

Instituto Politécnico Nacional

Unidad Profesional Interdisciplinaria en
Ingeniería y Tecnologías Avanzadas

"Sistema mecatrónico de entrenamiento asistido para el aprendizaje del método Fridrich en el cubo Rubik 3×3 "

Alumno:

Fidel Alfredo Olmos García

Asesores:

Nombre:	M. en C. Jorge Fonseca Campos
Procedencia:	UPIITA – IPN
Nombre:	Dra. Irene Lopez Rodriguez
Procedencia:	Externa
Nombre:	Dr. Carlos Carrizales Velazquez
Procedencia:	Externo

Junio, 2025

Resumen

El presente documento se enfoca en la necesidad de un sistema unificado para la recolección y procesamiento de datos de posibles precursores sísmicos, como patrones de quietud sísmica, anomalías en campos eléctricos y magnéticos, y señales ionosféricas, provenientes de diversas fuentes. El objetivo primordial de este proyecto es diseñar una herramienta integral y accesible para el análisis e identificación de estos datos, con el fin de mejorar la comprensión de los procesos sísmicos. Este proyecto está organizado en cuatro etapas esenciales: visualización de datos, procesamiento en un servidor dedicado, recolección de datos y almacenamiento de los mismos.

Palabras clave: precursores sísmicos, quietud sísmica, señales ionosféricas, campo magnético, campo eléctrico.

Índice

1. Introducción	3
2. Justificación	5
3. Planteamiento del problema	7
4. Propuesta de solución	9
5. Objetivo general	11
5.1. Objetivos específicos	11
6. Marco teórico	12
6.1. Posibles precursores sísmicos	13
6.1.1. Patrones de quietud sísmica	13
6.1.2. Anomalías del campo eléctrico	13
6.1.3. Anomalías del campo magnético	13
6.1.4. Señales ionosféricas	13
6.2. Elementos clave para la predicción de sismos	14
7. Estado del Arte	16
7.1. TELESISMUX: Subsistema Telemático para una Estación Sísmica Remota .	16
7.2. Sistema IoT para la medición, registro y visualización web de señales electromagnéticas, geo-eléctricas y acústicas asociadas a precursores sísmicos	16
7.3. Sistema de monitoreo y registro de señales asociadas a precursores sísmicos en la costa mexicana del Pacífico	16
7.4. Anomalías en las señales electromagnéticas de baja frecuencia en la banda VLF	17
8. Escenario de pruebas	19
9. Cronograma	20
10. Glosario de términos	22

Índice de figuras

- | | | |
|----|---|----|
| 1. | Propuesta de interacción de actores del sistema | 9 |
| 2. | Cronograma de actividades | 20 |

Índice de tablas

- | | | |
|----|---|----|
| 1. | Características principales de los proyectos relacionados y su contribución al trabajo actual | 18 |
| 2. | Cronograma de actividades | 21 |

1. Introducción

El cubo Rubik, creado en 1974 por el arquitecto húngaro Ernő Rubik como herramienta didáctica para mostrar transformaciones espaciales, se ha consolidado como uno de los rompecabezas mas populares del mundo, con más de 350 millones de unidades hasta 2018[1]. Su impacto trascendió el entretenimiento, dando origen en los años 80 a competencias formales centradas en resolver el cubo en el menor tiempo posible. Esta disciplina, conocida como *speed-cubing*, ha evolucionado hacia niveles altamente competitivos y técnicos.

Dentro de esta comunidad, el método Fridrich -también denominado CFOP por sus siglas en inglés: Cross, F2L, OLL y PLL- se ha convertido en el sistema de resolución más utilizado por los practicantes de alto nivel[2]. A diferencia del método básico para principiantes, CFOP requiere la memorización y ejecución precisa de más de 78 algoritmos. Particularmente, la etapa F2L (First Two Layers) representa el mayor desafío, ya que concentra aproximadamente el 52 % del tiempo de resolución total y genera la mayoría de las pausas que interrumpen la fluidez del solve[2].

Sin embargo, el proceso de aprendizaje de estos algoritmos es considerablemente ineficiente. Para practicar un caso específico, el usuario debe manipular el cubo de forma manual hasta reproducir la situación deseada, resolviéndolo o desarmándolo repetidamente. Esta limitación introduce una barrera mecánica que dificulta la práctica enfocada, ralentiza la memorización y puede llevar a la frustración del practicante.

Frente a este problema, la ingeniería mecatrónica ofrece una solución prometedora. Esta disciplina, entendida como la integración sinérgica de sistemas mecánicos, electrónicos, informáticos y de control, permite el diseño de sistemas inteligentes que interactúan con el entorno de forma precisa y programada[3]. Aplicada al contexto del *speed-cubing*, esta integración da lugar a un sistema robotizado capaz de automatizar la preparación de casos específicos del método Fridrich, eliminando la necesidad de intervención manual.

Si bien existen numerosos proyectos de robótica enfocados en resolver completamente el cubo Rubik -por ejemplo, sistemas que emplean visión artificial y brazos colaborativos para identificar y ejecutar soluciones completas en pocos segundos[4]-, la mayoría de estos desarrollos se centran en la resolución total del cubo y no están pensados como herramientas de entrenamiento. Su propósito final es resolver, no generar situaciones controladas para practicar partes específicas del proceso.

En este sentido, el presente protocolo propone el diseño y construcción de un robot entrenador, con la capacidad de posicionar el cubo en configuraciones específicas de las etapas F2L, OLL o PLL del método CFOP. El sistema consistirá en un robot de sobremesa con actuadores que permitan girar las seis caras del cubo, controlado desde una aplicación de escritorio que proporcionará al usuario una interfaz visual para seleccionar el caso deseado. Mediante la aplicación del algoritmo inverso, el robot generará el estado inicial correspondiente para que el usuario pueda practicarlo de forma inmediata.

