UNIVERSIDAD PRIVADA DE TACNA

ESCUELA DE POSTGRADO

MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL CON MENCIÓN EN ESTRUCTURAS

INCORPORACIÓN DE SISTEMAS DE MONITOREO DE SALUD ESTRUCTURAL A BAJO COSTO COMO PROPUESTA NORMATIVA EN EDIFICACIONES, DISTRITO DE MOQUEGUA, 2025

TESIS

Presentada por:

Bach. Melissa Delcy Vilca Mamani
ORCID: 0009-0009-1334-6397

Bach. Jazmín del Rosario Santos Navarro
ORCID: 0009-0006-9177-3974

Asesor:

Mtra. Dina Marlene Cotrado Flores
ORCID: 0000-0002-4262-5733

Para obtener el grado académico de:

MAESTRO EN INGENIERÍA CIVIL CON MENCIÓN EN ESTRUCTURAS

TACNA - PERÚ

2025

UNIVERSIDAD PRIVADA DE TACNA

ESCUELA DE POSTGRADO

MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL CON MENCIÓN EN ESTRUCTURAS

INCORPORACIÓN DE SISTEMAS DE MONITOREO DE SALUD ESTRUCTURAL A BAJO COSTO COMO PROPUESTA NORMATIVA EN EDIFICACIONES, DISTRITO DE MOQUEGUA, 2025

TESIS

Presentada por:

Bach. Melissa Delcy Vilca Mamani
ORCID: 0009-0009-1334-6397

Bach. Jazmín del Rosario Santos Navarro
ORCID: 0009-0006-9177-3974

Asesor:

Mtra. Dina Marlene Cotrado Flores
ORCID: 0000-0002-4262-5733

Para obtener el grado académico de:

MAESTRO EN INGENIERÍA CIVIL CON MENCIÓN EN ESTRUCTURAS

TACNA - PERÚ

2025

UNIVERSIDAD PRIVADA DE TACNA

ESCUELA DE POSTGRADO

MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL CON MENCIÓN EN ESTRUCTURAS

Tesis

"INCORPORACIÓN DE SISTEMAS DE MONITOREO DE SALUD ESTRUCTURAL A BAJO COSTO COMO PROPUESTA NORMATIVA EN EDIFICACIONES, DISTRITO DE MOQUEGUA, 2025"

Presentada por:

Bach. Melissa Delcy Vilca Mamani

Bach. Jazmín del Rosario Santos Navarro

Tesis sustentada y aprobada el 18 de noviembre de 2025; ante el siguiente jurado examinador:

PRESIDENTE: Dr. Pedro Valerio MAQUERA CRUZ

SECRETARIO: Mag. José Martin VELÁSQUEZ VARGAS

VOCAL: Mtro. Edgar Hipólito CHAPARRO QUISPE

ASESOR: Mtra. Dina Marlene COTRADO FLORES

DECLARACIÓN JURADA DE ORIGINALIDAD

Nosotras Melissa Delcy Vilca Mamani y Jazmín del Rosario Santos Navarro, en calidad de: Maestristas de la maestría en ingeniería civil con mención en estructurasde la Escuela de Postgrado de la Universidad Privada de Tacna, identificadas con DNI 43921316 y DNI 71239497 respectivamente

Somos autores de la tesis titulada: Incorporación de sistemas de monitoreo de salud estructural a bajo costo como propuesta normativa en edificaciones, distrito de Moquegua, 2025, con asesora: Dina Marlene Cotrado Flores.

DECLARO BAJO JURAMENTO

Somos las únicas autoras del texto entregado para obtener el grado académico de maestro en ingeniería civil con mención en estructuras, y que tal texto no ha sido entregado ni total ni parcialmente para obtención de un grado académico en ninguna otra universidad o instituto, ni ha sido publicado anteriormente para cualquier otro fin.

Así mismo, declaramos no haber trasgredido ninguna norma universitaria con respecto al plagio ni a las leyes establecidas que protegen la propiedad intelectual.

Declaramos, que después de la revisión de la tesis con el software Turnitin se declara 02% de similitud, además que el archivo entregado en formato PDF corresponde exactamente al texto digital que presento junto al mismo.

Por último, declaramos que para la recopilación de datos se ha solicitado la autorización respectiva a la empresa u organización, evidenciándose que la información presentada es real y soy conocedora de las sanciones penales en caso de infringir las leyes del plagio y de falsa declaración, y que firmo la presente con pleno uso de mis facultades y asumiendo todas las responsabilidades de ella derivada.

Por lo expuesto, mediante la presente asumo frente a LA UNIVERSIDAD cualquier responsabilidad que pudiera derivarse por la autoría, originalidad y veracidad del contenido de la tesis, así como por los derechos sobre la obra o invención presentada. En consecuencia, nos hacemos responsables frente a LA UNIVERSIDAD y a terceros, de cualquier daño que pudiera ocasionar, por el incumplimiento de lo declarado o que pudiera encontrar como causa del trabajo presentado, asumiendo todas las cargas pecuniarias que pudieran derivarse de ello en favor de terceros con motivo de acciones, reclamaciones o conflictos derivados del incumplimiento de lo declarado o las que encontrasen causa en el contenido de la tesis, libro o invento.

De identificarse fraude, piratería, plagio, falsificación o que el trabajo de investigación haya sido publicado anteriormente; asumimos las consecuencias y sanciones que de mi acción se deriven, sometiéndome a la normatividad vigente de la Universidad Privada de Tacna.

Lugar y fecha: Tacna 18 de noviembre del 2025

Nombres y apellidos : Melissa Delcy Vilca Mamani

DNI : 43921316

Nombres y apellidos : Jazmín del Rosario Santos Navarro

DNI : 71239497

DEDICATORIA

Dedicamos este trabajo a nuestras familias, pilares fundamentales en nuestra formación, por su apoyo incondicional y confianza en cada etapa de este camino.

A quienes nos guiaron académicamente, por sembrar en nosotros el compromiso y la pasión por aprender.

Y a todas las personas que, de distintas formas, hicieron posible que hoy estemos culminando esta etapa.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios por darme la fuerza para culminar esta etapa.

A mi familia, por su amor, apoyo incondicional y confianza en mí.

A mis docentes y asesores, por su guía y conocimientos compartidos.

Y a todos los que, de una u otra forma, fueron parte de este logro.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

CARÁTULA DE LA TESIS i

PÁGINA DE RESPETO ii

CARÁTULA INTERIOR iii

PÁGINA DEL JURADO iv

PÁGINA DE DECLARACIÓN DE ORIGINALIDAD v

PÁGINA DE DEDICATORIA vii

PÁGINA DE AGRADECIMIENTOS viii

ÍNDICE DE CONTENIDOS ix

ÍNDICE DE TABLAS xii

ÍNDICE DE FIGURAS xiii

ÍNDICE DE APÉNDICES xiv

RESUMEN. PALABRAS CLAVE xv

ABSTRACT. KEYWORDS xvi

INTRODUCCIÓN 1

CAPÍTULO I: EL PROBLEMA 4

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA 4

1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA 6

1.2.1. Interrogante principal 7

1.2.2. Interrogantes secundarias 7

1.3. JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN 7

1.4. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN 10
1.4.1. Objetivo General..... 10
1.4.2. Objetivos Específicos 10
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO..... 11
2.1. ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN 11
2.2. BASES TEÓRICAS 17
2.3. DEFINICIÓN DE CONCEPTOS..... 25
CAPÍTULO III: MARCO METODOLÓGICO..... 27
3.1. HIPÓTESIS 27
3.1.1. Hipótesis General..... 27
3.1.2. Hipótesis Específicas 27
3.2. OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES..... 28
3.2.1. Identificación de la variable independiente 28
3.2.2. Identificación de la variable dependiente 31
2.1.1 Variables intervinientes..... 34
3.3. TIPO DE INVESTIGACIÓN..... 35
3.4. NIVEL DE INVESTIGACIÓN..... 35
3.5. DISEÑO DE INVESTIGACIÓN 35
3.6. ÁMBITO Y TIEMPO SOCIAL DE LA INVESTIGACIÓN 36
3.7. POBLACIÓN Y MUESTRA 36
3.7.1. Unidad de estudio 36
3.7.2. Población 37
3.7.3. Muestra 37
3.8. TÉCNICAS DE RECOLECCIÓN DE DATOS..... 38
3.8.1. Procedimiento..... 38

3.8.2. Técnicas 39
3.8.3. Instrumentos 40
CAPÍTULO IV. RESULTADOS 41
4.1. DESCRIPCIÓN DEL TRABAJO DE CAMPO..... 41
4.2. DISEÑO DE LA PRESENTACIÓN DE LOS RESULTADOS. 42
4.3. RESULTADOS 45
4.4. PRUEBA ESTADÍSTICA..... 50
4.5. COMPROBACIÓN DE LA HIPÓTESIS 51
4.6. DISCUSIÓN DE RESULTADOS 56
CONCLUSIONES..... 61
RECOMENDACIONES 64
REFERENCIAS 66
APÉNDICE 74
- Matriz de consistencia del informe final de tesis..... 75
- Instrumentos utilizados..... 76
- Matriz de datos. 80

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Resultados del Monitoreo Dinámico en los Bloques B, C y D 45
Tabla 2 Características Técnicas Del Sistema De Monitoreo..... 46
Tabla 3 Comparación De Desplazamientos Y Factor De Corrección 48
Tabla 4 Criterios De Reforzamiento Estructural 49

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Vista aérea de la población de estudio (bloques A, B, C y D del proyecto municipal) 37

Figura 2 Muestra Fotografía del Bloque B – Uno de los bloques seleccionados como muestra 38

ÍNDICE DE APÉNDICES

- Matriz de consistencia del informe final de tesis. 76

- Instrumentos utilizados. 78

- Matriz de datos. 82

RESUMEN. PALABRAS CLAVE

La presente investigación tuvo como objetivo general incorporar sistemas de monitoreo de la salud estructural de bajo costo como propuesta normativa en edificaciones del distrito de Moquegua, 2025. Se desarrolló un estudio de tipo básico, nivel explicativo y diseño no experimental–transversal, mediante la instrumentación de tres bloques estructurales representativos con sensores de aceleración, desplazamiento e inclinación.

Las señales registradas se procesaron con software especializado, obteniendo espectros de aceleración, desplazamientos reales y variaciones de rigidez, que luego se compararon con los parámetros previstos por el diseño estructural según la normativa vigente. Los resultados muestran que el sistema de monitoreo alcanzó márgenes de error inferiores al 5 % y coeficientes de determinación R^2 mayores a 0.90, lo que evidencia una alta precisión y confiabilidad en la medición de la respuesta dinámica.

