigante-n52-xto/>

Instituto Costarricense de Electricidad. (2015). *Costa Rica: Energía geotermica. Modelo propio de sostenibilidad*. Instituto Costarricense de electricidad. Recuperado de:

http://www.minem.gob.pe/minem/archivos/file/DGEE/SEMINARIOGEOTERMIA/ENERG%C3%83_A%20GEOTERMICA-%20COSTA%20RICA.pdf

Instituto Costarricense de Turismo. (2020). *Costa Rica cierra 2019 con 99% en generación eléctrica renovable*. Recuperado de: <https://www.ict.go.cr/es/noticias-destacadas-2/1626-costa-rica-cierra-2019-con-99-en-generaci%C3%B3n-el%C3%A9ctrica-renovable.html>

Instituto de Nacional de Prevención Sísmica.(13 de diciembre de 1991).*Energía del terremoto*. San Juan: Instituto de Nacional de Prevención Sísmica. Recuperado de:

<http://contenidos.inpres.gov.ar/docs/Energ%C3%ADa%20del%20terremoto.pdf>

- Khan Academy. (2017). *¿Qué es la Ley de Faraday?* Recuperado de: <https://es.khanacademy.org/science/physics/magnetic-forces-and-magnetic-fields/magnetic-flux-faradays-law/a/what-is-faradays-law>
- Lenntech. (22 de setiembre de 2009). *Aluminio*. Recuperado de: <https://www.lenntech.es/periodica/elementos/al.htm>
- Lenntech. (24 de setiembre de 2009). *Neodimio*. Recuperado de: <https://www.lenntech.es/periodica/elementos/nd.htm>
- López Cotelo, V. (24 de octubre de 2011). *Sismógrafo*. Recuperado de: <https://tectonica.archi/articulos/sismografo/>
- López, A. (19 de octubre de 2020). *Así fue el terremoto de Alaska que provocó un tsunami con olas de 67 metros de altura*. Recuperado de: <https://www.muyinteresante.com.mx/medio-ambiente/terremoto-de-alaska-1964-tsunami-mas-devastador-de-la-historia/>
- Mata Chinchilla, R., Vásquez Morera, A., y Rosales Ibarra, A. (2012). *El mapa de suelos de Costa Rica con la leyenda WRB*. Recuperado de: <http://www.mag.go.cr/bibliotecavirtual/av-1630.pdf>
- Mott, R. (2006). Sujetadores. En *Diseño de elementos de maquinas*. México: Pearson.
- Norton, R. (2011). Tornillo y Sujetadores. En *Diseño de elementos de maquinas enfoque integrado*. México: Pearson.
- Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Costa Rica. (2020). Reporte anual de sismología. Heredia: Universidad Nacional.
- O'Connor, J.J y Robertson, E.F. (diciembre de 2003). *Zhang Heng*. Recuperado de: https://mathshistory.st-andrews.ac.uk/Biographies/Zhang_Heng/
- Pearce Willimas, L. (2021). Michael Faraday, Físico y químico británico. *Enciclopedia Británica*. Recuperado de: <https://www.britannica.com/biography/Michael-Faraday>

Peláez, J. A. (5 de junio de 2011). Sobre las escalas de magnitud. *RACO (Revistas Catalanas con Acceso Abierto)*. Recuperado de:

<https://www.raco.cat/index.php/ECT/article/viewFile/257499/344605>

Rao, S. (2012). Movimiento armónico .En *Vibraciones mecánicas*. México: Pearson.

Red Sismologica Nacional. (13 de agosto de 2014). Recuperado de <https://rsn.ucr.ac.cr/documentos/educativos/sismologia/2329-que-son-el-hipocentro-y-el-epicentro>

Resnick, R., Halliday, D., & Krane, K. (1993). Oscilaciones. En *Física 1*. México: Editorial Continental.

Rojas, A. (20 de diciembre de 2019). *Ondas sísmicas*. Recuperado de: <https://post.geoxnet.com/glossary/ondas-sismicas/>

Seabased. (13 de noviembre de 2020). *Wave power parks*. Recuperado de: <https://seabased.com/seabased-wave-power-parks>

Scientific American. (23 de julio de 2011). *¿Podríamos aprovechar la energía de los terremotos? No es probable*. Recuperado de:

<https://www.scientificamerican.com/article/could-we-harness-energy-from-earthquakes/>

Universidad de Antioquia. (2001). *Ejercicios de oscilaciones*. Recuperado de: http://docencia.udea.edu.co/regionalizacion/irs404/practicas/ejercicios_oscilaciones.html

Universidad de La Coruña. (29 de octubre de 2003). *¿Qué es un terremoto?* Recuperado de:

https://www.udc.es/dep/dtcon/estructuras/ETSAC/Investigacion/Terremotos/QUE_ES.htm

Universidad de La Coruña. (2003). *Ondas sísmicas*. Recuperado de:
https://www.udc.es/dep/dtcon/estructuras/ETSAC/Investigacion/Terremotos/ondas_s%EDsmicas.htm

Universidad de Costa Rica. (31 de Mayo de 2011). *El Sismógrafo*. Recuperado de:
<http://www.lis.ucr.ac.cr/index.php?id=10>

Universidad de Leicester. (01 de agosto de 2016). *La investigación de los estudiantes examina cómo generar energía durante los terremotos*. Recuperado de:

<https://www2.le.ac.uk/offices/press/press-releases/2016/july/student-research-examines-how-to-generate-energy-during-earthquakes>

Universidad de Puerto Rico-Recinto de Mayagüez. (2020). *Amplificación de ondas sísmicas*. Mayagüez: Universidad de Puerto Rico-Recinto de Mayagüez. Recuperado de:

<https://www.uprm.edu/riseup/wpcontent/uploads/sites/223/2020/02/Amplificaci%C3%B3n-de-las-ondas.pdf>

Universidad Estatal de Georgia. (2017). *Ondas estacionarias*. Recuperado de:
<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/Waves/standw.html>

Universidad Nacional de Colombia. (7 de agosto de 2012). *Metodos geofísicos*. Recuperado de:

<https://www.medellin.unal.edu.co/~rrodriguez/geologia/sismica.htm>

Universidad Nacional de la Plata. (2016). *Electromagnetismo*. Buenos Aires: Universidad Nacional de la Plata. Recuperado de:

<https://catedra.ing.unlp.edu.ar/electrotecnia/cys/DI/electromagnetismo.pdf>

Vizconde Campos, A. (2004). *Evaluación de la vulnerabilidad sísmica de un edificio existente: Clínica San Miguel, Piura*. Piura, España: Universidad de Piura. Recuperado de:

https://pirhua.udep.edu.pe/bitstream/handle/11042/1367/ICI_120.pdf?sequence=4&isAllowed=y

Xunta de Galicia. (2017). *Ondas en medios elásticos*. Recuperado de: <https://www.edu.xunta.gal/centros/zonapontevedrad6/system/files/Op%20Sec%20t%2018%20ondas%20y%20energia.pdf>

Young, H., y Freeman, R. (2009). Ondas mecánicas. En *Física Universitaria Sears-Zemansky*. Mexico: Pearson.

Young, H., y Freeman, R. (2013). Ondas mecánicas. En *Física Universitaria Sears-Zemansky*. México: Pearson.

Zapata, F. (15 de mayo de 2019). *Ondas mecánicas*. Recuperado de: <https://www.lifeder.com/ondas-mecanicas/>

Anexos

A1. Tablas de fuerzas sísmicas

Tabla 21. Fuerzas sísmicas hasta 5000 metros.