Este enfoque ofrece múltiples beneficios. Para los speed-cubers, representa una herramienta de alto valor, ya que reduce drásticamente el tiempo dedicado a preparar manualmente

cada caso y permite concentrarse directamente en la ejecución del algoritmo. Desde el ámbito educativo, se convierte en un recurso tangible para instituciones enfocadas en áreas STEM, permitiendo enseñar de manera práctica temas como cinemática, electrónica, control y programación. Por último, en el campo de la investigación, esta plataforma abre la puerta al estudio de procesos de aprendizaje motor, memorización por repetición y diseño de sistemas interactivos aplicados a la enseñanza.

A partir de los antecedentes revisados, se identifica una necesidad no resuelta dentro del proceso de aprendizaje avanzado del cubo Rubik. Actualmente, no existen herramientas que permitan generar, de forma precisa y repetitiva, casos específicos del método Fridrich con fines didácticos. En respuesta a esta brecha, el presente proyecto se plantea como objetivo general diseñar, construir y validar un sistema mecatrónico que automatice la generación de dichos casos, facilitando su práctica de manera eficiente.

Para ello, se desarrollará un modelo cinemático que describa los movimientos del cubo, se diseñará el hardware robótico junto con su electrónica de control, se programará la interfaz de usuario con capacidad de inversión de algoritmos, y finalmente, se evaluará la precisión y repetibilidad del sistema a través de métricas como el tiempo de preparación de cada caso y la exactitud angular de los giros. Esta propuesta busca no solo resolver un problema técnico, sino también aportar una herramienta educativa y formativa con aplicaciones reales en el ámbito académico y deportivo.

2. Justificación

La resolución de los rompecabezas ocupa un lugar privilegiado en la literatura pedagógica por su capacidad de estimular procesos cognitivos complejos. Algunos estudios sobre *juegos matemáticos* muestran que desafíos como el cubo Rubik generan entornos donde la abstracción se materializa y la motivación intrínseca se incrementa, favoreciendo la comprensión de patrones y el desarrollo del pensamiento lógico [5]. Entre los beneficios más citados se encuentran la mejora del razonamiento espacial, la memoria de trabajo y la capacidad para planificar estrategias. Estas competencias, esenciales en ámbitos STEM, se potencian aún más cuando la actividad se enmarca en un contexto lúdico que refuerza la confianza y la perseverancia del estudiante.

Ahora bien, pasar del método básico de resolución del cubo al método Fridrich (CFOP) supone memorizar más de setenta algoritmos y reproducir situaciones muy específicas para su práctica deliberada. El estudiante se ve obligado a “preparar” el cubo manualmente antes de cada intento, un proceso tedioso que diluye el tiempo de estudio efectivo y genera frustración. Esta brecha entre el valor pedagógico del cubo y la ineficiencia del entrenamiento avanzado justifica la búsqueda de una herramienta que libere al alumno de la preparación mecánica, permitiéndole concentrarse en la adquisición y perfeccionamiento de los algoritmos.

La mecatrónica —concebida como integración sinérgica de mecánica, electrónica, informática y control— ofrece la plataforma ideal para cerrar esa brecha. Su enfoque *transdisciplinario* pone en diálogo permanente a las distintas ingenierías, generando soluciones donde la frontera entre disciplinas se diluye para dar paso a la sinergia [6]. Concebir un robot entrenador del cubo Rubik implica diseñar un mecanismo de accionamiento preciso (mecánica), seleccionar motores y electrónica de potencia (electrónica), programar algoritmos inversos y una interfaz intuitiva (software) y, finalmente, sincronizar todos los subsistemas mediante estrategias de control robustas (automatización). Cada etapa del proyecto —modelado cinemático, selección de actuadores, control de movimiento, visualización de algoritmos— exige la participación coordinada de estas áreas, materializando el carácter multidisciplinario que define la formación del ingeniero mecatrónico.

En términos formativos, el proyecto actúa como catalizador de las competencias profesionales que demanda la Industria 4.0: capacidad de integración tecnológica, pensamiento sistémico y orientación a la innovación [6]. Al enfrentarse al ciclo completo de diseño-construcción-validación, el estudiante aplica conocimiento teórico en un problema real, fortalece habilidades de gestión de proyectos y consolida un portafolio con alto valor académico y laboral.

En síntesis, justificar el desarrollo de un robot entrenador de casos CFOP descansa en dos pilares complementarios:

1. **Cognitivo-educativo.** Ampliar los beneficios demostrados del cubo Rubik, eliminando la barrera mecánica que frena la práctica avanzada y optimizando el proceso de aprendizaje significativo.

2. **Tecnológico–profesional.** Mostrar la mecatrónica como respuesta natural y multidisciplinaria a un problema concreto, a la vez que se potencia la formación integral del estudiante y se aporta una herramienta transferible a contextos educativos y competitivos.

De esta manera, el proyecto no solo atiende una necesidad pedagógica evidente, sino que también se alinea con las tendencias de innovación y con el perfil de competencias que la ingeniería mecatrónica promueve en el siglo XXI.

3. Planteamiento del problema

En el aprendizaje avanzado del método Fridrich (CFOP) para el cubo Rubik 3×3 , el estudiante requiere practicar de forma deliberada configuraciones específicas de F2L, OLL y PLL. Sin embargo, la preparación manual de cada caso implica resolver o desarmar el cubo repetidamente hasta reproducir el estado deseado, lo que introduce pausas frecuentes, variabilidad y un consumo de tiempo que no se invierte directamente en la memorización y ejecución de algoritmos. Esta dinámica reduce la densidad de práctica efectiva por sesión y favorece la frustración, dificultando la consolidación de la memoria procedimental asociada a CFOP [2], [7].