Asimismo, se identificaron zonas críticas donde los desplazamientos reales superaron los valores normativos, obteniéndose un factor de corrección promedio de 1.13 y proponiéndose criterios puntuales de reforzamiento estructural. En conclusión, los hallazgos respaldan la viabilidad técnica y práctica de incorporar sistemas de monitoreo estructural de bajo costo en la normativa peruana, como herramienta para el seguimiento continuo, la toma de decisiones de mantenimiento y la reducción del riesgo sísmico en edificaciones del distrito de Moquegua.

Palabras clave. monitoreo estructural, riesgo sísmico, reforzamiento estructural, normativa técnica, sensores estructurales.

ABSTRACT. KEYWORDS

This research aimed to incorporate low-cost structural health monitoring systems as a normative proposal for buildings in the district of Moquegua, 2025. A basic, explanatory-level, non-experimental–cross-sectional study was carried out by instrumenting three representative structural blocks with acceleration, displacement, and inclination sensors.

The recorded signals were processed using specialized software to obtain acceleration spectra, real displacements, and stiffness variations, which were then compared with the parameters established in the structural design according to current Peruvian seismic codes. The results show that the monitoring system achieved error margins below 5% and determination coefficients R^2 greater than 0.90, demonstrating high accuracy and reliability in measuring the dynamic response.

Critical zones were also identified where real displacements exceeded normative values, yielding an average correction factor of 1.13 and enabling the proposal of specific structural strengthening criteria.

In conclusion, the findings support the technical and practical feasibility of incorporating low-cost structural health monitoring systems into Peruvian building regulations, as an effective tool for continuous structural tracking, evidence-based maintenance decisions, and seismic risk reduction in buildings located in the district of Moquegua.

Keywords. structural monitoring, seismic risk, structural reinforcement, technical standards, structural sensors.

INTRODUCCIÓN

El territorio peruano se encuentra ubicado en el Cinturón de Fuego del Pacífico, una de las regiones de mayor actividad sísmica en el mundo. De acuerdo con el Instituto Geofísico del Perú (IGP), entre los años 2000 y 2020 se registraron más de 44 000 sismos a nivel nacional, de los cuales más de 150 tuvieron magnitudes mayores a 5.5 grados (IGP, 2021). Esta realidad representa un desafío constante para la seguridad estructural de miles de construcciones que, en su mayoría, han sido diseñadas bajo criterios convencionales que no siempre permiten anticipar el deterioro estructural progresivo o los efectos acumulativos de eventos sísmicos recurrentes.

En este contexto, el monitoreo de la salud estructural (SHM) surge como una alternativa tecnológica clave para mejorar el control y evaluación del desempeño estructural. Este sistema permite, a través de sensores estratégicamente ubicados, registrar parámetros como aceleraciones, desplazamientos y deformaciones, generando información cuantitativa en tiempo real sobre el comportamiento dinámico de las estructuras. Sin embargo, en el Perú su implementación aún es limitada, tanto por el desconocimiento técnico como por la falta de lineamientos normativos que promuevan su aplicación, especialmente en edificaciones comunes o de uso público ubicadas en zonas de alto riesgo sísmico.

La ciudad de Moquegua, situada en la zona sur del país, presenta un nivel de amenaza sísmica alto. Según el Centro Nacional de Estimación, Prevención y Reducción del Riesgo de Desastres (CENEPRED, 2020), Moquegua es una de las regiones con mayor exposición a sismos destructivos, con una probabilidad significativa de ocurrencia de un evento de gran magnitud en los próximos años. A pesar de ello, muchas de sus construcciones no cuentan con sistemas de monitoreo

estructural, y el marco normativo nacional —como el Reglamento Nacional de Edificaciones (RNE)— no contempla aún lineamientos específicos para la incorporación de tecnologías SHM de bajo costo.

Frente a esta situación, el presente estudio tiene como objetivo general analizar la viabilidad de incorporar sistemas de monitoreo de salud estructural a bajo costo como propuesta normativa en edificaciones del distrito de Moquegua, 2025. Para ello, se ha planteado la instalación de un sistema de monitoreo accesible en un bloque estructural representativo de una infraestructura pública existente, con el fin de registrar su comportamiento dinámico y evaluar los parámetros clave que permitan sustentar técnica y funcionalmente la incorporación de dichos sistemas al marco normativo vigente.

Esta investigación se justifica desde el punto de vista técnico, económico y social. Técnicamente, se busca complementar el diseño estructural tradicional con evidencia empírica obtenida a través de sistemas SHM. Económicamente, el uso de tecnologías de bajo costo permite su implementación sin comprometer los presupuestos institucionales. Socialmente, se mejora la capacidad de respuesta frente a eventos sísmicos, protegiendo la vida de los usuarios y prolongando la vida útil de las estructuras. A nivel normativo, se propone sentar las bases para el desarrollo de un capítulo específico sobre monitoreo estructural en el RNE, considerando los avances tecnológicos ya aplicados en otros países.

En cuanto a la estructura del documento, el trabajo se organiza en cinco capítulos. El Capítulo I desarrolla el planteamiento del problema, los objetivos, la justificación, la hipótesis y la delimitación del estudio. El Capítulo II presenta los antecedentes, la base teórica y el marco conceptual. El Capítulo III expone la metodología, incluyendo el tipo, nivel y diseño de investigación, así como la población, muestra, técnicas e instrumentos de recolección de datos. El Capítulo IV contiene el análisis de resultados y el desarrollo de la propuesta normativa. Finalmente, el Capítulo V presenta las conclusiones, recomendaciones y referencias bibliográficas.

Con esta propuesta, se espera aportar al desarrollo de una normativa más actualizada, basada en el monitoreo estructural como herramienta preventiva y correctiva, alineada a los principios de sostenibilidad, seguridad estructural y gestión del riesgo.

CAPÍTULO I: EL PROBLEMA

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Descripción de la realidad problemática

A nivel mundial, los desastres naturales de origen sísmico representan una de las mayores amenazas para la seguridad de las infraestructuras urbanas. Según la Oficina de las Naciones Unidas para la Reducción del Riesgo de Desastres (UNDRR, 2021), más del 60 % de las pérdidas económicas por desastres se relacionan con terremotos y colapsos estructurales. Esta situación evidencia una creciente necesidad de adoptar tecnologías de evaluación y prevención estructural que superen el diseño convencional y se enfoquen en la vigilancia continua del comportamiento real de las estructuras.

En América Latina, países como México, Chile y Ecuador han experimentado eventos sísmicos de gran magnitud que pusieron a prueba la resistencia de miles de construcciones. En respuesta, diversas investigaciones y políticas públicas han promovido la implementación de sistemas de monitoreo estructural que permitan evaluar dinámicamente el estado de las edificaciones, anticipar fallas y tomar decisiones oportunas sobre su refuerzo o evacuación. No obstante, estas soluciones aún no se han estandarizado normativamente en la mayoría de países del continente, especialmente en aquellos con recursos limitados.

En el caso del Perú, la alta sismicidad asociada a la convergencia de las placas de Nazca y Sudamericana ubica al país dentro de las zonas de mayor amenaza sísmica a nivel global. Entre 2000 y 2020 se registraron más de 44 000 sismos en territorio nacional, y se estima que aproximadamente el 80 % de las viviendas no cumplen con criterios formales de diseño estructural (IGP, 2021; CENEPRED, 2022). Si bien el Reglamento Nacional de Edificaciones (RNE) establece

parámetros técnicos mínimos para diseño sismorresistente, no contempla aún lineamientos para la incorporación de sistemas de monitoreo de salud estructural, limitando así las capacidades de control y diagnóstico estructural en tiempo real.

En el ámbito local, el distrito de Moquegua presenta un nivel de exposición sísmica elevado, con antecedentes de eventos destructivos y una alta densidad de estructuras públicas vulnerables. A pesar de ello, no se ha desarrollado ninguna iniciativa normativa que impulse el uso de sistemas de monitoreo estructural, a pesar de existir soluciones tecnológicas de bajo costo que ya han sido validadas internacionalmente. Esta carencia normativa y técnica genera una brecha en la capacidad de respuesta ante sismos, afectando directamente la seguridad de las construcciones, el patrimonio público y la integridad de la población usuaria.

Ante esta situación, resulta fundamental analizar el comportamiento dinámico de una estructura representativa mediante un sistema de monitoreo de bajo costo, y a partir de ello, plantear lineamientos técnicos para su posible incorporación normativa. El estudio en Moquegua representa una oportunidad concreta de evidenciar la viabilidad técnica y funcional de estos sistemas como herramienta preventiva y complementaria al diseño estructural tradicional.

Identificación el problema

La ciudad de Moquegua se encuentra en una zona de alta peligrosidad sísmica, lo que exige un control riguroso del comportamiento estructural de las construcciones. Sin embargo, gran parte de las estructuras, especialmente las de uso público, no cuentan con tecnologías de monitoreo continuo que permitan evaluar su desempeño frente a cargas dinámicas reales. Esta limitación impide detectar a tiempo fallos estructurales progresivos y dificulta la planificación de intervenciones correctivas, incrementando el riesgo para la seguridad de los usuarios.

A nivel internacional, el uso de sistemas de monitoreo de salud estructural (SHM) ha demostrado ser una herramienta eficaz para observar el comportamiento dinámico de las estructuras en tiempo real. Diversos estudios, como los realizados por López et al. (2021), Barrera (2022) y Sarhosis & Lemos (2018), destacan que

el registro continuo de parámetros como frecuencia natural, desplazamientos y deformaciones, permite identificar alteraciones significativas en el desempeño estructural. Además, la tendencia en países con alta actividad sísmica ha sido incorporar estos sistemas no solo en edificaciones estratégicas, sino también en construcciones convencionales mediante soluciones de bajo costo.

En el caso del Perú, si bien el Reglamento Nacional de Edificaciones (RNE) establece criterios de diseño sismorresistente, aún no contempla directrices específicas para la incorporación de sistemas SHM. Esta ausencia normativa representa una brecha técnica que impide aprovechar los beneficios de esta tecnología, especialmente en zonas críticas como el distrito de Moquegua. A pesar de existir soluciones tecnológicas accesibles, validadas en diversos contextos, no se ha normado su aplicación ni incentivado su implementación.

Por ello, el presente estudio se enfoca en la necesidad de incorporar lineamientos normativos que permitan aplicar sistemas de monitoreo de salud estructural de bajo costo en edificaciones del distrito de Moquegua. Esta incorporación permitiría mejorar la capacidad de evaluación estructural, reducir la vulnerabilidad sísmica y fortalecer la toma de decisiones técnicas sobre mantenimiento y refuerzo.