Magnitud (Mw)	Energía (MJ)	Profundidades (m)				
		1000	2000	3000	4000	5000
		Fuerzas (N)				
1,0	2,00	1995,26	997,63	665,09	498,82	399,05
1,1	2,82	2818,38	1409,19	939,46	704,60	563,68
1,2	3,98	3981,07	1990,54	1327,02	995,27	796,21
1,3	5,62	$5,62 \times 10^3$	$2,81 \times 10^3$	$1,87 \times 10^3$	$1,40 \times 10^3$	$1,12 \times 10^3$
1,4	7,94	$7,94 \times 10^3$	$3,79 \times 10^3$	$2,64 \times 10^3$	$1,98 \times 10^3$	$1,58 \times 10^3$
1,5	11,2	$1,12 \times 10^4$	$5,61 \times 10^3$	$3,74 \times 10^3$	$2,81 \times 10^3$	$2,24 \times 10^3$
1,6	15,8	$1,58 \times 10^4$	$7,92 \times 10^3$	$5,28 \times 10^3$	$3,96 \times 10^3$	$3,17 \times 10^3$
1,7	22,4	$2,24 \times 10^4$	$1,12 \times 10^4$	$7,46 \times 10^3$	$5,60 \times 10^3$	$4,48 \times 10^3$
1,8	31,6	$3,16 \times 10^4$	$1,58 \times 10^4$	$1,05 \times 10^4$	$7,91 \times 10^3$	$6,32 \times 10^3$
1,9	44,7	$4,47 \times 10^4$	$2,23 \times 10^4$	$1,49 \times 10^4$	$1,12 \times 10^4$	$8,93 \times 10^3$
2,0	63,1	$6,31 \times 10^4$	$3,15 \times 10^4$	$2,10 \times 10^4$	$1,58 \times 10^4$	$1,26 \times 10^4$
2,1	89,1	$8,91 \times 10^4$	$4,46 \times 10^4$	$2,97 \times 10^4$	$2,23 \times 10^4$	$1,78 \times 10^4$
2,2	126	$1,26 \times 10^5$	$6,29 \times 10^4$	$4,20 \times 10^4$	$3,15 \times 10^4$	$2,52 \times 10^4$
2,3	178	$1,78 \times 10^5$	$8,89 \times 10^4$	$5,93 \times 10^4$	$4,45 \times 10^4$	$3,56 \times 10^4$
2,4	251	$2,51 \times 10^5$	$1,26 \times 10^5$	$8,37 \times 10^4$	$6,28 \times 10^4$	$5,02 \times 10^4$
2,5	355	$3,55 \times 10^5$	$1,77 \times 10^5$	$1,18 \times 10^5$	$8,87 \times 10^4$	$7,10 \times 10^4$
2,6	501	$5,01 \times 10^5$	$2,51 \times 10^5$	$1,67 \times 10^5$	$1,25 \times 10^5$	$1,00 \times 10^5$
2,7	708	$7,08 \times 10^5$	$3,54 \times 10^5$	$2,36 \times 10^5$	$1,77 \times 10^5$	$1,42 \times 10^5$
2,8	1000	$1,00 \times 10^6$	$5,00 \times 10^5$	$3,33 \times 10^5$	$2,50 \times 10^5$	$2,00 \times 10^5$
2,9	1411	$1,41 \times 10^6$	$7,06 \times 10^5$	$4,71 \times 10^5$	$3,53 \times 10^5$	$2,83 \times 10^5$
3,0	2000	$2,00 \times 10^6$	$9,98 \times 10^5$	$6,65 \times 10^5$	$4,99 \times 10^5$	$3,99 \times 10^5$
3,1	2820	$2,82 \times 10^6$	$1,41 \times 10^6$	$9,39 \times 10^5$	$7,05 \times 10^5$	$5,64 \times 10^5$
3,2	3980	$3,98 \times 10^6$	$1,99 \times 10^6$	$1,33 \times 10^6$	$9,95 \times 10^5$	$7,96 \times 10^5$
3,3	5620	$5,62 \times 10^6$	$2,81 \times 10^6$	$1,87 \times 10^6$	$1,41 \times 10^6$	$1,12 \times 10^6$
3,4	7940	$7,94 \times 10^6$	$3,97 \times 10^6$	$2,65 \times 10^6$	$1,99 \times 10^6$	$1,59 \times 10^6$
3,5	11200	$1,12 \times 10^7$	$5,61 \times 10^6$	$3,74 \times 10^6$	$2,81 \times 10^6$	$2,24 \times 10^6$
3,6	15800	$1,58 \times 10^7$	$7,92 \times 10^6$	$5,28 \times 10^6$	$3,96 \times 10^6$	$3,17 \times 10^6$
3,7	22400	$2,24 \times 10^7$	$1,12 \times 10^7$	$7,46 \times 10^6$	$5,60 \times 10^6$	$4,48 \times 10^6$
3,8	31600	$3,16 \times 10^7$	$1,58 \times 10^7$	$1,05 \times 10^7$	$7,91 \times 10^6$	$6,32 \times 10^6$
3,9	44700	$4,47 \times 10^7$	$2,23 \times 10^7$	$1,49 \times 10^7$	$1,12 \times 10^7$	$8,93 \times 10^6$
4,0	63100	$6,31 \times 10^7$	$3,15 \times 10^7$	$2,10 \times 10^7$	$1,58 \times 10^7$	$1,26 \times 10^7$
4,1	89100	$8,91 \times 10^7$	$4,46 \times 10^7$	$2,97 \times 10^7$	$2,23 \times 10^7$	$1,78 \times 10^7$
4,2	126000	$1,26 \times 10^8$	$6,29 \times 10^7$	$4,20 \times 10^7$	$3,15 \times 10^7$	$2,52 \times 10^7$
4,3	178000	$1,78 \times 10^8$	$8,89 \times 10^7$	$5,93 \times 10^7$	$4,45 \times 10^7$	$3,56 \times 10^7$
4,4	251000	$2,51 \times 10^8$	$1,26 \times 10^8$	$8,37 \times 10^7$	$6,28 \times 10^7$	$5,02 \times 10^7$
4,5	355000	$3,55 \times 10^8$	$1,77 \times 10^8$	$1,18 \times 10^8$	$8,87 \times 10^7$	$7,10 \times 10^7$
4,6	501000	$5,01 \times 10^8$	$2,51 \times 10^8$	$1,67 \times 10^8$	$1,25 \times 10^8$	$1,00 \times 10^8$
4,7	708000	$7,08 \times 10^8$	$3,54 \times 10^8$	$2,36 \times 10^8$	$1,77 \times 10^8$	$1,42 \times 10^8$
4,8	1000000	$1,00 \times 10^9$	$5,00 \times 10^8$	$3,33 \times 10^8$	$2,50 \times 10^8$	$2,00 \times 10^8$
4,9	1410000	$1,41 \times 10^9$	$7,06 \times 10^8$	$4,71 \times 10^8$	$3,53 \times 10^8$	$2,83 \times 10^8$