Problema central. La práctica avanzada de CFOP en cubo físico es *ineficiente* debido a la necesidad de generar casos manualmente antes de cada intento, lo que disminuye las repeticiones útiles, eleva la carga cognitiva y retrasa la adquisición de algoritmos.

Causas. (i) Ausencia de herramientas físicas diseñadas para *entrenamiento caso-por-caso*; (ii) tiempo y esfuerzo requeridos para reproducir estados específicos con precisión; (iii) variabilidad humana al preparar el cubo; y (iv) limitaciones de los simuladores exclusivamente virtuales para entrenar con el cubo real. La literatura disponible se concentra en robots cuyo objetivo es *resolver* el cubo completo, mas no en sistemas orientados a *preparar* casos de entrenamiento controlado Monzon2017, [4].

Efectos. (i) Reducción de la tasa de memorización y de la transferencia a una ejecución fluida; (ii) incremento de pausas y pérdida de foco durante la sesión; (iii) percepción de frustración/aburrimiento y eventual abandono; y (iv) estancamiento en la mejora de tiempos de resolución [7].

Brecha (gap). Pese a la existencia de robots resolutores y de simuladores software, no se dispone de un sistema *físico* enfocado en la *preparación rápida, precisa y repetible* de casos CFOP para entrenamiento dirigido. Esta brecha tecnológica y didáctica limita la eficiencia del aprendizaje en la fase avanzada Monzon2017, [4].

Pregunta de investigación. *¿En qué medida un sistema mecatrónico capaz de generar casos específicos de CFOP reduce el tiempo de preparación por intento y aumenta la repetición efectiva, en comparación con la preparación manual de casos?*

Sub-preguntas. (a) ¿Cuál es el tiempo de preparación por caso (T_{prep}) y la precisión de giro alcanzable por el sistema? (b) ¿La disponibilidad de repeticiones rápidas y consistentes mejora la memorización/retención de algoritmos respecto a la práctica manual? (c) ¿Se reduce la carga percibida y la frustración al entrenar con el sistema?

Delimitación y alcance. El estudio se circunscribe al cubo 3×3 y al método CFOP (F2L, OLL, PLL). El sistema propuesto se limita a *generar casos* para entrenamiento con cubo físico; no aborda la resolución completa ni la verificación mediante visión artificial. La población objetivo son practicantes con dominio del método básico que buscan progresar en CFOP.

Supuestos y restricciones. Se asume el uso de cubos 3×3 estándar y condiciones de laboratorio/aula; se reconocen restricciones de costo, tolerancias mecánicas y seguridad de operación.

Criterios operacionales de éxito. (i) T_{prep} promedio por caso inferior al observado en preparación manual (*definir meta en función del baseline*); (ii) error angular por giro por debajo de un umbral preestablecido (*definir grados máximos permitidos*); (iii) incremento significativo en repeticiones útiles por sesión frente a manual; (iv) mejora en indicadores de aprendizaje (memorización/fluidez) y reducción de frustración reportada por los usuarios (p. ej., escalas tipo Likert) [7].

4. Propuesta de solución

Se propone el desarrollo de un sistema integrado, completo y fácil de usar que procese, analice y visualice de forma eficiente datos de diversas fuentes, centrándose en los patrones de quietud sísmica [8] [9] [10] [11], las anomalías del campo eléctrico [12] [13], las anomalías del campo magnético [14] [15] y las señales ionosféricas [16] como precursores específicos. Esta solución implicará varias etapas, incluyendo la recolección de datos muestreados y/o reportados, útiles para la implementación de algoritmos y así establecer patrones de comportamiento.

De acuerdo a lo ya mencionado anteriormente se propone:

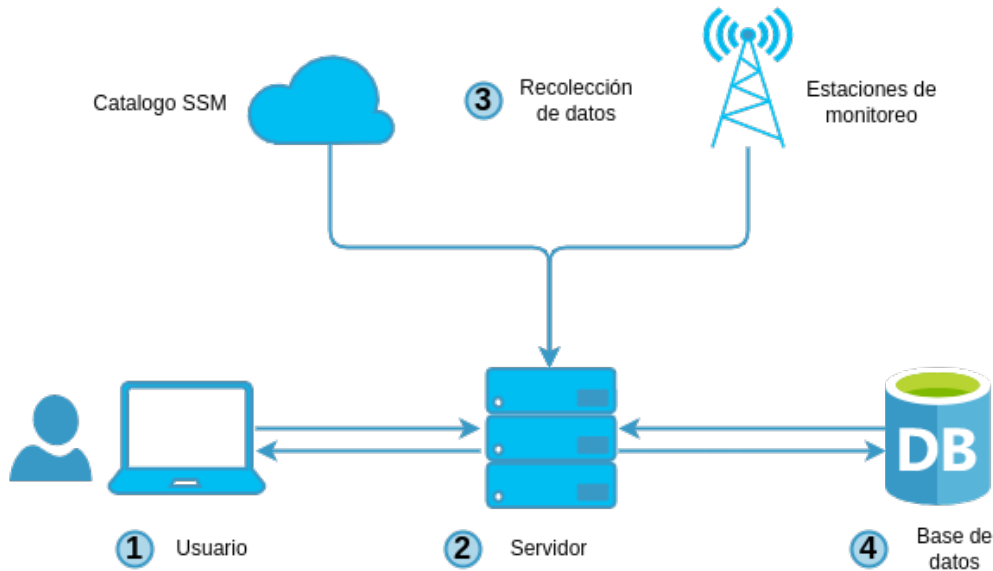


Figura 1: Propuesta de interacción de actores del sistema

- Visualización de los datos:

Los datos procesados deben presentarse en un formato gráfico para facilitar su interpretación. La integración de todos los componentes, desde la adquisición de datos hasta la visualización en un sistema podría implicar la creación de una aplicación web, software de escritorio u otras interfaces de usuario para mostrar las visualizaciones y permitir a los usuarios interactuar con el sistema. Adicionalmente hay que identificar los requisitos de visualización lo cual implica determinar los tipos de visualización necesarios, como gráficos, tablas o mapas. Elegir una biblioteca o herramienta de visualización tales como Plotly, Dygraphs y bokeh para visualizaciones basadas en web.

- Servidor:

Los datos recogidos se someterán a métodos y técnicas de caracterización para identificar patrones y correlaciones entre los distintos tipos de datos precursores. Los datos almacenados se procesarán y analizarán para extraer información significativa. Este proceso implicará el uso de métodos estadísticos avanzados de análisis de

patrones de sismicidad, análisis de correlaciones temporales y fractalidad de los datos muestreados para usar algoritmos de procesamiento conocidos de comportamiento que se centren en los precursores específicos mencionados anteriormente.

- **Recolección de datos:**

Para obtener los catálogos del Servicio Sismológico Nacional (datos para quietud sísmica), se utilizarán técnicas de web scraping. Este proceso implica el uso de herramientas y técnicas de programación para extraer datos de manera automatizada desde una página web [8] o bien un servicio de almacenamiento en la nube (como Google Drive o Dropbox) para las estaciones de monitoreo. Los datos adquiridos se almacenarán en una base de datos como se muestra en el inciso 4 de la figura 1. Además, se pueden incluir datos complementarios, como el clima, la fase lunar y los macrosismos de otras partes del mundo para revisar la correlación con los ocurridos en México. Para identificar las tareas de procesamiento y análisis, es necesario determinar las tareas específicas necesarias, como la limpieza, el filtrado, la agregación y el análisis estadístico. Para esto, se pueden utilizar bibliotecas o marcos de trabajo como Pandas, NumPy o SciPy para el procesamiento de datos basado en Python. Por último, es necesario implementar el procesamiento y el análisis, lo que implica escribir código para realizar las tareas necesarias en los datos almacenados.

- **Almacenamiento de datos:**

Una vez adquiridos los datos, hay que almacenarlos en una base de datos para su posterior procesamiento y análisis. Elegir una base de datos adecuada en función del formato de los datos y de los requisitos. Puede ser una base de datos relacional (por ejemplo, PostgreSQL, MySQL) o una base de datos NoSQL (por ejemplo, MongoDB, Cassandra) en función de la estructura de los datos y las necesidades de escalabilidad. Finalmente definir la estructura de las tablas o colecciones de la base de datos, especificando los campos y sus tipos de datos.

5. Objetivo general

Desarrollar un sistema unificado para la recolección, análisis y visualización de datos de múltiples fuentes relacionados con posibles precursores sísmicos, centrándose en patrones de quietud sísmica, anomalías del campo eléctrico, anomalías del campo magnético y señales ionosféricas, con el objetivo de mejorar la comprensión de ocurrencia de sismos en relación a sus posibles precursores.

5.1. Objetivos específicos

- Recolección de datos de eventos sísmicos, anomalías del campo eléctrico, anomalías del campo magnético, señales ionosféricas, y datos secundarios procedentes de diversas fuentes
- Procesamiento de datos recolectados aplicando algoritmos para el procesamiento y análisis de los datos de los posibles precursores sísmicos.
- Utilización de modelos matemáticos ya conocidos que incorporen los cálculos de posibles precursores sísmicos identificados para establecer patrones de comportamiento relevantes de dichos precursores.
- Creación de un sistema de visualización para mostrar los datos procesados de los posibles precursores sísmicos.

6. Marco teórico

Un sismo es un movimiento brusco de la corteza terrestre, provocado por la liberación de energía acumulada en forma de ondas sísmicas. Debido a la naturaleza no lineal y dinámica de los sismos, actualmente es imposible predecir con precisión dónde ocurrirán, cuál será su magnitud y el daño que podrían causar.

La República Mexicana se encuentra en una de las regiones sísmicas más activas del mundo, conocida como el Cinturón Circumpacífico. Esta alta actividad sísmica se debe a la interacción de varias placas tectónicas, incluyendo Norteamérica, Cocos, Pacífico, Rivera y Caribe, así como a fallas locales en varios estados. Los estados más afectados son Chiapas, Guerrero, Oaxaca, Michoacán, Colima y Jalisco, debido a la interacción de las placas oceánicas de Cocos y Rivera con Norteamérica y el Caribe en la costa del Pacífico. Aunque los epicentros se localizan en diversos puntos del Pacífico, la Ciudad de México, aunque no está en la costa, se ve afectada debido a su proximidad y a la naturaleza de su terreno. El estudio de la actividad sísmica en México comenzó a principios del siglo XX, y se inauguró la red sismológica mexicana en 1910. Actualmente, el Servicio Sismológico Nacional [8] opera una red de 35 estaciones sismológicas y reporta en promedio la ocurrencia de 4 sismos por día de magnitud $M > 3.0$. Además del SSN, existen otros grupos de investigación como el CICESE y la RESNOR que estudian la actividad sísmica en el Golfo de California y la falla de San Andrés, respectivamente. También hay instituciones educativas que realizan estudios de sismicidad regional y mantienen comunicación para compartir avances.