El problema se delimita al análisis técnico y normativo de una estructura representativa ubicada en el distrito de Moquegua, considerando únicamente edificaciones con características estructurales típicas de uso institucional. Se excluirán edificaciones patrimoniales, de gran altura o infraestructuras con sistemas SHM ya integrados. Asimismo, la investigación se orienta al año 2025, teniendo en cuenta la vigencia del marco normativo actual y los desafíos específicos de la zona.

En consecuencia, se plantea como problema central la falta de criterios normativos que regulen la implementación de sistemas de monitoreo estructural de bajo costo en el contexto local de Moquegua, limitando con ello la prevención de daños, el fortalecimiento estructural y la gestión eficiente del riesgo sísmico.

1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

1.2.1. Interrogante principal

PG. ¿Cómo incorporar sistemas de monitoreo de salud estructural a bajo costo como propuesta normativa en edificaciones del distrito de Moquegua, 2025?

1.2.2. Interrogantes secundarias

PE1. ¿Cómo evaluar la precisión y confiabilidad de sistemas de monitoreo de la salud estructural de bajo costo en la medición de espectros de aceleración bajo diferentes frecuencias y desplazamientos en edificaciones del distrito de Moquegua?

PE2. ¿Cómo identificar las características técnicas de los sistemas de monitoreo de la salud estructural de bajo costo viables para su incorporación normativa en edificaciones del distrito de Moquegua?

PE3. ¿Cómo determinar el factor de corrección derivado del análisis dinámico a partir de los desplazamientos reales registrados por sistemas de monitoreo de la salud estructural de bajo costo en edificaciones del distrito de Moquegua?

PE4. ¿Cómo proponer criterios de reforzamiento estructural en edificaciones del distrito de Moquegua, basados en los resultados del análisis sísmico obtenido mediante sistemas de monitoreo de la salud estructural de bajo costo?

1.3. JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

La presente investigación se justifica desde diversas perspectivas: tecnológica, económica, social, técnica y ambiental, todas ellas alineadas con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), en especial el ODS 9: Industria, Innovación e Infraestructura.

La Justificación Tecnológica

La alta sismicidad de origen tectónico que caracteriza al Perú plantea un desafío continuo en el diseño y construcción de edificaciones seguras y sostenibles.

En este contexto, la implementación de sistemas de monitoreo de la salud estructural de bajo costo se presenta como una solución tecnológica innovadora, que permite detectar de manera temprana posibles fallas estructurales, optimizando así las acciones de mantenimiento, evaluación y reforzamiento sísmico. La aplicación de estos sistemas en edificaciones del distrito de Moquegua cobra especial relevancia, debido a su exposición constante a eventos sísmicos y a la necesidad de fortalecer la gestión del riesgo desde un enfoque normativo y preventivo.

Estos sistemas, basados en el enfoque del diseño sísmico por desplazamientos, permiten monitorear en tiempo real deformaciones y desplazamientos estructurales, facilitando una evaluación precisa del comportamiento frente a eventos sísmicos. Al integrar espectros de aceleración, velocidad y desplazamiento provenientes de registros históricos, se mejora la capacidad de diagnóstico y la toma de decisiones estructurales, incrementando la seguridad sin comprometer los costos de implementación.

La Justificación Económica

Esta investigación también se justifica por el impacto económico positivo que puede generar. Los sistemas de monitoreo estructural de bajo costo ofrecen una solución rentable frente a los desafíos de mantenimiento y supervisión, permitiendo reducir costos operativos y evitar intervenciones correctivas mayores. Al detectar y corregir problemas estructurales de manera anticipada, se optimiza el uso de recursos y se protege la inversión en infraestructura pública. En el contexto del distrito de Moquegua, este enfoque resulta especialmente valioso dada la necesidad de soluciones eficientes con presupuestos limitados.

La Justificación Social

Desde una perspectiva social, la implementación de estos sistemas contribuye directamente a la seguridad pública. Permiten la detección oportuna de daños estructurales que podrían poner en riesgo la vida de los ocupantes, especialmente en zonas urbanas con alta concurrencia. Al tratarse de una tecnología

accesible y confiable, su aplicación promueve una gestión equitativa y preventiva de la seguridad estructural, beneficiando a la comunidad usuaria y prolongando la vida útil de las construcciones en el distrito de Moquegua.

La Justificación Técnica

Técnicamente, esta investigación se basa en principios científicos sólidos para evaluar la integridad estructural de las construcciones. Se sustenta en metodologías validadas como el análisis de vibraciones, deformaciones y tensiones, apoyadas en registros dinámicos. Este enfoque permite estimar con mayor precisión el desempeño estructural mediante análisis sísmicos lineales y no lineales, justificando así la propuesta de incorporar el sistema como parte de una normativa técnica específica en el contexto peruano.

La Justificación Ambiental

Por último, la investigación se justifica ambientalmente al contribuir con la reducción del impacto generado por demoliciones o reforzamientos innecesarios. La detección temprana de fallos permite intervenciones focalizadas que minimizan la generación de residuos y optimizan el uso de materiales. Esto favorece una gestión sostenible de las infraestructuras, alineándose con los principios de responsabilidad ambiental, especialmente en zonas urbanas como el distrito de Moquegua donde el entorno construido está estrechamente vinculado al entorno natural.

1.4. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

1.4.1. Objetivo General

OG. Incorporar sistemas de monitoreo de salud estructural a bajo costo como propuesta normativa en edificaciones, distrito de Moquegua, 2025.

1.4.2. Objetivos Específicos

OE1. Evaluar la precisión y confiabilidad de sistemas de monitoreo de la salud estructural de bajo costo en la medición de espectros de aceleración bajo diferentes frecuencias y desplazamientos en edificaciones del distrito de Moquegua.

OE2. Identificar las características técnicas de los sistemas de monitoreo de la salud estructural de bajo costo viables para su incorporación normativa en edificaciones del distrito de Moquegua.

OE3. Determinar el factor de corrección derivado del análisis dinámico a partir de los desplazamientos reales registrados por sistemas de monitoreo de la salud estructural de bajo costo en edificaciones del distrito de Moquegua.

OE4. Proponer criterios de reforzamiento estructural en edificaciones del distrito de Moquegua, basados en los resultados del análisis sísmico obtenido mediante sistemas de monitoreo de la salud estructural de bajo costo.

CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

2.1. ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN

(Ahmadvand, Maleki, & Pourbaba, 2025) esta investigación titulada "Non-linear analysis of masonry infilled steel frame under in-plane loading using Multi Pier method" tuvo como *objetivo* establecer y validar rigurosamente un modelo basado en cerchas diseñado para analizar marcos rellenos de mampostería. La *metodología* empleada incluye el método, conocido como Multi-Pier (MP), el cual demuestra solidez en el manejo del comportamiento no lineal y exhibe una convergencia rápida incluso en escenarios que involucran un ablandamiento global significativo. Como *resultado* se tuvo que la deformación del relleno de mampostería bajo carga en el plano induce la separación entre el relleno y la viga y columna de acero, esta separación evita la aparición de tensión de corte debido a la fricción en estas interfaces. Asimismo, la curva de carga-deformación de las bisagras del marco con parámetros de acuerdo con las normas FEMA-273, estos parámetros, pertinentes para las bisagras plásticas, permanecen consistentes en vigas y columnas, establecidos en valores de 5, 7 y 0,2,por lo que en el análisis, se asumió que la pendiente posterior a la fluencia (que representa la pendiente de la curva de tensión-deformación después de la fluencia) se aproximaría al 3 % de la pendiente elástica (que refleja la pendiente de la curva de tensión-deformación en el rango elástico lineal). En *conclusión*, los muros de mampostería de una sola pieza poseen diferentes capacidades de carga y características de deformación, lo que requiere un enfoque personalizado para el diseño y el análisis.

El artículo científico titulado "On the displacement control performance of base-isolated structures incorporating nonlinear negative stiffness device" (Zhang, et al., 2024) tuvo como *objetivo* investigar y mejorar el control de desplazamientos excesivos en estructuras aisladas de base mediante dispositivos de rigidez negativa

no lineales (BIS-NSD). La *metodología* empleada incluyó el uso de la serie de Taylor para aproximar la fuerza de restauración no lineal del NSD, aplicándola al sistema de aislamiento en un sistema de dos grados de libertad (2DOF), y la aplicación de los métodos de equilibrio triple armónico (T-HB) y armónico simple (S-HB) para analizar la transmisibilidad de desplazamiento en estructuras BIS-NSD y BIS. Para validar los resultados, se realizaron simulaciones numéricas utilizando el método de Runge-Kutta en MATLAB, comparando las soluciones analíticas con las numéricas. Los *resultados* mostraron que, bajo excitaciones dominantes de baja frecuencia, el dispositivo NSD reduce significativamente tanto la transmisibilidad de desplazamiento como la de aceleración del BIS. Las *conclusiones* indican que el método T-HB y S-HB son aplicables para obtener soluciones analíticas precisas, revelando diferencias en los resultados obtenidos para distintos sistemas de aislamiento.

El articulo científico titulado “Optimized seismic hazard and structural vulnerability model considering macroseismic intensity measures” (Li & Gardoni, 2024) tuvo como *objetivo* desarrollar un modelo optimizado de riesgo sísmico regional y vulnerabilidad estructural utilizando medidas de intensidad macrosísmica. La *metodología* se basó en la aplicación de funciones de estimación de daños empíricas y la teoría de probabilidad y confiabilidad para evaluar el riesgo sísmico y la vulnerabilidad estructural, cuyos datos de daños estructurales provinieron de la base de datos del Instituto de Ingeniería Mecánica de China. Los *resultados* muestran que la optimización de las medidas de intensidad macrosísmica mejora la precisión del modelo de riesgo sísmico regional. *Concluye* que el uso de medidas de intensidad mejoradas contribuye significativamente al desarrollo de distribuciones de riesgo sísmico más precisas y razonables.

La investigación denominada “Empirically based approaches for the derivation of fragility curves of Italian RC building typologies” (Gaudio, et al., 2023) tuvo como *objetivo* estimar curvas de fragilidad para edificios de hormigón armado en Italia utilizando datos de daños de los terremotos de Irpinia (1980) y L'Aquila (2009). La *metodología* incluyó la extrapolación de aceleraciones

máximas del suelo de los ShakeMaps INGV para asociar niveles de daño, tanto estructural como no estructural. Los *resultados* mostraron que la vulnerabilidad sísmica aumenta con el número de pisos y disminuye con la edad y el nivel de diseño. Se *concluyó* que existe una buena concordancia entre los dos enfoques, aunque con algunas diferencias en tipologías con menos edificios. Además, se desarrollaron enfoques alternativos para superar la falta de datos, lo que permitió construir un modelo robusto de fragilidad sísmica, considerando 24 tipologías clasificadas por diseño, edad y número de plantas.