Tabla 22. Fuerzas sísmicas hasta 10000 metros

Magnitud (Mw)	Energía (MJ)	Profundidades (m)				
		6000	7000	8000	9000	10000
		Fuerzas (N)				
1,0	2,00	332,54	285,04	249,41	221,70	199,53
1,1	2,82	469,73	402,63	352,30	313,15	281,84
1,2	3,98	663,51	568,72	497,63	442,34	398,11
1,3	5,62	937,24	803,34	702,93	624,82	562,34
1,4	7,94	1323,88	1134,75	992,91	882,59	794,33
1,5	11,2	$1,87 \times 10^3$	$1,60 \times 10^3$	$1,40 \times 10^3$	$1,25 \times 10^3$	$1,12 \times 10^3$
1,6	15,8	$2,64 \times 10^3$	$2,26 \times 10^3$	$1,98 \times 10^3$	$1,76 \times 10^3$	$1,54 \times 10^3$
1,7	22,4	$3,37 \times 10^3$	$3,20 \times 10^3$	$27,9 \times 10^3$	$24,8 \times 10^3$	$22,3 \times 10^3$
1,8	31,6	$5,27 \times 10^3$	$4,51 \times 10^3$	$3,95 \times 10^3$	$3,51 \times 10^3$	$31,6 \times 10^3$
1,9	44,7	$7,44 \times 10^3$	$6,38 \times 10^3$	$5,58 \times 10^3$	$4,96 \times 10^3$	$4,47 \times 10^3$
2,0	63,1	$1,05 \times 10^4$	$9,01 \times 10^3$	$7,89 \times 10^3$	$7,01 \times 10^3$	$6,31 \times 10^3$
2,1	89,1	$1,49 \times 10^4$	$1,27 \times 10^4$	$1,11 \times 10^4$	$9,90 \times 10^3$	$8,91 \times 10^3$
2,2	126	$2,10 \times 10^4$	$1,80 \times 10^4$	$1,57 \times 10^4$	$1,40 \times 10^4$	$1,26 \times 10^4$
2,3	178	$2,96 \times 10^4$	$2,54 \times 10^4$	$2,22 \times 10^4$	$1,98 \times 10^4$	$1,78 \times 10^4$
2,4	251	$4,19 \times 10^4$	$3,59 \times 10^4$	$3,14 \times 10^4$	$2,79 \times 10^4$	$2,51 \times 10^4$
2,5	355	$5,91 \times 10^4$	$5,07 \times 10^4$	$4,44 \times 10^4$	$3,94 \times 10^4$	$3,55 \times 10^4$
2,6	501	$8,35 \times 10^4$	$7,16 \times 10^4$	$6,26 \times 10^4$	$5,57 \times 10^4$	$5,01 \times 10^4$
2,7	708	$1,18 \times 10^5$	$1,01 \times 10^5$	$8,85 \times 10^4$	$7,87 \times 10^4$	$7,08 \times 10^4$
2,8	1000	$1,67 \times 10^5$	$1,43 \times 10^5$	$1,25 \times 10^5$	$1,11 \times 10^5$	$1,00 \times 10^5$
2,9	1411	$2,35 \times 10^5$	$2,02 \times 10^5$	$1,77 \times 10^5$	$1,57 \times 10^5$	$1,41 \times 10^5$
3,0	2000	$3,33 \times 10^5$	$2,85 \times 10^5$	$2,49 \times 10^5$	$2,22 \times 10^5$	$2,00 \times 10^5$
3,1	2820	$4,70 \times 10^5$	$4,03 \times 10^5$	$3,52 \times 10^5$	$3,13 \times 10^5$	$2,82 \times 10^5$
3,2	3980	$6,64 \times 10^5$	$5,69 \times 10^5$	$4,98 \times 10^5$	$4,42 \times 10^5$	$3,98 \times 10^5$
3,3	5620	$9,37 \times 10^5$	$8,03 \times 10^5$	$7,03 \times 10^5$	$6,25 \times 10^5$	$5,62 \times 10^5$
3,4	7940	$1,32 \times 10^6$	$1,13 \times 10^6$	$9,93 \times 10^5$	$8,83 \times 10^5$	$7,94 \times 10^5$
3,5	11200	$1,87 \times 10^6$	$1,60 \times 10^6$	$1,40 \times 10^6$	$1,25 \times 10^6$	$1,12 \times 10^6$
3,6	15800	$2,64 \times 10^6$	$2,26 \times 10^6$	$1,98 \times 10^6$	$1,76 \times 10^6$	$1,58 \times 10^6$
3,7	22400	$3,73 \times 10^6$	$3,20 \times 10^6$	$2,80 \times 10^6$	$2,49 \times 10^6$	$2,24 \times 10^6$
3,8	31600	$5,27 \times 10^6$	$4,52 \times 10^6$	$3,95 \times 10^6$	$3,51 \times 10^6$	$3,16 \times 10^6$
3,9	44700	$7,44 \times 10^6$	$6,38 \times 10^6$	$5,58 \times 10^6$	$4,96 \times 10^6$	$4,47 \times 10^6$
4,0	63100	$1,05 \times 10^7$	$9,01 \times 10^6$	$7,89 \times 10^6$	$7,01 \times 10^6$	$6,31 \times 10^6$
4,1	89100	$1,49 \times 10^7$	$1,27 \times 10^7$	$1,11 \times 10^7$	$9,90 \times 10^6$	$8,91 \times 10^6$
4,2	126000	$2,10 \times 10^7$	$1,80 \times 10^7$	$1,57 \times 10^7$	$1,40 \times 10^7$	$1,26 \times 10^7$
4,3	178000	$2,96 \times 10^7$	$2,54 \times 10^7$	$2,22 \times 10^7$	$1,98 \times 10^7$	$1,78 \times 10^7$
4,4	251000	$4,19 \times 10^7$	$3,59 \times 10^7$	$3,14 \times 10^7$	$2,79 \times 10^7$	$2,51 \times 10^7$
4,5	355000	$5,91 \times 10^7$	$5,07 \times 10^7$	$4,44 \times 10^7$	$3,94 \times 10^7$	$3,55 \times 10^7$
4,6	501000	$8,35 \times 10^7$	$7,16 \times 10^7$	$6,26 \times 10^7$	$5,57 \times 10^7$	$5,01 \times 10^7$
4,7	708000	$1,18 \times 10^8$	$1,01 \times 10^8$	$8,85 \times 10^7$	$7,87 \times 10^7$	$7,08 \times 10^7$
4,8	1000000	$1,67 \times 10^8$	$1,43 \times 10^8$	$1,25 \times 10^8$	$1,11 \times 10^8$	$1,00 \times 10^8$
4,9	1410000	$2,35 \times 10^8$	$2,02 \times 10^8$	$1,77 \times 10^8$	$1,57 \times 10^8$	$1,41 \times 10^8$