En las últimas décadas se han realizado numerosos estudios para identificar posibles precursores de sismos, que son fenómenos observables que preceden a los fenómenos sísmicos. Estos precursores abarcan los patrones de quietud sísmica [8], las anomalías en los campos eléctricos y magnéticos, las emisiones de gases/aerosoles, las señales ionosféricas, los cambios en el nivel de las aguas subterráneas, las variaciones de temperatura de la superficie, las deformaciones de la superficie, el comportamiento de los animales, las señales térmicas infrarrojas, las ondas gravitacionales atmosféricas y los relámpagos.

La investigación sistemática de los precursores de sismos comenzó en Japón en la década de 1960 y desde entonces se ha ampliado mediante colaboraciones internacionales identificando anomalías en la medición de diversas señales previas a la manifestación de un sismo de gran magnitud ($M_s \geq 6$) como Schall 1988, Varotsos 1993, McGuire 1994, Kagan 2008. A pesar de estas observaciones, la predicción sísmica sigue siendo un desafío futuro. Aunque todavía no se ha logrado un éxito concreto, el estudio de fenómenos potencialmente asociados a la ocurrencia de movimientos telúricos ha avanzado de manera progresiva, desarrollando y expandiendo nuevas redes de monitoreo en diversas áreas con alta actividad sísmica alrededor del mundo [17].

6.1. Posibles precursores sísmicos

6.1.1. Patrones de quietud sísmica

La quietud sísmica es un fenómeno caracterizado por una notable reducción de la actividad sísmica en una región concreta, que según algunos expertos podría servir de precursor de un gran ($M_s \geq 6$) sismo. El concepto subyacente es que una disminución de los eventos sísmicos menores puede preceder un sismo de gran magnitud ($M_s \geq 6$), ya que la tensión se acumula a lo largo de las fallas antes de desencadenarse finalmente en un evento sísmico significativo [18] [9] [10] [11].

6.1.2. Anomalías del campo eléctrico

Las anomalías del campo eléctrico se refieren a variaciones o perturbaciones inusuales en el campo eléctrico de la Tierra, que han sido observadas antes de algunos sismos. Algunos investigadores sugieren que estas anomalías podrían deberse a cambios inducidos por tensiones en la corteza terrestre, que provocan la generación de cargas eléctricas y alteraciones en el campo eléctrico terrestre [12] [13] se han estudiado en zonas como Grecia y Japon.

6.1.3. Anomalías del campo magnético

Las anomalías del campo magnético se refieren a cambios o variaciones inesperados en el campo magnético de la Tierra que se han observado en asociación con algunos sismos. Estas anomalías podrían estar relacionadas con cambios inducidos por tensiones en la corteza terrestre, que pueden alterar las propiedades magnéticas de las rocas y producir cambios en el campo magnético [14] [15].

6.1.4. Señales ionosféricas

La ionosfera es una región débilmente ionizada de la atmósfera terrestre, situada por encima de los 70-80 km de altitud donde los electrones libres y los iones forman un plasma. La ionización se produce principalmente por la radiación solar en el rango de los rayos X y el ultravioleta extremo. La densidad de electrones a distintas altitudes permite diferenciar cuatro regiones dentro de la ionosfera, cada una de las cuales posee densidades, alturas y frecuencias máximas de plasma distintas. Debido a su naturaleza no homogénea, la ionosfera puede ejercer efectos variables sobre las ondas electromagnéticas que viajan en su interior, lo que puede influir en la detección de anomalías asociadas a los sismos [16].

La ionosfera terrestre contiene una elevada concentración de iones y electrones libres que pueden interactuar con las ondas electromagnéticas. Algunos estudios han informado de cambios o perturbaciones inusuales en la ionosfera que preceden a ciertos sismos, como

fluctuaciones en el contenido total de electrones (TEC) o alteraciones en la propagación de las ondas de radio.

El acoplamiento litosfera-atmósfera-ionosfera describe la conexión física entre los fenómenos observados en la ionosfera y los seísmos que parecen desencadenarlos. Existen numerosas teorías en función del tipo de fenómeno considerado, pero la teoría más completa ha sido elaborada por Pulinets y Ouzounov. Las anomalías de conductividad creadas en la superficie terrestre se transfieren a la ionosfera a través del Circuito Eléctrico Global, un sistema cuasi estacionario de corrientes eléctricas entre la superficie y la ionosfera. La primera observación del impacto de un sismo en la ionosfera se produjo en 1964. Al principio, los investigadores se centraron en las anomalías observadas en los parámetros de las distintas capas, detectadas por ionosondas y radares, o in situ por satélites.

6.2. Elementos clave para la predicción de sismos

Allen propuso seis elementos clave que deben tenerse en cuenta en la predicción de sismos. [17] Estos elementos son

- Ventana temporal
La ventana temporal se refiere al periodo de tiempo dentro del cual se espera que se produzca un sismo. La estimación precisa de la ventana temporal es esencial para una preparación y respuesta eficaces ante las catástrofes.
- Ventana espacial
La ventana espacial indica la ubicación geográfica en la que se prevé que se produzca un sismo. La determinación precisa de la ventana espacial es crucial para orientar los esfuerzos de mitigación y respuesta.
- Ventana de magnitud
La ventana de magnitud representa la intensidad prevista del sismo. La estimación precisa de la ventana de magnitud es importante para comprender el impacto potencial y planificar las contramedidas adecuadas.
- Grado de confianza
El grado de confianza se refiere a la certeza con la que se realiza la predicción. Las predicciones de alto grado de confianza pueden ayudar a los responsables de la toma de decisiones a adoptar las medidas preventivas adecuadas y a asignar los recursos de forma eficaz.
- Sismos imprevisibles como sucesos aleatorios
La posibilidad de que se produzcan seísmos imprevisibles como sucesos aleatorios debe tenerse en cuenta a la hora de hacer predicciones, ya que puede afectar significativamente a la fiabilidad global de la previsión.
- Documentación accesible y comprensible
Una documentación fácilmente accesible y comprensible es fundamental para garantizar

la eficacia de las evaluaciones futuras y facilitar la toma de decisiones con conocimiento de causa.