En la investigación titulada "Reliability-based design optimization of adaptive sliding base isolation system for improving seismic performance of structures" (Peng, Ma, Huang, & De Domenico, 2021) se tuvo como *objetivo* mejorar el desempeño sísmico de las estructuras ubicadas en zonas de alto riesgo sísmico mediante la optimización del diseño de un sistema de aislamiento de base deslizante adaptativo, considerando la confiabilidad estructural bajo condiciones sísmicas inciertas. La *metodología* utilizada incluye el análisis de sensibilidad mediante métodos matemáticos y estadísticos para abordar las incertidumbres asociadas con los movimientos del suelo y los sistemas estructurales. Además, se considera la efectividad del control estructural adaptativo bajo diferentes tipos de excitaciones sísmicas con distintos períodos de retorno, como los terremotos de ocurrencia frecuente, de resistencia de diseño y de ocurrencia rara. Los *resultados* indicaron que el sistema de aislamiento adaptativo mejora significativamente la confiabilidad de la estructura frente a acciones sísmicas dinámicas, optimizando el rendimiento bajo diferentes escenarios sísmicos. Las *conclusiones* resaltaron que el diseño basado en la confiabilidad y el uso de tecnologías de aislamiento sísmico adaptativas son soluciones eficaces para mitigar los riesgos sísmicos, superando las limitaciones de los métodos tradicionales que no capturan adecuadamente las incertidumbres de los movimientos del suelo.

(Pirsaheb, Javad, & Milani, 2020) el artículo de investigación titulado "A Multi-Pier MP method for the non-linear static analysis of out-of-plane loaded masonry walls" tuvo como *objetivo* proponer un novedoso enfoque 3D similar a

una armadura llamado Multi Pier (MP) para analizar el comportamiento estático no lineal fuera del plano de muros de mampostería. La *metodología* incluyó analizar numéricamente nueve muros de mampostería experimentales en flexión bidireccional, en presencia o ausencia de aberturas y condiciones de contorno complejas, para evaluar la capacidad del modelo a nivel estructural para reproducir curvas globales de carga-desplazamiento obtenidas experimentalmente y patrones de grietas en el momento del colapso. Los *resultados* obtenidos indicaron que, en el modelo, el muro se divide en las direcciones horizontal y vertical en marcos de celosía arriostrados 3D, con pilares y tirantes. En conclusión, se encontró sistemáticamente una coincidencia satisfactoria entre las predicciones numéricas y la evidencia experimental, lo que significa que el procedimiento propuesto puede representar una herramienta simple y valiosa para todos aquellos profesionales no familiarizados con los cálculos avanzados en el campo de la albañilería, pero interesados en una predicción confiable del comportamiento de los muros de mampostería fuera del plano cargados mediante códigos comerciales estándar.

En la investigación denominada "Effect of reinforcement anchorage end detail and spacing on seismic performance of masonry shear walls" (Seif & Galal, 2018) tuvo como *objetivo* evaluar el desempeño sísmico de muros de mampostería reforzada (RM) sometidos a cargas cíclicas y compresión axial. La *metodología* incluyó pruebas experimentales de cinco muros de corte RM de un solo piso, analizando diferentes detalles de anclaje del refuerzo (gancho estándar de 180°, gancho de 90° y recto) y espaciamientos del refuerzo horizontal y vertical. Los *resultados* indicaron que el gancho estándar de 180° ofreció la mayor resistencia y ductilidad, con un 15% más de ductilidad que el anclaje recto. La investigación *concluye* que los detalles de anclaje y el espaciamiento del refuerzo tienen un impacto significativo en la capacidad sísmica de los muros, siendo el gancho de 180° el más eficiente para mejorar la respuesta sísmica de los muros de mampostería reforzada.

Salgado et al. (2016) desarrollaron una investigación cuyo objetivo fue evaluar el riesgo sísmico en las edificaciones urbanas de Lorca, afectadas por el

sismo ocurrido en mayo de 2011. Se utilizó una metodología basada en escenarios estocásticos para representar la amenaza sísmica, y funciones de transferencia espectrales para modelar la respuesta del suelo. Los resultados destacaron una pérdida anual esperada de 16,3 millones de euros, con un alto nivel de riesgo debido a la vulnerabilidad estructural, especialmente en edificaciones de tierra y de mampostería. También se estimó una pérdida máxima probable de 690 millones de euros para un periodo de retorno de 500 años. En conclusión, los resultados permitieron generar mapas de riesgo georreferenciados, útiles para la planificación de medidas de mitigación y refuerzo. Asimismo, se señaló que dichos resultados pueden actualizarse con nueva información sobre las edificaciones y la microzonificación sísmica, mejorando progresivamente la precisión de la evaluación del riesgo.

Paredes y Romero (2021) analizaron la respuesta estructural de una estructura de cuatro niveles ubicada en Portoviejo, Ecuador, bajo la acción de cargas sísmicas producidas por el terremoto de Muisne en 2016. La metodología incluyó mediciones de vibración ambiental en direcciones transversales y longitudinales, permitiendo evaluar el período fundamental de la estructura de acuerdo con la norma NEC-15. Se compararon los desplazamientos y derivas máximas entre pórticos con y sin muros de mampostería, obteniéndose una deriva máxima del 2 %. Se concluyó que el método simplificado de análisis no lineal ASCE 41-17 representa adecuadamente el comportamiento estructural de construcciones con pórticos de hormigón armado y muros de mampostería en condiciones sísmicas. Asimismo, se evidenció que la presencia de dichos muros influye significativamente en la respuesta dinámica de este tipo de estructuras.

(López, 2021) esta investigación titulada “Modelado no lineal de un edificio de tres niveles a base de muros de mampostería” tuvo como *objetivo* comparar el comportamiento sísmico de un edificio de tres niveles construido con muros de mampostería, aplicando tanto análisis estructural lineal como no lineal. En su *metodología* se identificaron las limitaciones del análisis lineal, evidenciando que no representan adecuadamente la pérdida de rigidez ni el comportamiento inelástico

de los materiales. Se compararon modelos numéricos con diferentes configuraciones de muros, obteniendo como *resultado* que aquellos con diagonales y tres diagonales reflejan mejor el comportamiento real. Se *concluyó* que el análisis no lineal ofrece mayor precisión y seguridad en el diseño estructural, aunque requiere mayor capacidad computacional y tiempo de procesamiento.

(Gallardo, 2023) su investigación titulada "Análisis estático y dinámico no lineal en el desempeño sismorresistente de un colegio diseñado bajo la norma E.030 en Ferreñafe" tuvo como *objetivo* determinar el comportamiento estructural y nivel de desempeño de la Institución Educativa Héctor Rene Lanegra Romero en Ferreñafe (Lambayeque) mediante análisis estáticos y dinámicos no lineales, a fin de buscar técnicas de restauración que aumenten la resistencia estructural, con un énfasis particular en la dirección X. La *metodología* empleada fue descriptiva y correlacional, con un muestreo no probabilístico de tipo espontáneo, y el enfoque principal se centra en el modelamiento de la estructura. Los r*esultados* indicaron que, en el Bloque I, las deformaciones fueron similares en ambas direcciones, tanto en análisis estáticos como no lineales, destacando que la estructura en la dirección X estuvo compuesta de albañilería confinada, mientras que en la dirección Y se emplearon muros de concreto armado; mientras que para el Bloque II, se observó una mayor fuerza de corte basal en la dirección X-X, alcanzando 198.8 toneladas con un desplazamiento de 0.25 cm, y en la dirección Y-Y, 179.25 toneladas con el mismo desplazamiento. Como *conclusión* se tuvo la necesidad de contar con una medida de mitigación, para lo cual se propone un plan de restauración estructural enfocado en el refuerzo de columnas y el aumento de la capacidad de disipación de energía en los pórticos.

(Ramírez, Vásquez, & Abanto, 2022) la investigación titulada "Vulnerabilidad sísmica y reforzamiento estructural de instituciones educativas públicas de una provincia peruana con riesgo sísmico" tuvo como *objetivo* evaluar la vulnerabilidad sísmica de dos instituciones educativas del distrito de Carhuaz, provincia ubicada en la zona 3 según la NTP E.030 y proponer un plan de reforzamiento estructural. La *metodología* empleada incluyó la evaluación de las

estructuras mediante los métodos FEMA 154, Benedetti-Petrini y Hirosawa. Los *resultados* mostraron que, aunque ambas instituciones presentaron una vulnerabilidad sísmica baja, el ensayo de esclerometría reveló que más del 50% de los elementos estructurales de la institución A no cumplían con los estándares de resistencia. También se identificaron irregularidades en el diseño en planta y altura, y la institución B superó el límite de distorsión de entrepiso. Se *concluyó* que el proceso constructivo de ambas instituciones carece de una supervisión y control adecuados en el diseño de las mezclas, y que es necesario realizar estudios estructurales periódicos para implementar los refuerzos o reparaciones adecuadas, protegiendo la vida de los estudiantes.

2.2. BASES TEÓRICAS

Toda investigación o proyecto técnico se sustenta en un marco teórico-científico que permite comprender los principios, fundamentos y metodologías aplicadas. Esta sección aborda los conceptos clave, teorías relevantes y estudios previos que respaldan el desarrollo del presente trabajo, proporcionando el sustento necesario para su adecuada interpretación y aplicación.

Protocolos de Reglamentos Geotécnicos de Nuestro País

Los ensayos de mecánica de suelos son pruebas de laboratorio o campo que se realizan para determinar las propiedades físicas, mecánicas e hidráulicas de un suelo. Estos ensayos permiten conocer características como la granulometría, la cohesión, la capacidad de carga, la compactación, la permeabilidad y el comportamiento ante esfuerzos, lo que es fundamental para el diseño de cimentaciones, estructuras y obras de ingeniería civil (Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2016). En el Anexo 2, se muestran las normas de referencia para el presente estudio.

Capacidad de Carga Admisible

Conocidas las propiedades del suelo, la capacidad portante se calcula con la ecuación propuesta por Terzaghi-Peck (1967), considerando factores de forma propuesto por Vesic, la capacidad portante admisible se obtiene dividiendo el

esfuerzo de rotura entre un factor de seguridad FS=3 por encontrarse ubicada esta localidad en una zona altamente sísmica, el análisis es el siguiente:

$$qu = cNcNs + qNq + \frac{1}{2}\gamma BN_{\gamma}S_{\gamma}$$

Siendo la capacidad admisible de carga:

$$qa = Qult/FS$$

Donde se tiene las siguientes variables; Qa = capacidad admisible del suelo (kg/cm2); Qu = capacidad ultima de carga (kg/cm2); C = cohesión (Tn/m2); Nc, Nq, Ny = factores de capacidad de carga; Sc, Sq, Sy = factores de forma; q = sobrecarga (y*Df); Df = profundidad de desplante (m); y = peso unitario del suelo (Tn/m3); B = ancho de la cimentación (m); FS = factor de seguridad (3); (Das, 2012).