Tabla 23. Fuerzas sísmicas hasta 15000 metros

Magnitud (Mw)	Energía (MJ)	Profundidades (m)				
		11000	12000	13000	14000	15000
		Fuerzas (N)				
1,0	2,00	181,39	166,27	153,48	142,52	133,02
1,1	2,82	256,22	234,87	216,80	201,31	187,89
1,2	3,98	361,92	331,76	306,24	284,36	265,40
1,3	5,62	511,22	468,62	432,57	401,67	374,89
1,4	7,94	722,12	661,94	611,02	567,38	529,55
1,5	11,2	$1,02 \times 10^3$	$9,35 \times 10^2$	$8,63 \times 10^2$	$8,01 \times 10^2$	$7,48 \times 10^2$
1,6	15,8	$1,44 \times 10^3$	$1,32 \times 10^3$	$1,22 \times 10^3$	$1,13 \times 10^3$	$1,06 \times 10^3$
1,7	22,4	$2,04 \times 10^3$	$1,87 \times 10^3$	$1,72 \times 10^3$	$1,60 \times 10^3$	$1,49 \times 10^3$
1,8	31,6	$2,87 \times 10^3$	$2,64 \times 10^3$	$2,43 \times 10^3$	$2,26 \times 10^3$	$2,11 \times 10^3$
1,9	44,7	$4,06 \times 10^3$	$3,72 \times 10^3$	$3,44 \times 10^3$	$3,19 \times 10^3$	$2,98 \times 10^3$
2,0	63,1	$5,74 \times 10^3$	$5,26 \times 10^3$	$4,85 \times 10^3$	$4,51 \times 10^3$	$4,21 \times 10^3$
2,1	89,1	$8,10 \times 10^3$	$7,43 \times 10^3$	$6,86 \times 10^3$	$6,37 \times 10^3$	$5,94 \times 10^3$
2,2	126	$1,14 \times 10^4$	$1,05 \times 10^4$	$9,68 \times 10^3$	$8,99 \times 10^3$	$8,39 \times 10^3$
2,3	178	$1,62 \times 10^4$	$1,48 \times 10^4$	$1,37 \times 10^4$	$1,27 \times 10^4$	$1,19 \times 10^4$
2,4	251	$2,28 \times 10^4$	$2,09 \times 10^4$	$1,93 \times 10^4$	$1,79 \times 10^4$	$1,67 \times 10^4$
2,5	355	$3,23 \times 10^4$	$2,96 \times 10^4$	$2,73 \times 10^4$	$2,53 \times 10^4$	$2,37 \times 10^4$
2,6	501	$4,56 \times 10^4$	$4,18 \times 10^4$	$3,86 \times 10^4$	$3,58 \times 10^4$	$3,34 \times 10^4$
2,7	708	$6,44 \times 10^4$	$5,90 \times 10^4$	$5,45 \times 10^4$	$5,06 \times 10^4$	$4,72 \times 10^4$
2,8	1000	$9,09 \times 10^4$	$8,33 \times 10^4$	$7,69 \times 10^4$	$7,14 \times 10^4$	$6,67 \times 10^4$
2,9	1411	$1,28 \times 10^5$	$1,18 \times 10^5$	$1,09 \times 10^5$	$1,01 \times 10^5$	$9,42 \times 10^4$
3,0	2000	$1,81 \times 10^5$	$1,66 \times 10^5$	$1,53 \times 10^5$	$1,43 \times 10^5$	$1,33 \times 10^5$
3,1	2820	$2,56 \times 10^5$	$2,35 \times 10^5$	$2,17 \times 10^5$	$2,01 \times 10^5$	$1,88 \times 10^5$
3,2	3980	$3,62 \times 10^5$	$3,32 \times 10^5$	$3,06 \times 10^5$	$2,84 \times 10^5$	$2,65 \times 10^5$
3,3	5620	$5,11 \times 10^5$	$4,69 \times 10^5$	$4,33 \times 10^5$	$4,02 \times 10^5$	$3,75 \times 10^5$
3,4	7940	$7,22 \times 10^5$	$6,62 \times 10^5$	$6,11 \times 10^5$	$5,67 \times 10^5$	$5,30 \times 10^5$
3,5	11200	$1,02 \times 10^6$	$9,35 \times 10^5$	$8,63 \times 10^5$	$8,01 \times 10^5$	$7,48 \times 10^5$
3,6	15800	$1,44 \times 10^6$	$1,32 \times 10^6$	$1,22 \times 10^6$	$1,13 \times 10^6$	$1,06 \times 10^6$
3,7	22400	$2,04 \times 10^6$	$1,87 \times 10^6$	$1,72 \times 10^6$	$1,60 \times 10^6$	$1,49 \times 10^6$
3,8	31600	$2,87 \times 10^6$	$2,64 \times 10^6$	$2,43 \times 10^6$	$2,26 \times 10^6$	$2,11 \times 10^6$
3,9	44700	$4,06 \times 10^6$	$3,72 \times 10^6$	$3,44 \times 10^6$	$3,19 \times 10^6$	$2,98 \times 10^6$
4,0	63100	$5,74 \times 10^6$	$5,26 \times 10^6$	$4,85 \times 10^6$	$4,51 \times 10^6$	$4,21 \times 10^6$
4,1	89100	$8,10 \times 10^6$	$7,43 \times 10^6$	$6,86 \times 10^6$	$6,37 \times 10^6$	$5,94 \times 10^6$
4,2	126000	$1,14 \times 10^7$	$1,05 \times 10^7$	$9,68 \times 10^6$	$8,99 \times 10^6$	$8,39 \times 10^6$
4,3	178000	$1,62 \times 10^7$	$1,48 \times 10^7$	$1,37 \times 10^7$	$1,27 \times 10^7$	$1,19 \times 10^7$
4,4	251000	$2,28 \times 10^7$	$2,09 \times 10^7$	$1,93 \times 10^7$	$1,79 \times 10^7$	$1,67 \times 10^7$
4,5	355000	$3,23 \times 10^7$	$2,96 \times 10^7$	$2,73 \times 10^7$	$2,53 \times 10^7$	$2,37 \times 10^7$
4,6	501000	$4,56 \times 10^7$	$4,18 \times 10^7$	$3,86 \times 10^7$	$3,58 \times 10^7$	$3,34 \times 10^7$
4,7	708000	$6,44 \times 10^7$	$5,90 \times 10^7$	$5,45 \times 10^7$	$5,06 \times 10^7$	$4,72 \times 10^7$
4,8	1000000	$9,09 \times 10^7$	$8,33 \times 10^7$	$7,69 \times 10^7$	$7,14 \times 10^7$	$6,67 \times 10^7$
4,9	1410000	$1,28 \times 10^8$	$1,18 \times 10^8$	$1,09 \times 10^8$	$1,01 \times 10^8$	$9,42 \times 10^7$