La incorporación de estos elementos clave a la investigación sobre el análisis de sismos es esencial para garantizar que la información proporcionada sea precisa, fiable y útil para adoptar las medidas preventivas adecuadas.

7. Estado del Arte

En los últimos años, se han llevado a cabo varios proyectos e investigaciones para desarrollar sistemas que puedan detectar, medir y analizar precursores sísmicos, en esta sección, se presentan trabajos relacionados con el prototipo mencionado anteriormente, ya sea por el tema o por las tecnologías seleccionadas e implementadas en cada uno de ellos. Se elabora una tabla que incluye los aspectos relevantes que permiten respaldar la solución propuesta, seguida de una explicación y, finalmente, se muestran los proyectos relacionados que están actualmente en desarrollo. Algunos de los trabajos destacados en el campo incluyen:

7.1. TELESISMUX: Subsistema Telemático para una Estación Sísmica Remota

Este proyecto terminal presenta la investigación, diseño, desarrollo e implementación de un sistema telemático capaz de capturar, almacenar y transmitir información relativa a variables sísmicas medidas en una estación electrosísmica. El sistema integra un enlace de comunicación punto a punto entre un nodo en la estación sísmica y otro en el Laboratorio de Sistemas Complejos (UPIITA-IPN). También incluye un software de control y monitorización de los sistemas presentes en la estación sísmica y una aplicación web de acceso remoto. Este trabajo aborda los retos a los que se enfrentan los equipos de investigación en la recolección y transmisión de datos sísmicos para su posterior análisis. [19]

7.2. Sistema IoT para la medición, registro y visualización web de señales electromagnéticas, geo-eléctricas y acústicas asociadas a precursores sísmicos

Este proyecto propone el desarrollo de un sistema basado en IoT que pueda medir, registrar, almacenar y mostrar gráficos de señales electromagnéticas, geo-eléctricas y acústicas asociadas a precursores sísmicos. Los sensores y electrodos se colocan en regiones de alta actividad sísmica, y se implementa una interfaz web con servicios de almacenamiento en la nube. El sistema emplea el método VAN para medir señales electrosísmicas en la banda ULF del espectro electromagnético, diseña un sistema de inducción electromagnética para la banda VLF y registra señales acústicas terrestres. [20]

7.3. Sistema de monitoreo y registro de señales asociadas a precursores sísmicos en la costa mexicana del Pacífico

Un sistema que monitorea y registra diferentes señales relacionadas con precursores sísmicos, incluyendo señales geoelectricas, electromagnéticas y variables ambientales como la humedad relativa y la conductividad eléctrica del suelo. [21]

7.4. Anomalías en las señales electromagnéticas de baja frecuencia en la banda VLF

Un estudio que examina las anomalías en las señales electromagnéticas de baja frecuencia en la banda VLF y su relación con los sismos de gran magnitud, así como el diseño de un sistema para monitorear y registrar señales de la banda VLF y las señales geomagnéticas terrestres. [\[22\]](#)

Proyecto	Características principales	Contribución al trabajo actual
TELESISMUX	<ul style="list-style-type: none"> ■ Sistema telemático para estaciones sísmicas remotas ■ Captura, almacena y transmite información relacionada con variables sísmicas 	Base para el desarrollo del sistema de adquisición y transmisión de datos
Sistema IoT para la medición, registro y visualización web de señales electromagnéticas, geolétricas y acústicas asociadas a precursores sísmicos	<ul style="list-style-type: none"> ■ Sistema IoT integral ■ Medición, registro y visualización de señales electromagnéticas, geolétricas y acústicas ■ Sensores y electrodos en regiones de alta actividad sísmica 	Registro y visualización de precursores sísmicos
Sistema de monitoreo y registro de señales asociadas a precursores sísmicos en la costa mexicana del Pacífico	<ul style="list-style-type: none"> ■ Monitoreo y registro de señales geolétricas, electromagnéticas y variables ambientales ■ Análisis de la relación entre estas señales y eventos sísmicos 	Incorporación de análisis de variables ambientales en el estudio de precursores sísmicos
Anomalías en las señales electromagnéticas de baja frecuencia en la banda VLF	<ul style="list-style-type: none"> ■ Estudio de anomalías en señales electromagnéticas de baja frecuencia en la banda VLF ■ Diseño de sistemas para monitorear y registrar señales de la banda VLF y señales geomagnéticas terrestres ■ Análisis estadístico y de correlaciones temporales de las series de tiempo obtenidas 	Base para el análisis de señales electromagnéticas y su relación con eventos sísmicos

Tabla 1: Características principales de los proyectos relacionados y su contribución al trabajo actual

8. Escenario de pruebas

El escenario de pruebas se llevara a cabo con datos registrados o medidos en diferentes épocas en las que las estaciones de monitoreo han estado en funcionamiento. Los pasos a seguir son los siguientes:

Autenticación de usuario: El usuario inicia sesión y accede al panel de control del sistema.

Elección de precursor a analizar: Se selecciona el posible precursor sísmico como anomalías del campo eléctrico, magnético y señales ionosféricas de los datos que ya se cuenta.