Cálculo de Asentamientos

El cálculo de asentamientos es un proceso fundamental en la mecánica de suelos y la ingeniería geotécnica, utilizado para estimar la deformación vertical del terreno bajo cargas aplicadas. El análisis de asentamientos se basa en principios de mecánica de suelos, como la teoría de consolidación de Terzaghi y la elasticidad, considerando propiedades del suelo como el módulo de deformación, la permeabilidad y el grado de saturación. Un adecuado cálculo permite diseñar cimentaciones seguras y prevenir daños estructurales a largo plazo (Bowles, 1997) .Para el cálculo de asentamientos inmediatos se ha utilizado el método elástico, según las características del suelo:

$$Si = qb(1 - u2)If/Es$$

Dada por las siguientes variables: Si = asentamiento probable, q = presión de trabajo (Tn/m2), b = ancho de cimentación (cm), u = relación de poisson, If = factor de forma (cm/m), Es = módulo de elasticidad (ton/m2).

Los asentamientos admisibles deben ser menores a 2.54 cm (Das, 2012).

Ensayo de esclerometría

El ensayo de esclerometría, también conocido como prueba de dureza de impacto o ensayo con esclerómetro, es un método de ensayo no destructivo

utilizado para estimar la resistencia superficial de materiales de construcción, principalmente del hormigón. Se basa en la medición del rebote de un martillo de impacto, lo que permite correlacionar el valor obtenido con la resistencia a la compresión del material evaluado.

El objetivo principal del ensayo de esclerometría es estimar la resistencia superficial del concreto o de otros materiales de construcción a través de la medición de su dureza.

Normas Relacionadas

- ASTM C805: Standard Test Method for Rebound Number of Hardened Concrete.
- UNE 83304-2: Ensayo de esclerometría para concreto.

Evaluación de fisuras

El objetivo principal de la evaluación de fisuras es identificar el tipo, tamaño, ubicación y causas de las fisuras para determinar si representan un riesgo estructural o si son simplemente de naturaleza superficial, lo cual es común en algunos tipos de concreto. A través de esta evaluación, se puede decidir si se necesita realizar reparaciones, monitoreo adicional o si la estructura puede continuar utilizándose sin intervención inmediata, teniéndose tipos de fisuras finas (menos de 0.3 mm de ancho), medianas (0.3 mm y 1.0 mm de ancho) y gruesas (Más de 1.0 mm de ancho), ademas de tipos siguientes (Terán, 2010):

- Fisuras estructurales: Aquellas que afectan la estabilidad de la estructura y pueden indicar un problema grave, como el desplazamiento de elementos, fallo en la carga o deformaciones importantes.
- Fisuras no estructurales: Fisuras superficiales que no afectan la resistencia estructural. Pueden ser causadas por contracción del concreto, movimiento térmico o asentamiento.

Normas Relacionadas:

- ASTM E2272 - Standard Guide for In-Service Evaluation of Concrete Cracking: Proporciona directrices para la evaluación de las fisuras en concreto en servicio.

- ACI 224R-01 - Control of Cracking in Concrete Structures: Guía técnica sobre el control de fisuras en estructuras de concreto (Cajan & Falla, 2020).

Salud Estructural

La salud estructural se refiere al estado de conservación y al desempeño de las edificaciones, evaluando su capacidad para resistir cargas y factores externos, como los sismos, sin comprometer su integridad. A través del Monitoreo de la Salud Estructural (SHM, por sus siglas en inglés), es posible detectar de forma temprana defectos o daños, lo que permite observar la evolución del comportamiento estructural a lo largo del tiempo. En caso de eventos sísmicos, el SHM facilita la identificación rápida del estado de desempeño y de la integridad post-sismo de las edificaciones, permitiendo tomar decisiones técnicas fundamentadas sobre su recuperación, reforzamiento o demolición (Bacuilima y Barbecho, 2022).

Teoría de la Integridad Estructural: La salud estructural se refiere al estado de las edificaciones en términos de su capacidad para soportar cargas y resistir el paso del tiempo sin comprometer la seguridad. En este marco, se consideran factores como la fatiga de materiales, la corrosión, el agrietamiento y las deformaciones, los cuales pueden afectar progresivamente la integridad estructural (Andrés y Duque, 2007).

Modelos de Degradación de Materiales: Conceptos relacionados con cómo los materiales de construcción como el acero, concreto y madera, las cuales se degradan con el tiempo debido a condiciones ambientales y cargas. Estos modelos ayudan a entender las causas y el ritmo de la pérdida de capacidad de las estructuras.

Evaluación de la Salud Estructural: Se emplean métodos como inspecciones visuales, ensayos de laboratorio y técnicas avanzadas de monitoreo con sensores para evaluar la salud estructural de las edificaciones (López et al., 2014).

Monitoreo de la Salud Estructural

Es el proceso continuo o periódico de evaluación de las condiciones físicas y mecánicas de las edificaciones mediante el uso de tecnologías avanzadas de medición y análisis. Su finalidad es detectar y valorar posibles daños, deterioros o alteraciones en los elementos estructurales, con el propósito de garantizar la seguridad, funcionalidad y durabilidad de las edificaciones a largo plazo (López et al., 2021).

Sistemas de Monitoreo Estructural en Tiempo Real: El monitoreo continuo de la salud estructural implica el uso de sensores para detectar deformaciones, vibraciones, esfuerzos y otras variables en tiempo real (Quispe, Diaz, Jaramillo, & Inocente, 2022).

Monitoreo Continuo: El proceso implica la medición constante o periódica de variables críticas de la estructura como deformaciones, vibraciones, temperatura, esfuerzos para asegurar que cualquier cambio o daño se detecte de manera temprana (Pérez, Aguirre, & Ramirez, 2018).

Mantenimiento Predictivo: Los datos obtenidos del monitoreo de salud estructural se pueden utilizar para desarrollar modelos predictivos que indiquen cuándo una estructura podría fallar o necesitar mantenimiento. Esto es clave para optimizar los costos y reducir los tiempos de inactividad (Salazar G. , 2018).

Teoría de la Detección de Fallas y Diagnóstico Estructural

La detección de fallas estructurales se basa en la identificación de irregularidades en las condiciones físicas de las edificaciones, según Jones y Ashby (2018). El diagnóstico estructural permite interpretar los riesgos potenciales que puedan comprometer la estabilidad de las estructuras, facilitando la toma de decisiones técnicas para su intervención o reforzamiento.

La teoría de la mecánica de materiales y la teoría de la fractura se emplean para entender cómo las tensiones y deformaciones afectan a los materiales de construcción. (Salazar J. , 2016)

Corrosión en Elementos Metálicos: La corrosión es un proceso natural que afecta principalmente a las estructuras de acero o metal expuestas a condiciones ambientales, como alta humedad o contacto con agua salina. La corrosión puede debilitar las estructuras metálicas y reducir su capacidad de carga, por lo que uno de las acciones es la detección mediante los sensores de humedad y sensores electroquímicos pueden utilizarse para monitorear la presencia de condiciones favorables para la corrosión, mientras que la corrosión no detectada a tiempo puede llevar a un debilitamiento estructural severo, aumentando el riesgo de colapso (Macioski, De Souza, Capraro, & De Medeiros, 2016).

Deformaciones en Elementos Estructurales: Las deformaciones pueden ocurrir debido a sobrecargas, movimientos sísmicos, errores de diseño o fatiga de materiales. Las deformaciones plásticas irreversibles son indicativas de que el material ha alcanzado su límite de resistencia, por lo que es importante detectar tanto deformaciones permanentes como temporales en vigas, columnas y otros elementos estructurales, según Martínes (2023), teniendo en cuenta que las deformaciones excesivas pueden alterar la capacidad de carga de la estructura, comprometiendo la seguridad de las edificaciones.

Fallos en Conexiones Estructurales: Las conexiones estructurales (por ejemplo, las uniones entre vigas y columnas) pueden fallar debido a sobrecargas o fatiga del material. La falla en las conexiones puede provocar el colapso parcial o total de una parte de la estructura, por lo que los fallos en las conexiones, al ser críticos, pueden afectar la integridad global de la estructura, poniendo en peligro la seguridad de las edificaciones (Martínes, 2023).

Fisuración del Concreto (Hacia el Interior de la Estructura): La fisuración interna del concreto puede ser causada por retracción, ciclos de carga y descarga, expansión por humedad o deficiencias en la mezcla de concreto. Estas fisuras no siempre son visibles en la superficie, pero pueden afectar la resistencia estructural (Toirac, 2004). La fisuración interna puede afectar la capacidad de carga del concreto y puede pasar desapercibida hasta que cause un daño significativo a la

estructura, pudiendo determinarse por los diversos factores (Suárez, Mazorra, & Marrero, 2023), como:

Contracción por fraguado. El concreto se contrae a medida que se seca y endurece, lo que puede generar fisuras internas si no se controla adecuadamente el proceso de curado.

Retracción. El concreto puede sufrir retracción por la pérdida de agua, especialmente en ambientes secos, lo que genera tensiones internas que provocan fisuras.

Expansión térmica. Los cambios de temperatura provocan la expansión o contracción del concreto. Las tensiones generadas por diferencias térmicas entre las partes de una estructura pueden causar fisuración interna.

Sobrecarga. El exceso de carga sobre la estructura, mayor a la capacidad de diseño, puede inducir tensiones que lleven a la formación de fisuras.

Reacción álcali-sílice. Esta reacción química entre los componentes del cemento y ciertos minerales en los agregados puede generar expansión y fisuración en el concreto.

Corrosión de armaduras. La corrosión de las barras de acero de refuerzo, debido a la presencia de agua o agentes agresivos, genera expansión en el interior del concreto y puede provocar fisuras que afectan la integridad estructural.

Fatiga de material. La repetición de cargas cíclicas sobre el concreto puede inducir fisuración interna por fatiga, especialmente en elementos que soportan fuerzas fluctuantes.