Tabla 24. Fuerzas sísmicas hasta 20000 metros

Magnitud (Mw)	Energía (MJ)	Profundidades (m)				
		16000	17000	18000	19000	20000
		Fuerzas (N)				
1,0	2,00	124,70	117,37	110,85	105,01	99,76
1,1	2,82	176,15	165,79	156,58	148,34	140,92
1,2	3,98	248,82	234,18	221,17	209,53	199,05
1,3	5,62	351,46	330,79	312,41	295,97	281,17
1,4	7,94	496,46	467,25	441,29	418,07	397,16
1,5	11,2	701,26	660,01	623,34	590,54	561,01
1,6	15,8	990,56	932,29	880,50	834,15	792,45
1,7	22,4	1,40× 10 ³	1,32× 10 ³	1,24× 10 ³	1,18× 10 ³	1,12× 10 ³
1,8	31,6	1,98× 10 ³	1,86× 10 ³	1,76× 10 ³	1,66× 10 ³	1,58× 10 ³
1,9	44,7	2,79× 10 ³	2,63× 10 ³	2,48× 10 ³	2,35× 10 ³	2,23× 10 ³
2,0	63,1	3,94× 10 ³	3,71× 10 ³	3,51× 10 ³	3,32× 10 ³	3,15× 10 ³
2,1	89,1	5,57× 10 ³	5,24× 10 ³	4,95× 10 ³	4,69× 10 ³	4,46× 10 ³
2,2	126	7,87× 10 ³	7,41× 10 ³	6,99× 10 ³	6,63× 10 ³	6,29× 10 ³
2,3	178	1,11× 10 ⁴	1,05× 10 ⁴	9,88× 10 ³	9,36× 10 ³	8,89× 10 ³
2,4	251	1,57× 10 ⁴	1,48× 10 ⁴	1,40× 10 ⁴	1,32× 10 ⁴	1,26× 10 ⁴
2,5	355	2,22× 10 ⁴	2,09× 10 ⁴	1,97× 10 ⁴	1,87× 10 ⁴	1,77× 10 ⁴
2,6	501	3,13× 10 ⁴	2,95× 10 ⁴	2,78× 10 ⁴	2,64× 10 ⁴	2,51× 10 ⁴
2,7	708	4,42× 10 ⁴	4,16× 10 ⁴	3,93× 10 ⁴	3,73× 10 ⁴	3,54× 10 ⁴
2,8	1000	6,25× 10 ⁴	5,88× 10 ⁴	5,56× 10 ⁴	5,26× 10 ⁴	5,00× 10 ⁴
2,9	1411	8,83× 10 ⁴	8,31× 10 ⁴	7,85× 10 ⁴	7,43× 10 ⁴	7,06× 10 ⁴
3,0	2000	1,25× 10 ⁵	1,17× 10 ⁵	1,11× 10 ⁵	1,05× 10 ⁵	9,98× 10 ⁴
3,1	2820	1,76× 10 ⁵	1,66× 10 ⁵	1,57× 10 ⁵	1,48× 10 ⁵	1,41× 10 ⁵
3,2	3980	2,49× 10 ⁵	2,34× 10 ⁵	2,21× 10 ⁵	2,10× 10 ⁵	1,99× 10 ⁵
3,3	5620	3,51× 10 ⁵	3,31× 10 ⁵	3,12× 10 ⁵	2,96× 10 ⁵	2,81× 10 ⁵
3,4	7940	4,96× 10 ⁵	4,67× 10 ⁵	4,41× 10 ⁵	4,18× 10 ⁵	3,97× 10 ⁵
3,5	11200	7,01× 10 ⁵	6,60× 10 ⁵	6,23× 10 ⁵	5,91× 10 ⁵	5,61× 10 ⁵
3,6	15800	9,91× 10 ⁵	9,32× 10 ⁵	8,80× 10 ⁵	8,34× 10 ⁵	7,92× 10 ⁵
3,7	22400	1,40× 10 ⁶	1,32× 10 ⁶	1,24× 10 ⁶	1,18× 10 ⁶	1,12× 10 ⁶
3,8	31600	1,98× 10 ⁶	1,86× 10 ⁶	1,76× 10 ⁶	1,66× 10 ⁶	1,58× 10 ⁶
3,9	44700	2,79× 10 ⁶	2,63× 10 ⁶	2,48× 10 ⁶	2,35× 10 ⁶	2,23× 10 ⁶
4,0	63100	3,94× 10 ⁶	3,71× 10 ⁶	3,51× 10 ⁶	3,32× 10 ⁶	3,15× 10 ⁶
4,1	89100	5,57× 10 ⁶	5,24× 10 ⁶	4,95× 10 ⁶	4,69× 10 ⁶	4,46× 10 ⁶
4,2	126000	7,87× 10 ⁶	7,41× 10 ⁶	6,99× 10 ⁶	6,63× 10 ⁶	6,29× 10 ⁶
4,3	178000	1,11× 10 ⁷	1,05× 10 ⁷	9,88× 10 ⁶	9,36× 10 ⁶	8,89× 10 ⁶
4,4	251000	1,57× 10 ⁷	1,48× 10 ⁷	1,40× 10 ⁷	1,32× 10 ⁷	1,26× 10 ⁷
4,5	355000	2,22× 10 ⁷	2,09× 10 ⁷	1,97× 10 ⁷	1,87× 10 ⁷	1,77× 10 ⁷
4,6	501000	3,13× 10 ⁷	2,95× 10 ⁷	2,78× 10 ⁷	2,64× 10 ⁷	2,51× 10 ⁷
4,7	708000	4,42× 10 ⁷	4,16× 10 ⁷	3,93× 10 ⁷	3,73× 10 ⁷	3,54× 10 ⁷
4,8	1000000	6,25× 10 ⁷	5,88× 10 ⁷	5,56× 10 ⁷	5,26× 10 ⁷	5,00× 10 ⁷
4,9	1410000	8,83× 10 ⁷	8,31× 10 ⁷	7,85× 10 ⁷	7,43× 10 ⁷	7,06× 10 ⁷

A2. Planos de piezas del sistema

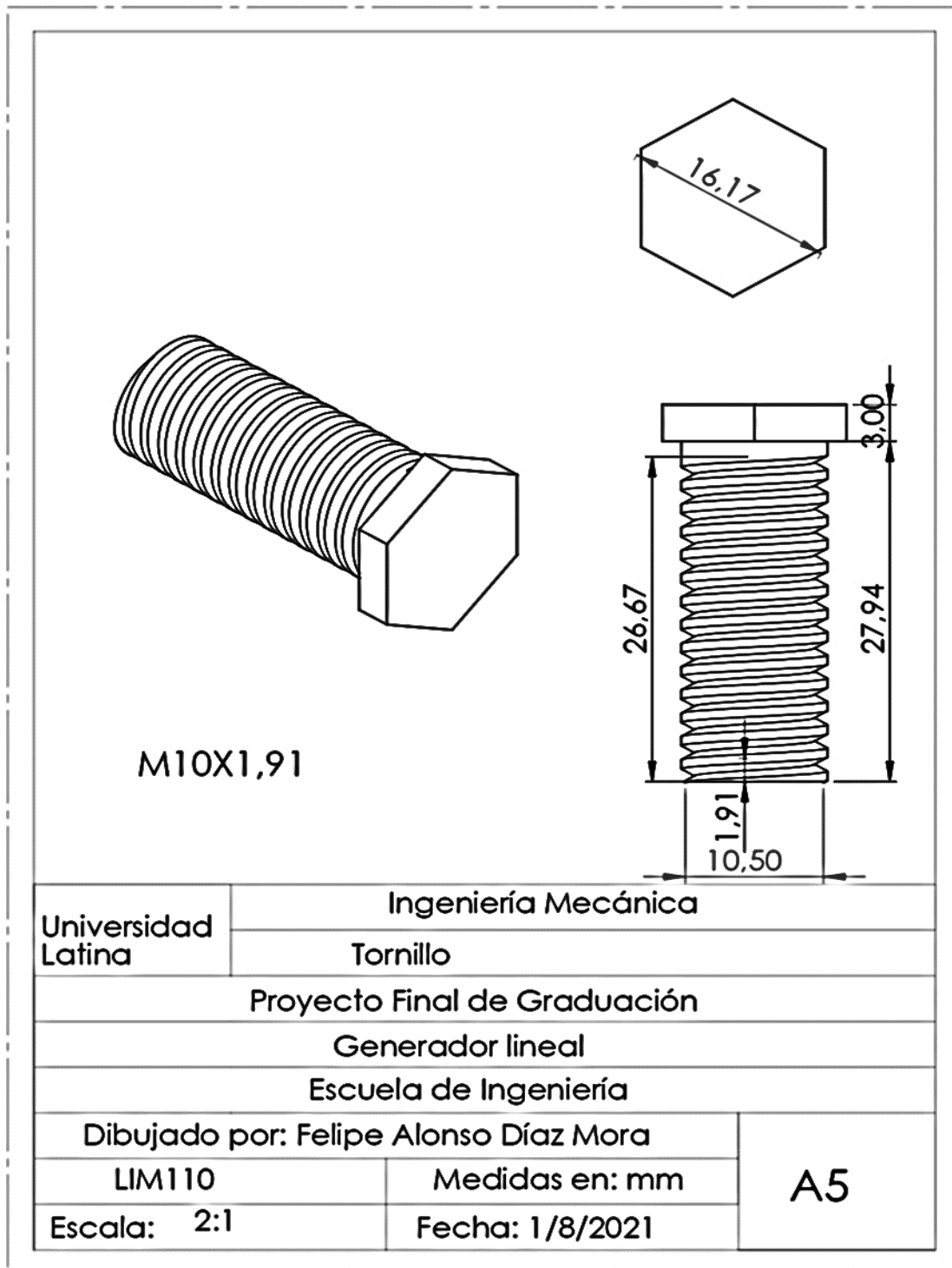


Figura 55. Plano del tornillo.
Fuente: Elaboración propia.



Figura 56. Plano de la bobina.
Fuente Elaboración propia.