Selección de región/fecha: El usuario elige una región de interés en un mapa interactivo (reservado a locaciones con datos de estaciones de monitoreo) así como la fecha mediante o menu desplegable de ventanas de tiempo válidas.

Análisis y estimación: El sistema ejecuta las rutinas que cada precursor requiere para realizar sus estimaciones.

Visualización de resultados: El sistema muestra gráficos, tablas y mapas para que los investigadores realicen las interpretaciones correspondientes.

Exportación de resultados: El usuario exporta los resultados en formatos PDF, CSV o imágenes segun corresponda.

Cierre de sesión: El usuario cierra sesión tras revisar los resultados.

Este escenario de prueba evalúa la funcionalidad, usabilidad, precisión y efectividad del sistema de análisis de precursores sísmicos y estimación de probabilidad de ocurrencia de sismo

9. Cronograma

Para el proyecto, se ha establecido un cronograma de actividades que será llevado a cabo por un solo estudiante. Es importante destacar que todas las actividades mencionadas se llevarán a cabo en el orden en que se presentan en el cronograma y se ajustarán según el tiempo disponible y la complejidad de cada tarea.

Numero de actividad	Agosto	Septiembre					Octubre					Noviembre				Diciembre			
	28	4	11	18	25	2	9	16	23	30	6	13	20	27	4	11	18		
1																			
2																			
3																			
4																			
5																			
6																			
7																			
8																			
9																			

Figura 2: Cronograma de actividades

No actividad	Nombre de tarea	Objetivo	Resultados esperados
1	Análisis y requerimientos del sistema	Determinar y explicar los procesos que se llevarán a cabo dentro del sistema y el comportamiento de los actores. Enumerar los requisitos que debe cumplir el sistema para un buen funcionamiento.	Diagramados que describan los procesos del sistema y el comportamiento de los actores (Casos de uso, secuencia, entre otros), ocupando diagramado UML. Listado con los elementos que requiere el sistema, así como los aspectos que debe cumplir.
2	Recopilación de datos de precursores sísmicos	Recopilar información relevante	Obtener datos para seleccionar base de datos
3	Diseño del esquema de base de datos	Diseñar una estructura adecuada para almacenar los datos recopilados	Esquema de base de datos diseñado y tablas o colecciones creadas
4	Selección de servidor	Análisis y elección de servidor, contratación de un servicio en la nube o montar un servidor local	Tener un sistema de servidor adecuado y eficiente que satisfaga las necesidades
5	Aplicación de métodos estadísticos avanzados	Analizar patrones de sismicidad y correlaciones temporales	Resultados del análisis estadístico de los datos
6	Análisis de precursores sísmicos específicos	Utilizar modelos matemáticos y algoritmos para analizar precursores sísmicos	Resultados del análisis de precursores sísmicos
7	Identificación de requisitos de visualización	Determinar qué tipos de gráficos, tablas o mapas son necesarios	Requisitos de visualización identificados
8	Elección de biblioteca o herramienta de visualización	Seleccionar una herramienta para crear visualizaciones basadas en web	Herramienta de visualización seleccionada
9	Integración del sistema	Unir todos los componentes en un sistema unificado	Sistema integrado y funcional

Tabla 2: Cronograma de actividades

10. Glosario de términos

- Acoplamiento litosfera-atmósfera-ionosfera: Describe la conexión física entre los fenómenos observados en la ionosfera y los sismos que parecen desencadenarlos.
- Anomalías del campo eléctrico: Cambios inusuales en el campo eléctrico terrestre que podrían estar relacionados con la actividad sísmica.
- Anomalías del campo magnético: Cambios inusuales en el campo magnético terrestre que podrían estar relacionados con la actividad sísmica.
- Cinturón Circumpacífico: También conocido como el 'Cinturón de Fuego del Pacífico', es el área geográficamente más activa del mundo en términos de sismicidad y actividad volcánica.
- Contenido Total de Electrones (TEC): Medida de la cantidad total de electrones libres en la atmósfera terrestre entre dos puntos, a menudo usada en estudios de anomalías ionosféricas.
- Epicentro: Punto en la superficie de la Tierra directamente por encima del hipocentro o foco de un sismo.
- Grado de Confianza: Medida de la certeza con la que se realiza una predicción sísmica.
- Placas tectónicas: Grandes placas de roca sólida que componen la superficie de la Tierra, cuyos movimientos y interacciones pueden causar sismos.
- Precursor sísmico: Fenómeno observable que ocurre antes de un sismo y que podría indicar su inminencia.
- Señales ionosféricas: Variaciones en las propiedades de la ionosfera, como la densidad de electrones, que podrían estar relacionadas con la actividad sísmica.
- Servicio Sismológico Nacional (SSN): Organización encargada de registrar, analizar y reportar la actividad sísmica en México.
- Ventana Espacial: Ubicación geográfica en la que se prevé que se produzca un sismo en un modelo de predicción.
- Ventana de Magnitud: Rango de magnitudes dentro del cual se espera que caiga la magnitud de un sismo en un modelo de predicción.
- Ventana Temporal: Período de tiempo dentro del cual se espera que se produzca un sismo en un modelo de predicción.
- Web scraping: Técnicas y herramientas de programación utilizadas para extraer datos de manera automatizada desde páginas web.