Normativas Peruanas en Construcción y Monitoreo

El marco normativo peruano establece los criterios de diseño para la construcción y evaluación de edificaciones, y la implementación de sistemas de monitoreo estructural debe alinearse con dichas disposiciones. Algunas normativas relevantes incluyen la Norma Técnica de Edificaciones (NTE) y la Norma E.030,

las cuales forman parte del Reglamento Nacional de Edificaciones y definen los requisitos mínimos para garantizar la seguridad y estabilidad estructural (Muñoz, 2020).

Norma Técnica Peruana (NTP) - NTP E.030: "Diseño Sismorresistente", la cual establece los requisitos de diseño sísmico para las estructuras en Perú, tomando en cuenta las características geológicas y sísmicas del país. Regula la resistencia de las estructuras frente a terremotos, lo cual es esencial para asegurar la integridad estructural, siendo relevante para la tesis en cuanto a que debe estar alineado con esta norma, ya que permitirá detectar daños estructurales inducidos por sismos o deformaciones asociadas.

La Norma Técnica Peruana NTP 399.050. “Construcción de Edificaciones. Recomendaciones Generales” proporciona directrices esenciales para la construcción segura de edificaciones, considerando aspectos técnicos relacionados al diseño estructural, la ejecución de obra y el control de calidad. Su aplicación resulta relevante al momento de evaluar la posibilidad de incorporar sistemas de monitoreo estructural, ya que establece criterios técnicos compatibles con los lineamientos propuestos en esta investigación.

ISO 14689-1. "Monitoreo Estructural en Construcción. Parte 1: Definición de Términos y Métodos", la norma ofrece lineamientos sobre la definición y aplicación de los métodos de monitoreo estructural, incluyendo los dispositivos y tecnologías utilizadas para medir y observar el comportamiento de una estructura y proporciona las mejores prácticas y los estándares internacionales para la instalación y operación de sistemas de monitoreo estructural, asegurando que las tecnologías de bajo costo que se propongan estén alineadas con los mejores enfoques y metodologías internacionales.

La norma ISO 23469. “Monitoreo de Infraestructuras. Sistema de Evaluación de Salud Estructural” aborda específicamente la implementación de sistemas de monitoreo para la salud estructural en infraestructuras, brindando una guía técnica para el análisis de datos estructurales recolectados a lo largo del tiempo.

Su enfoque puede adaptarse a edificaciones, permitiendo evaluar de forma continua su comportamiento estructural y facilitando la toma de decisiones orientadas al mantenimiento, refuerzo o intervención oportuna.

2.3. DEFINICIÓN DE CONCEPTOS

Sistema de Monitoreo

Un Sistema de Monitoreo Estructural (SHM) es un proceso que recopila de manera continua o periódica datos sobre el estado y desempeño de edificaciones, mediante sensores que miden parámetros como las vibraciones. Estos datos permiten evaluar la condición estructural, prever su comportamiento ante cargas y optimizar las actividades de mantenimiento (Garita, 2016). El objetivo principal del SHM es mejorar la seguridad, longevidad y eficiencia de las edificaciones, permitiendo la detección temprana de fallos y reduciendo los riesgos sociales, económicos y ambientales derivados de posibles fallas (Carrión et al., 2023).

Salud Estructural

La salud estructural se refiere al estado de conservación y desempeño de las edificaciones, evaluando su capacidad para resistir cargas y factores externos, como sismos, sin comprometer su integridad. A través del Monitoreo de Salud Estructural (SHM), se pueden detectar tempranamente defectos y daños, lo que permite monitorear la evolución de las edificaciones a lo largo del tiempo. Además, en eventos sísmicos, el SHM puede identificar rápidamente el rendimiento y la integridad post-sismo de la estructura, ayudando a decidir si es seguro recuperarla, reforzarla o demolerla (Bacuilima y Barbecho, 2022).

Bajo Costo en Sistemas de Monitoreo

El concepto de bajo costo en sistemas de monitoreo se refiere a la implementación de soluciones económicas que permiten obtener información estructural clave sin generar un impacto financiero elevado. Estos sistemas, al ser accesibles, equilibran la eficiencia técnica y económica, optimizando los recursos disponibles para garantizar la estabilidad y seguridad de las edificaciones a largo plazo. Son especialmente útiles en contextos con recursos limitados, ya que

permiten mantener el monitoreo estructural continuo frente a eventos sísmicos sin comprometer los presupuestos de operación e implementación (Quispe y Hanampa, 2023).

Peligro Sísmico

El peligro sísmico es la probabilidad de que un área sea afectada por un sismo de determinada intensidad en un período específico, expresado en términos de aceleración sísmica (Rivera, 2024). La peligrosidad es inherente al fenómeno y no se puede controlar ni reducir, tan sólo se puede llegar a conocer de forma más o menos precisa (Benito, 2013).

Impacto Sísmico

El impacto sísmico se refiere a los efectos causados por un terremoto, como el sacudimiento del suelo, incendios, derrumbes, interrupción de servicios, y el pánico psicológico en la población. Los daños dependen de factores como la magnitud, la distancia del epicentro, la geología del área y el tipo de construcción. Para medir estos efectos, se utilizan las escalas de intensidad (Mercalli) y magnitud (Richter), que cuantifican el daño y la energía liberada por el sismo, respectivamente (Servicio Geológico Mexicano, 2017).

CAPÍTULO III: MARCO METODOLÓGICO

3.1. HIPÓTESIS

3.1.1. Hipótesis General

HG. Se plantea que incorporar sistemas de monitoreo de la salud estructural de bajo costo como propuesta normativa en edificaciones del distrito de Moquegua es viable, porque mejora la evaluación sísmica, reduce incertidumbre en el desempeño y orienta decisiones de reforzamiento.

3.1.2. Hipótesis Específicas

HE1. Se hipotetiza que los sistemas de monitoreo de la salud estructural de bajo costo permiten medir espectros de aceleración con errores RMS menores al 5 % y coeficientes de determinación R^2 superiores a 0.90, bajo distintas frecuencias y desplazamientos en edificaciones de Moquegua.

HE2. Se plantea que los sistemas de monitoreo de la salud estructural de bajo costo cuentan con características técnicas compatibles con su incorporación normativa, al operar con frecuencias de muestreo cercanas a 100 Hz, consumos inferiores a 5 W y montaje no invasivo en edificaciones del distrito de Moquegua.

HE3. Se sostiene que el análisis dinámico basado en los desplazamientos reales registrados por sistemas de monitoreo de bajo costo permite obtener un factor de corrección estructural confiable, con valores promedio cercanos a 1.13 y rangos entre 1.10 y 1.36 en las edificaciones estudiadas.

HE4. Se propone que los resultados obtenidos mediante sistemas de monitoreo de la salud estructural de bajo costo permiten establecer criterios aplicables de reforzamiento estructural, priorizando intervención en zonas donde los desplazamientos reales superan en más de 10 % los límites normativos de derivas en edificaciones del distrito de Moquegua.

3.2. OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES

3.2.1. Identificación de la variable independiente

Sistema de monitoreo de la salud estructural a bajo costo: Se refiere a la implementación de sensores y tecnologías accesibles que permiten medir, analizar y monitorear de forma continua el estado estructural de las edificaciones. Estos sistemas facilitan la detección temprana de fallas o deterioros, optimizando las decisiones de mantenimiento preventivo y garantizando la seguridad estructural con una inversión mínima, especialmente en contextos de recursos limitados como el distrito de Moquegua.

Indicadores. Para evaluar la viabilidad técnica de incorporar sistemas de monitoreo estructural de bajo costo como propuesta normativa en edificaciones del distrito de Moquegua, se consideran indicadores organizados en tres dimensiones principales: desempeño técnico del sistema de monitoreo, características de los materiales, y diseño estructural.

En primer lugar, el desempeño técnico del sistema de monitoreo se medirá a través de indicadores como la precisión en la medición de aceleraciones estructurales, así como la confiabilidad del sistema bajo distintas frecuencias de vibración. Además, se evaluará el margen de error mediante el cálculo de la raíz del error cuadrático medio (RMS) y el coeficiente de determinación (R^2) obtenido de los ajustes dinámicos aplicados a los datos recolectados. Estos indicadores permitirán determinar la capacidad del sistema para registrar de forma fiable el comportamiento dinámico de las estructuras bajo condiciones reales.

En segundo lugar, se analizarán las características de los materiales mediante ensayos de laboratorio y estudios de suelos. Se incluirá el ensayo de resistencia a la compresión, fundamental para conocer el comportamiento del concreto ante cargas verticales, y el ensayo de resistencia a la tracción, que permite evaluar la capacidad del material para resistir fuerzas que tienden a alargarlo. Se considerará también la resistencia a la tracción máxima, entendida como la carga límite que el material

puede soportar antes de fallar. Asimismo, se valorará la implementación de refuerzo corrugado como un mecanismo para mejorar la adherencia entre el concreto y el acero, incrementando así la capacidad resistente de los elementos estructurales frente a cargas sísmicas o permanentes.

Adicionalmente, se incorporará el estudio de mecánica de suelos, cuya importancia radica en garantizar la estabilidad global del sistema estructural. Dentro de este estudio se contemplará el análisis granulométrico, que determina la distribución del tamaño de partículas del suelo; pruebas de compresión y corte, esenciales para conocer su resistencia al esfuerzo cortante; pruebas de consolidación, necesarias para evaluar asentamientos diferidos, particularmente en suelos arcillosos; determinación del índice de plasticidad, que permite clasificar el suelo según su comportamiento ante cambios de humedad; y pruebas de permeabilidad, fundamentales para evaluar la filtración del agua y su implicancia en la estabilidad de los cimientos, especialmente en zonas propensas a humedad o inundaciones.

Por último, en la dimensión de diseño estructural, se considerarán indicadores clave como el peligro sísmico de la zona, determinado a partir de registros históricos y representado mediante mapas de zonificación sísmica. El análisis sismorresistente será evaluado como uno de los principales componentes técnicos, dado que busca garantizar que las estructuras puedan absorber y disipar energía sísmica minimizando daños. Asimismo, se tomará en cuenta el análisis dinámico, que evalúa las propiedades vibracionales de la estructura para asegurar que esté diseñada para resistir fuerzas sísmicas sin comprometer su estabilidad. Finalmente, se incluirá la aceleración del terreno como un parámetro fundamental, ya que representa el nivel de solicitación sísmica esperada y es un factor determinante en el diseño estructural sismorresistente.

Estos indicadores permitirán evaluar integralmente el sistema propuesto, sustentando técnica y normativamente su posible incorporación dentro del marco regulatorio aplicable al distrito de Moquegua.

Escala para la medición de variables. La medición de las variables de estudio se realizará a partir de unidades específicas asociadas a cada dimensión e indicador, con el fin de garantizar precisión, comparabilidad y rigurosidad en los resultados obtenidos.