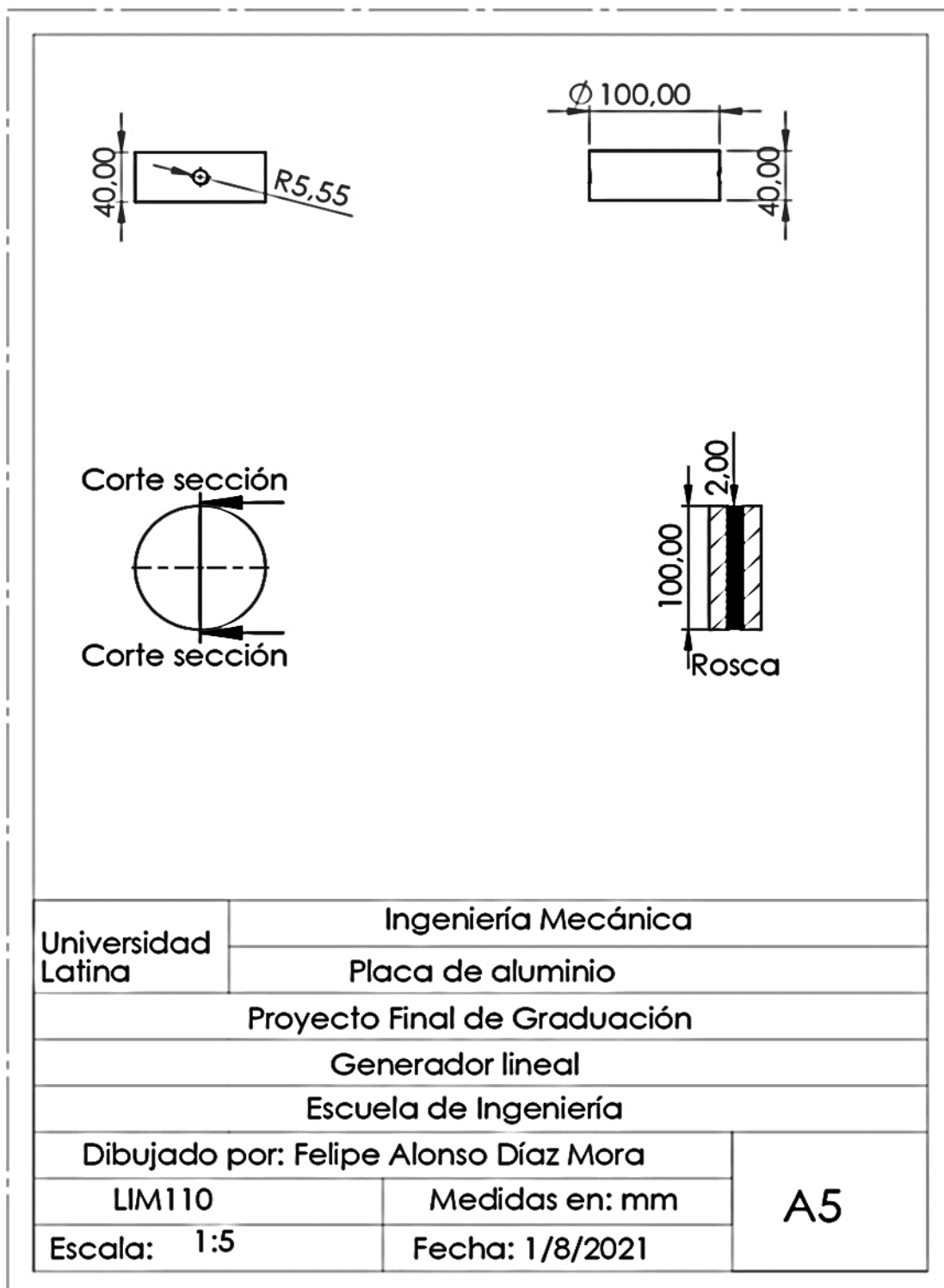


Figura 57. Plano de la placa de aluminio.
Fuente: Elaboración propia.

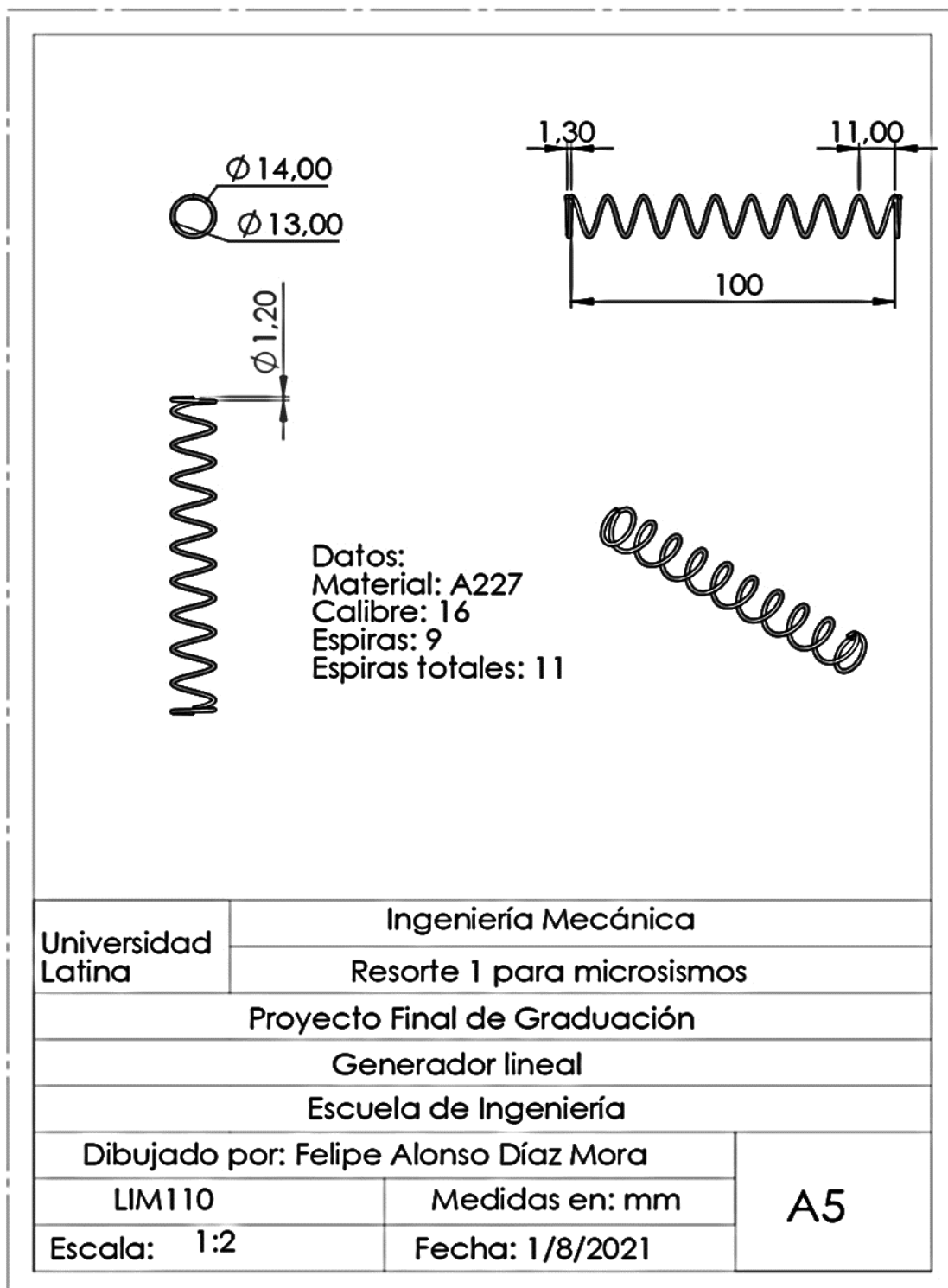


Figura 58. Plano resorte 1 para microsismos.

Fuente: Elaboración propia.



Figura 59. Plano del resorte 2 para microsismos.
 Fuente: Elaboración propia.