Referencias

- [1] H. Reese. «A Brief History of the Rubik's Cube.» *Smithsonian Magazine*, 25-Sep-2020. (2020), dirección: <https://www.smithsonianmag.com/innovation/brief-history-rubiks-cube-180975875/>.
- [2] K. Boyce y C. Storm, «Rubik's Cube: What separates the fastest solvers from the rest?» *Journal of Emerging Investigators*, vol. 5, págs. 3-4, 2022, Análisis de pausas y tiempos por etapa.
- [3] D. Perdomo, «La mecatrónica en la ingeniería contemporánea,» *Ingeniería Mecánica*, vol. 1, págs. 7-9, 2003.
- [4] A. G. Aliaga, «Diseño y desarrollo de un sistema robotizado capaz de resolver un cubo de Rubik mediante un robot colaborativo y visión artificial,» Trabajo Final de Grado, Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño, Universitat Politècnica de València (ETSID-UPV), 2023.
- [5] M. D. P. S. Mera, «El impacto de los juegos matemáticos en el desarrollo de habilidades de resolución de problemas en estudiantes de educación básica,» *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, vol. 8, n.º 5, sep. de 2024, ISSN 2707-2207 / ISSN 2707-2215 (en línea). DOI: [10.37811/cl_rcm.v8i5](https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v8i5).
- [6] J. A. A. Robles, L. G. C. Ramírez y C. F. Nava, «La ingeniería mecatrónica como fundamento en la transición hacia la industria 4.0,» en *Memorias del Congreso Internacional de Investigación Academia Journals Celaya 2019*, Noviembre 6–8, Academia Journals, Celaya, Guanajuato, México, nov. de 2019.
- [7] K. Boyce y C. Storm, «Rubik's Cube: What separates the fastest solvers from the rest?» *Journal of Emerging Investigators*, vol. 5, 2022.
- [8] Servicio Sismológico Nacional (SSN), *Sismos fuertes*, <http://www2.ssn.unam.mx:8080/sismos-fuertes/>, Universidad Nacional Autónoma de México, s.f. (visitado 21-04-2023).
- [9] K. C. McNally, «Seismic gaps in space and time,» *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, vol. 11, n.º 1, págs. 359-369, 1983.
- [10] M. Wyss, «Cannot earthquakes be predicted?» *Science*, vol. 278, n.º 5337, págs. 487-490, 1997.
- [11] C. Scholz, «Whatever happened to earthquake prediction?» *Geotimes*, vol. 42, n.º 3, págs. 16-19, 1997.
- [12] P. Varotsos y K. Alexopoulos, «Physical properties of the variations of the electric field of the earth preceding earthquakes, I,» *Tectonophysics*, vol. 110, n.º 1-2, págs. 73-98, 1984.
- [13] E. Yépez, F. Angulo-Brown, J. Peralta, C. Pavia y G. González-Santos, «Electric field patterns as seismic precursors,» *Geophysical research letters*, vol. 22, n.º 22, págs. 3087-3090, 1995.

- [14] M. Hayakawa, T. Ito y N. Smirnova, «Fractal analysis of ULF geomagnetic data associated with the Guam earthquake on August 8, 1993,» *Geophysical Research Letters*, vol. 26, n.º 18, págs. 2797-2800, 1999.
- [15] M. Hayakawa, K. Hattori y K. Ohta, «Monitoring of ULF (ultra-low-frequency) geomagnetic variations associated with earthquakes,» *Sensors*, vol. 7, n.º 7, págs. 1108-1122, 2007.
- [16] K. Eftaxias, P. Kaporis, J. Polygiannakis et al., «Experience of short term earthquake precursors with VLF–VHF electromagnetic emissions,» *Natural Hazards and Earth System Sciences*, vol. 3, n.º 3/4, págs. 217-228, 2003.
- [17] A. Bhardwaj, L. Sam y F. J. Martin-Torres, «The challenges and possibilities of earthquake predictions using non-seismic precursors,» *The European Physical Journal Special Topics*, vol. 230, págs. 367-380, 2021. DOI: [10.1140/epjst/e2020-000257-3](https://doi.org/10.1140/epjst/e2020-000257-3).
- [18] Servicio Geológico Mexicano, *Causas, Características e Impactos de los Riesgos Geológicos*, Accedido el 24 de abril de 2023, s.f. dirección: <https://www.sgm.gob.mx/Web/MuseoVirtual/Riesgos-geologicos/Causas-caracteristicas-e-impactos.html>.
- [19] J. D. Valencia Pesqueira, *TELESISMUX: Subsistema telemático para una estación sísmica remota*, Trabajo Terminal, Instituto Politécnico Nacional, Unidad Profesional Interdisciplinaria en Ingeniería y Tecnologías Avanzadas, México, D.F.: Instituto Politécnico Nacional, 2012.
- [20] I. Pérez Sánchez, *Sistema IoT para la medición, registro y despliegue web de señales electromagnéticas, geo-eléctricas y acústicas asociadas a precursoros sísmicos*, Proyecto Terminal 2, Instituto Politécnico Nacional, Unidad Profesional Interdisciplinaria en Ingeniería y Tecnologías Avanzadas, Para obtener el título de Ingeniero en Telemática, 2022.
- [21] B. Guerrero Olvera y J. F. Reséndiz Facio, *Sistema de monitoreo y registro de señales asociadas a precursoros sísmicos en la costa mexicana del Pacífico*, Trabajo Terminal II, Instituto Politécnico Nacional, Unidad Profesional Interdisciplinaria en Ingeniería y Tecnologías Avanzadas, México, D.F.: Instituto Politécnico Nacional, 2019.
- [22] G. A. De León Ramírez y J. H. Domínguez Delgadillo, *Sistema para el monitoreo y registro de señales electromagnéticas asociadas a precursoros sísmicos*, Trabajo Terminal II, Instituto Politécnico Nacional, Unidad Profesional Interdisciplinaria en Ingeniería y Tecnologías Avanzadas, Ciudad de México: Instituto Politécnico Nacional, 2020.