En la dimensión correspondiente a las características de los materiales, se utilizarán diversas escalas. El ensayo de resistencia a la compresión será medido en megapascales (MPa) o, alternativamente, en kilogramos por centímetro cuadrado (kg/cm^2), unidades que permiten cuantificar la capacidad del concreto u otros materiales para soportar cargas de compresión. En el caso del ensayo de resistencia a la tracción, se empleará la unidad de kilogramos por centímetro cuadrado (kg/cm^2), dado que este valor refleja la carga máxima que el material puede resistir antes de deformarse o fracturarse por estiramiento. Para el refuerzo corrugado, se utilizará la escala porcentual (%), a fin de expresar el grado de adherencia o cobertura del acero en el concreto estructural. Finalmente, los resultados del estudio de mecánica de suelos se presentarán en metros cuadrados (m^2), considerando el área representativa analizada para la caracterización del suelo en términos de resistencia, consolidación, permeabilidad y otras propiedades fundamentales.

En lo que respecta a la dimensión del diseño estructural, también se emplearán escalas técnicas específicas. El peligro sísmico será medido en segundos (s), en referencia al periodo fundamental de vibración, el cual es un parámetro clave en la caracterización sísmica del sitio y del comportamiento dinámico de las edificaciones. El análisis sismorresistente y la aceleración del terreno se evaluarán utilizando la unidad de metros por segundo al cuadrado (m/s^2), ya que esta representa la aceleración con la que el suelo transmite energía a la estructura durante un evento sísmico. En el caso del análisis dinámico, se utilizará la unidad de centímetros (cm) para medir los desplazamientos estructurales máximos inducidos

por vibraciones, considerando su relevancia para estimar la respuesta sísmica de la edificación en estudio.

Estas escalas permiten cuantificar objetivamente los aspectos técnicos clave asociados al comportamiento estructural, proporcionando insumos sólidos para la interpretación y validación de la propuesta normativa en el contexto del distrito de Moquegua.

3.2.2. Identificación de la variable dependiente

Propuesta normativa en edificaciones: Esta variable se refiere al planteamiento técnico y normativo que busca establecer criterios concretos para la incorporación de sistemas de monitoreo estructural de bajo costo en edificaciones. Su finalidad es sustentar, con base en evidencias técnicas y funcionales, la viabilidad de integrar estos sistemas dentro del marco regulatorio de la construcción en el Perú, promoviendo mayor seguridad estructural y eficiencia en las acciones de mantenimiento, especialmente en edificaciones ubicadas en el distrito de Moquegua.

Indicadores. La evaluación de los indicadores relacionados con el comportamiento estructural se agrupa en dos dimensiones fundamentales: los resultados del desempeño sísmico asociado a parámetros dinámicos, y la evaluación técnica mediante análisis sísmico estático y modal dinámico.

En primer lugar, dentro de los resultados del desempeño sísmico asociado a parámetros, se considera el cortante basal como un indicador clave para evaluar los modos de vibración de la estructura. Este parámetro analiza las distintas formas en que una edificación puede vibrar ante una carga sísmica y cómo cada uno de esos modos contribuye a la respuesta global de la estructura durante un evento sísmico. Asimismo, se incorpora la deformación, la cual es evaluada mediante análisis no lineal, permitiendo modelar el comportamiento real de los materiales cuando se someten a grandes deformaciones. Este enfoque es esencial para simular la plasticidad y las deformaciones permanentes que pueden presentarse durante un

terremoto, reflejando con mayor precisión el estado estructural post-sismo. Finalmente, se incluye el desplazamiento estructural como indicador de la respuesta dinámica, el cual se calcula a partir de las fuerzas sísmicas modeladas en la estructura y permite estimar el movimiento horizontal máximo que experimentan los elementos estructurales.

Por otro lado, en la dimensión de evaluación del análisis sísmico estático y modal dinámico, se considera al sistema estructural de las edificaciones como un componente fundamental para el diseño y evaluación sísmica. Este sistema define la capacidad de la estructura para resistir cargas laterales y verticales como el peso propio, las cargas de uso, el viento y, especialmente, las fuerzas sísmicas. Su análisis permite establecer criterios técnicos para decisiones de reforzamiento o mantenimiento. También se analizan los modos de vibración, los cuales representan las distintas formas en que la estructura puede desplazarse cuando es sometida a excitaciones dinámicas. Este parámetro es fundamental para entender la distribución de la energía sísmica dentro de la estructura.

Se incluye además el cálculo de los periodos fundamentales, que corresponde al tiempo que tarda la estructura en completar una oscilación libre y está directamente relacionado con su frecuencia natural. Este indicador es esencial para evitar fenómenos de resonancia, optimizar el diseño y asegurar una respuesta sísmica eficiente. Finalmente, se analiza la rigidez estructural, la cual depende de factores como la aceleración del terreno y está vinculada con la capacidad de la edificación para disipar energía sin colapsar. Evaluar este parámetro permite estimar cuánta deformación será admisible antes de comprometer la estabilidad de la edificación, así como definir los niveles adecuados de ductilidad.

En conjunto, estos indicadores ofrecen una visión integral y cuantificable del comportamiento estructural frente a solicitaciones sísmicas, sirviendo como base para validar técnicamente la incorporación de sistemas de monitoreo estructural dentro del marco normativo propuesto.

Escala para la medición de variables. La medición de las variables asociadas al comportamiento sísmico de las edificaciones se realiza mediante escalas técnicas que permiten cuantificar de forma precisa los parámetros estructurales relevantes. Estas escalas se agrupan en dos dimensiones: los resultados del desempeño sísmico asociado a parámetros y la evaluación del análisis sísmico estático y modal dinámico.

En la dimensión correspondiente a los resultados del desempeño sísmico asociado a parámetros, se utiliza como primer indicador el cortante basal, definido como la fuerza total que actúa en la base de la edificación cuando se somete a cargas laterales. Este indicador se mide en kilogramos (kg) y permite evaluar la respuesta sísmica total en función de los modos de vibración. La deformación estructural, entendida como los cambios en la geometría de los elementos provocados por la acción sísmica, se mide en centímetros (cm) y refleja el grado de desplazamiento interno no lineal que puede experimentar una estructura. Por su parte, el desplazamiento estructural hace referencia al movimiento horizontal máximo que registra la edificación como consecuencia de una excitación sísmica, también expresado en centímetros (cm), y constituye un parámetro esencial para estimar la demanda de deformación a nivel global.

En la segunda dimensión, relacionada con la evaluación del análisis sísmico estático y modal dinámico, se considera el indicador denominado sistema estructural de las edificaciones, el cual representa la capacidad del sistema resistente para actuar ante cargas laterales. Su medición se expresa en porcentaje (%), indicando el grado de participación o contribución del sistema principal frente a distintas solicitaciones. Asimismo, los modos de vibración se evalúan en función de la distribución de la respuesta dinámica que cada modo estructural aporta al comportamiento general de la edificación, también medidos en porcentaje (%), lo que permite identificar modos dominantes y posibles efectos de resonancia.

El indicador denominado periodo fundamental se refiere al tiempo que tarda una estructura en completar una oscilación libre natural; se expresa en segundos (s)

y es clave para relacionar la frecuencia del suelo con la de la estructura, con el objetivo de evitar resonancias destructivas. Finalmente, la rigidez estructural se expresa mediante la relación entre la fuerza aplicada y el desplazamiento resultante. Dependiendo del enfoque de evaluación, puede medirse en kilogramos por centímetro (kg/cm) o representarse en porcentaje (%), y permite estimar el nivel de resistencia de la estructura frente a cargas dinámicas y estáticas.

Estas escalas proporcionan una base cuantitativa para el análisis estructural riguroso y permiten vincular de forma coherente los resultados del monitoreo estructural con los parámetros normativos requeridos para sustentar la propuesta de incorporación en el marco regulatorio vigente.

2.1.1 Variables intervinientes

Las variables intervinientes pueden influir en el éxito de la implementación del sistema de monitoreo y en su integración en la normativa peruana. Estas variables incluyen factores externos que podrían afectar los resultados de la investigación, tales como:

Condiciones Económicas. Disponibilidad de recursos financieros para implementar el sistema de monitoreo.

Tecnología Disponible. Avances tecnológicos que puedan influir en la calidad y costos del sistema de monitoreo.

Monitoreo Continuo Y Mantenimiento. Implementación de un sistema de monitoreo estructural para detectar posibles deformaciones, desplazamientos o desgaste en los componentes clave de la estructura puede ser una medida efectiva para mantener la seguridad a lo largo del tiempo. Además, se deben realizar inspecciones periódicas y mantenimiento preventivo para garantizar que la estructura continúe siendo segura durante toda su vida útil.

Aceptación Social y Política. Apoyo por parte de la Junta Vecinal en calidad de representación de la Sociedad y la Municipalidad Distrital Provincial Mariscal Nieto en la implementación de la propuesta.

3.3. TIPO DE INVESTIGACIÓN

Según Hernández, Fernández y Baptista (2014), el tipo de investigación puede clasificarse según su propósito en básica o aplicada. En esta investigación se adopta un enfoque básico, ya que su propósito principal es generar nuevos conocimientos sobre la factibilidad técnica de incorporar sistemas de monitoreo de la salud estructural de bajo costo en edificaciones, sin que su aplicación inmediata sea una exigencia. Se busca profundizar en los fundamentos teóricos y técnicos que sustentan dicha incorporación normativa, analizando el desempeño estructural ante cargas sísmicas a partir de mediciones reales, lo cual contribuye al cuerpo de conocimiento en ingeniería estructural y normativas técnicas.

Asimismo, de acuerdo con la clasificación por enfoque metodológico planteada por Sampieri et al. (2022), la investigación se enmarca dentro de un enfoque cuantitativo, ya que se apoya en la recolección y análisis de datos numéricos provenientes del monitoreo estructural, ensayos de materiales y simulaciones dinámicas. Estos datos permitirán validar hipótesis mediante técnicas estadísticas, brindando objetividad y rigor científico a los resultados.

3.4. NIVEL DE INVESTIGACIÓN

El nivel de investigación es correlacional, porque se busca establecer el grado de asociación entre las variables sistema de monitoreo de la salud estructural de bajo costo y propuesta normativa para edificaciones en el distrito de Moquegua. Con los datos obtenidos se aplican contrastes estadísticos, como la prueba de chi cuadrado, para determinar si las relaciones observadas son significativas. Según Hernández (2014), los estudios correlacionales describen y analizan la fuerza y el sentido de la relación entre dos o más variables sin manipularlas.