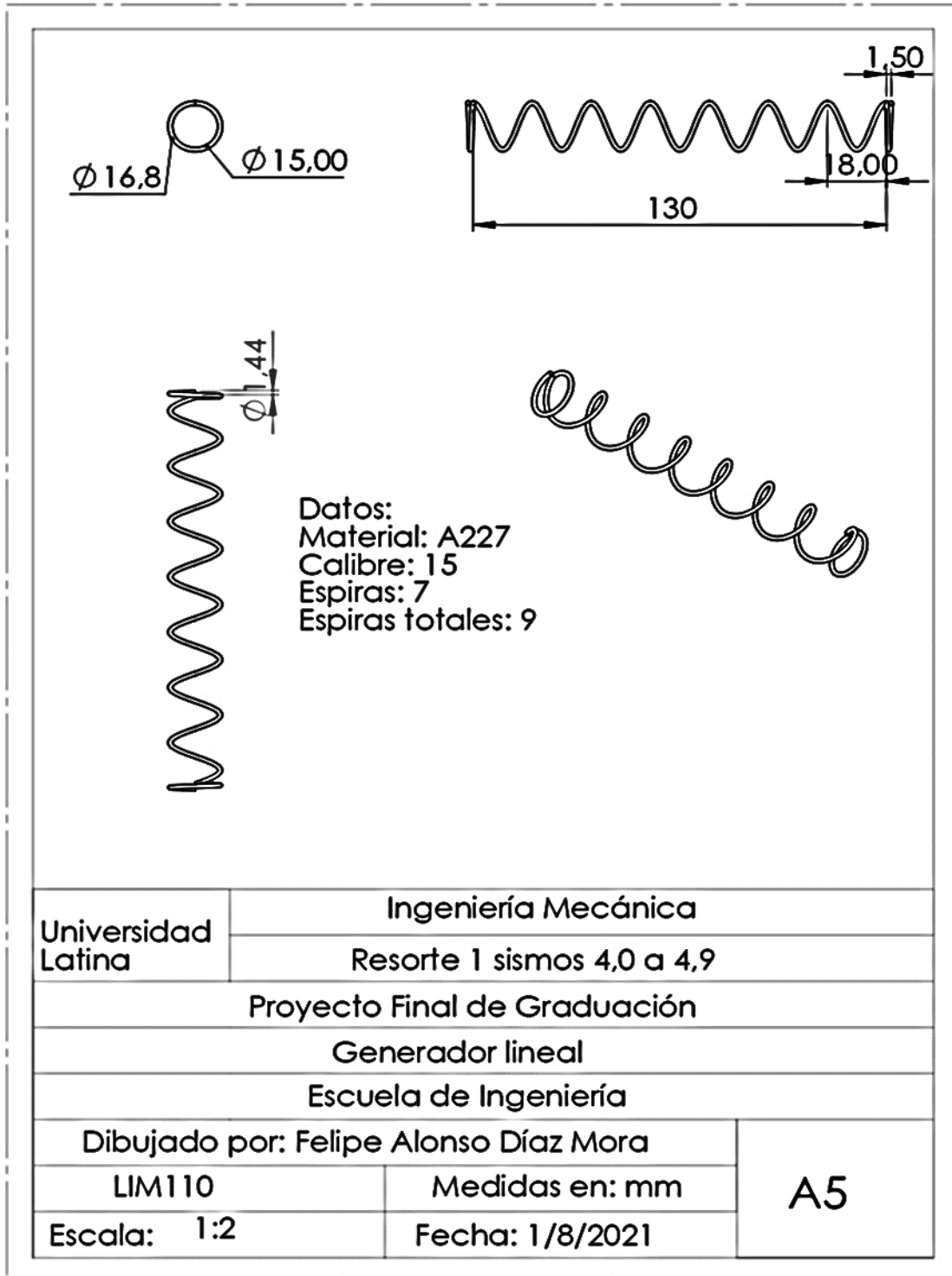


Figura 60. Plano del resorte 1 para sismos de 4 grados.
 Fuente: Elaboración propia.

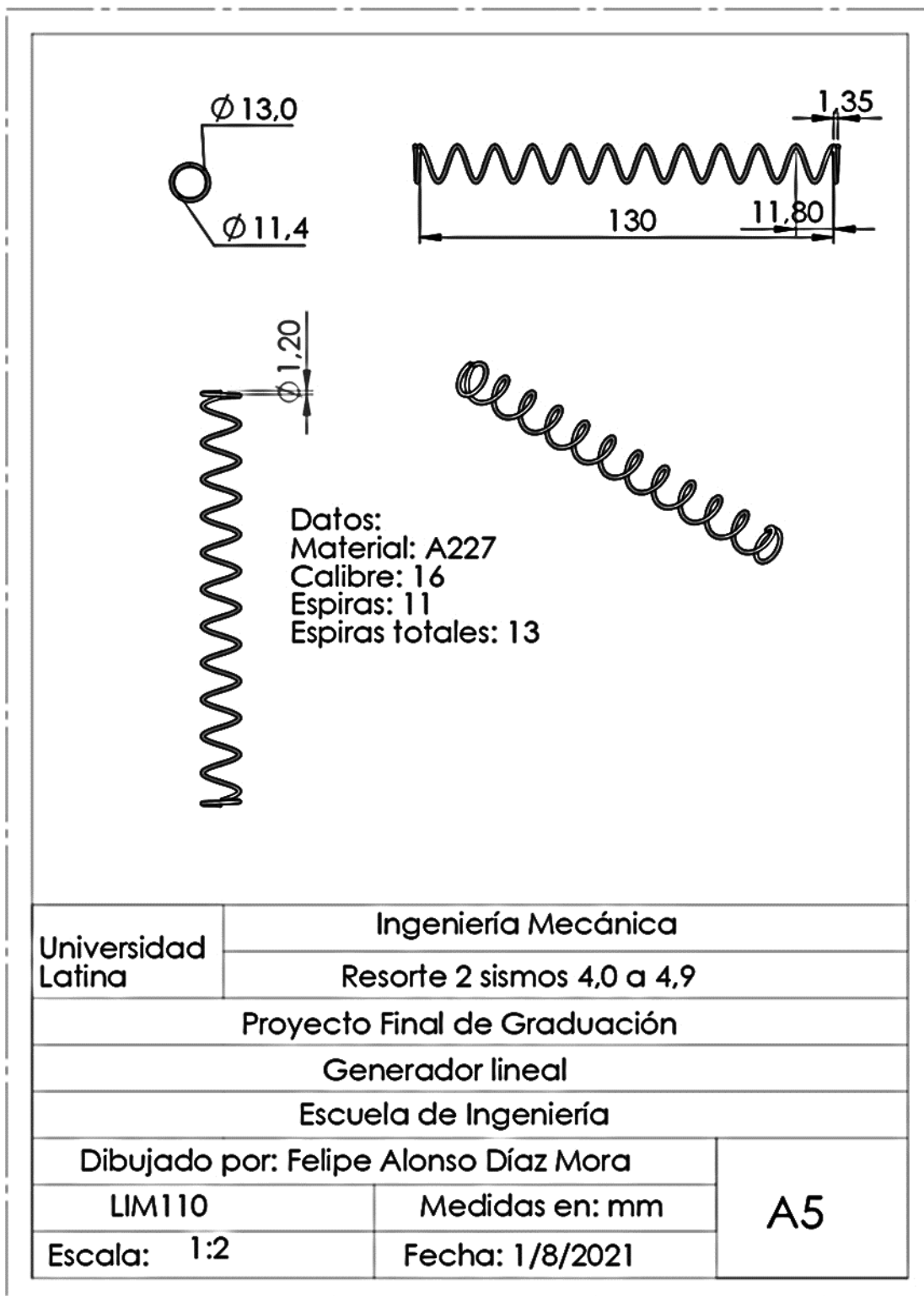


Figura 61. Plano del resorte 2 para sismos de 4 grados.
 Fuente: Elaboración propia.



Figura 62. Plano de corredera parte superior.
Fuente Elaboración propia.

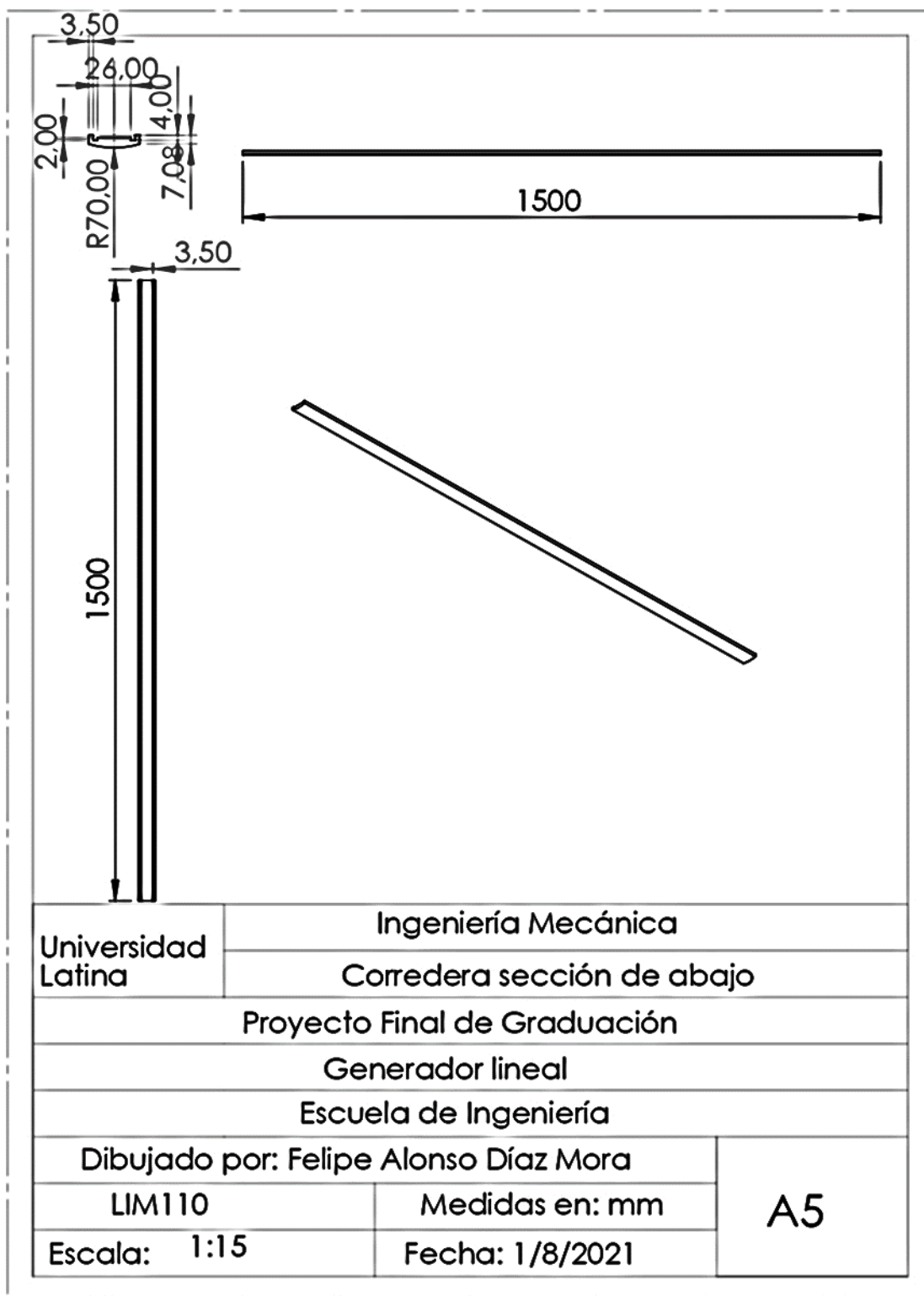


Figura 63. Plano corredera sección de abajo.
Fuente: Elaboración propia.

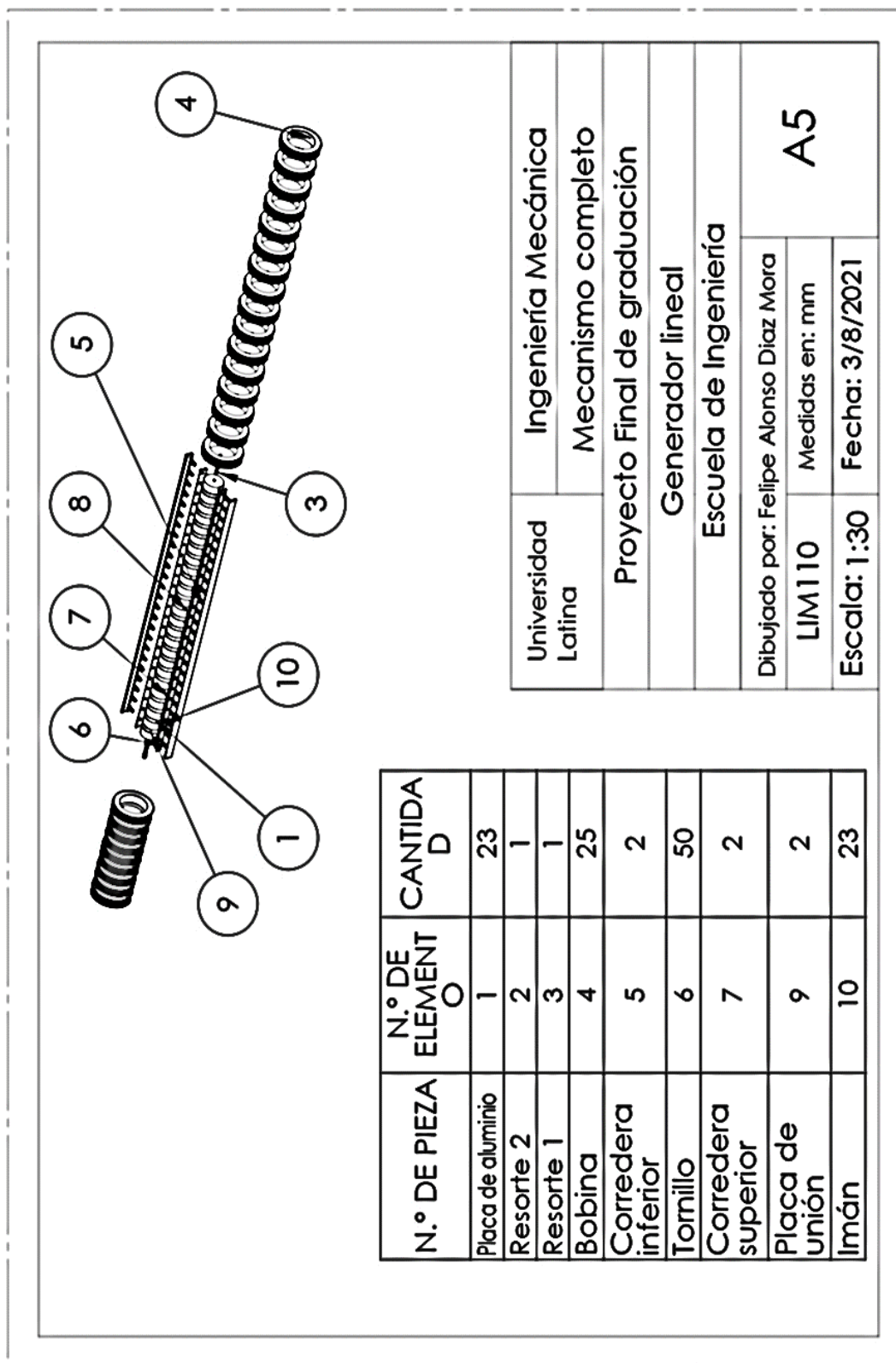


Figura 64. Mecanismo y sus componentes.

Fuente: Elaboración propia.