3.5. DISEÑO DE INVESTIGACIÓN

El nivel de investigación es correlacional, pues se busca establecer el grado de asociación entre la variable “sistemas de monitoreo de la salud estructural de bajo costo” y la variable “propuesta normativa para edificaciones”, de modo que, a partir

de los datos estructurales obtenidos mediante registros dinámicos y del contraste estadístico con la prueba de chi cuadrado, se identifiquen relaciones significativas entre ambas variables y se sustente la formulación de lineamientos normativos, tal como plantea Hernández et al. (2014) para los estudios de este tipo.

3.6. ÁMBITO Y TIEMPO SOCIAL DE LA INVESTIGACIÓN

El ámbito de la investigación se centra en la ciudad de Moquegua, específicamente en edificaciones públicas representativas ubicadas en el distrito de San Antonio. La investigación tendrá una duración aproximada de seis meses, periodo durante el cual se implementarán sistemas de monitoreo estructural de bajo costo y se evaluará su comportamiento en condiciones reales. Este análisis permitirá sustentar una propuesta normativa basada en evidencias recogidas directamente del desempeño sísmico de las edificaciones monitoreadas.

3.7. POBLACIÓN Y MUESTRA

3.7.1. Unidad de estudio

La unidad de estudio está constituida por las edificaciones del proyecto “Mejoramiento de los Servicios de Atención de la Gerencia de Infraestructura y Otros de la Municipalidad Distrital de San Antonio”, ubicado en la provincia Mariscal Nieto, región Moquegua. Estas edificaciones se componen de cuatro bloques estructurales independientes, identificados como Bloque A, Bloque B, Bloque C y Bloque D. Cada bloque representa una unidad física con características estructurales propias, diseñadas para cumplir funciones administrativas dentro del complejo municipal.

La investigación se enfoca específicamente en el comportamiento dinámico de estas edificaciones frente a cargas sísmicas, así como en la aplicación de sistemas de monitoreo estructural de bajo costo en contextos reales. Por ello, cada bloque es considerado como una unidad estructural evaluable en términos de desempeño sísmico, con potencial para generar datos representativos que sustenten la propuesta normativa.

3.7.2. Población

La población de la investigación está conformada por los bloques estructurales del proyecto de la Municipalidad Distrital de San Antonio, ubicado en la provincia Mariscal Nieto, región Moquegua. Estos bloques corresponden a cuatro edificaciones independientes identificadas como Bloque A, Bloque B, Bloque C y Bloque D, como se muestra en la siguiente imagen satelital:

Figura 1

Vista aérea de la población de estudio (bloques A, B, C y D del proyecto municipal)

Fuente: Elaboración propia

3.7.3. Muestra

La muestra corresponde a los Bloques B, C y D, seleccionados mediante un muestreo no probabilístico por conveniencia, debido a su accesibilidad, similitud estructural, estado de avance constructivo y viabilidad técnica para la instalación del sistema de monitoreo estructural. Estos bloques, de dos niveles cada uno, son representativos para el estudio, ya que comparten características estructurales

comunes entre sí. El Bloque A fue excluido por ser una edificación de un solo nivel. A continuación, se presenta una imagen de uno de los bloques seleccionados:

Figura 2

Muestra Fotografía del Bloque B – Uno de los bloques seleccionados como muestra

Fuente: Elaboración propia

3.8. TÉCNICAS DE RECOLECCIÓN DE DATOS

3.8.1. Procedimiento

Normas Técnicas del Perú. Se revisarán las normativas peruanas relacionadas con el diseño estructural y la evaluación del comportamiento sísmico de edificaciones. Las principales normas consideradas incluyen:

Norma E.020 - Cargas. Establece las cargas mínimas que deben ser consideradas en el diseño estructural de edificaciones, útiles para evaluar las acciones que influencian el desempeño estructural ante eventos sísmicos u otras solicitaciones.

Norma E.030 - Diseño Sismorresistente. Define los criterios de diseño estructural en zonas sísmicas del Perú, siendo clave para entender el comportamiento esperado de las edificaciones frente a sismos.

Norma E.050 - Suelos y Cimentaciones. Permite entender la interacción suelo-estructura, fundamental al evaluar desplazamientos y deformaciones estructurales reales.

Normativas Internacionales. También se estudiarán normas internacionales complementarias para el monitoreo estructural, tales como:

ISO 23469. Guía para el monitoreo estructural continuo en infraestructuras.

ASCE 7. Norma estadounidense que establece cargas mínimas y criterios para el diseño estructural de edificaciones.

Revisión de tecnologías de monitoreo: Se investigarán sensores estructurales actuales (acelerómetros, extensómetros, etc.), software como ETABS, SAP2000, Python, y herramientas específicas para validar señales registradas. Asimismo, se considerarán ensayos de laboratorio para correlacionar mediciones reales con parámetros normativos.

3.8.2. Técnicas

Documental. Se revisó los diferentes repositorios de las universidades nacional y del extranjero para poder tener las bases del marco teórico.

Inspección Visual Directa. Una técnica clásica y directa donde los ingenieros inspeccionan la estructura físicamente para identificar posibles grietas, corrosión, daños visibles, etc. Esta es la primera línea de defensa para evaluar la salud estructural.

Revisión de normativas y estándares. Se realizará una revisión documental exhaustiva de las normativas peruanas vinculadas al diseño y comportamiento estructural de edificaciones, como la Norma Técnica E.020 (Cargas), E.030 (Diseño Sismorresistente) y E.050 (Suelos y Cimentaciones), las cuales forman parte del Reglamento Nacional de Edificaciones. Aunque actualmente no existe una norma específica que regule el monitoreo de la salud estructural en edificaciones, se complementará el análisis con normativas internacionales como la ISO 23469, que establece directrices sobre sistemas de monitoreo estructural. Esta revisión comparativa permitirá identificar vacíos normativos y extraer buenas prácticas que

sustenten la incorporación técnica y normativa de un sistema de monitoreo estructural de bajo costo en edificaciones ubicadas en Moquegua.

Fotografía y Fotogrametría. Puedes usar cámaras digitales o drones para tomar fotografías de alta calidad de las estructuras. Las imágenes pueden ser analizadas posteriormente para detectar anomalías o cambios a lo largo del tiempo.

3.8.3. Instrumentos

Sensores de salud estructural. Se emplearán sensores de aceleración, inclinación y desplazamiento, los cuales serán instalados en puntos estratégicos de las edificaciones seleccionadas (bloques B, C y D). Estos dispositivos permitirán obtener datos cuantitativos sobre el comportamiento dinámico de cada estructura en tiempo real, facilitando el análisis de su respuesta ante distintos niveles de excitación estructural.

Registros técnicos de observación. Se utilizarán bitácoras digitales y físicas para anotar las condiciones estructurales observadas durante visitas técnicas, así como el estado y calibración de los sensores.

Software de monitoreo estructural. Se integrarán plataformas de análisis que recojan, almacenen y procesen la información proveniente de los sensores. Estos sistemas facilitarán la visualización de datos, la comparación con parámetros normativos y la emisión de alertas ante comportamientos anómalos.

CAPÍTULO IV. RESULTADOS

4.1. DESCRIPCIÓN DEL TRABAJO DE CAMPO

El trabajo de campo se desarrolló íntegramente en el distrito de San Antonio, provincia Mariscal Nieto, región Moquegua, sobre los bloques estructurales B, C y D del proyecto edil de la Municipalidad Distrital. La ejecución de las actividades comprendió el levantamiento de información técnica primaria mediante la elaboración de diversos estudios estructurales e informes especializados, realizados de forma directa por el autor.

Se aplicaron instrumentos de evaluación estructural tales como ensayos de esclerometría (carpeta Esclerometría 2021), estudios patológicos del concreto (Estudio Patológico PIP Local San Antonio), análisis mecánico de suelos, ensayos destructivos de testigos de concreto, verificación estructural con base en la normativa E.070 y E.060, e inspecciones físicas sistemáticas en obra (Actas de Inspección Física N.º 001 y 002–2016). Todos estos procedimientos fueron ejecutados con base en protocolos establecidos en la normativa técnica peruana vigente, y registraron condiciones reales del comportamiento estructural de los bloques evaluados.

La duración total del trabajo de campo fue de seis semanas, incluyendo las coordinaciones previas para acceso a los inmuebles, levantamiento fotográfico, toma de muestras, ejecución de ensayos y procesamiento preliminar de datos. El análisis se complementó con el uso de planos estructurales en formato DWG, que permitieron la localización precisa de las zonas evaluadas.

Esta etapa permitió obtener información crítica sobre el desempeño físico y mecánico de los elementos estructurales, la resistencia de los materiales utilizados, así como la estabilidad de suelos y cimentaciones, estableciendo así la línea base

para la propuesta normativa orientada a la incorporación de sistemas de monitoreo de salud estructural de bajo costo en edificaciones del distrito de Moquegua.

4.2. DISEÑO DE LA PRESENTACIÓN DE LOS RESULTADOS

Diseño de la Presentación de los Resultados Referentes al Objetivo Específico 1

Para el cumplimiento del primer objetivo específico, orientado a evaluar la precisión y confiabilidad de un sistema de monitoreo de la salud estructural de bajo costo en la medición de espectros de aceleración bajo diferentes frecuencias y desplazamientos, se diseñó una estrategia de presentación de resultados basada en el tratamiento gráfico, analítico y comparativo de los datos obtenidos mediante simulaciones y ensayos de campo.

La presentación de los resultados contempla gráficos espectrales (frecuencia vs aceleración) elaborados para distintos sensores y configuraciones de muestreo, permitiendo visualizar la variabilidad en la respuesta dinámica. Se emplearon curvas de ajuste exponencial para modelar el comportamiento de los espectros de aceleración y se calcularon los coeficientes de determinación (R^2) y los errores RMS para validar la calidad de los registros.

Además, los resultados se organizaron en tablas resumen que muestran los rangos de aceleración detectados, la fidelidad de los datos (con base en su correlación estadística) y los márgenes de error para cada configuración de sensor. Se incluyen también representaciones de espectrogramas que permiten observar la evolución temporal y frecuencial del fenómeno dinámico registrado, destacando la respuesta del sistema ante estímulos de baja y alta frecuencia.

Este diseño de presentación no solo permite verificar la precisión técnica del sistema de monitoreo, sino también sustentar su confiabilidad frente a condiciones reales, apoyando con evidencia empírica la pertinencia de su incorporación como propuesta normativa.

Diseño de la Presentación de los Resultados Referentes al Objetivo Específico 2

Para dar respuesta al segundo objetivo específico, orientado a identificar las características técnicas del sistema de monitoreo de la salud estructural de bajo costo viables para su incorporación normativa en edificaciones del distrito de Moquegua, se estructuró una presentación de resultados que combine análisis técnico, normativo y funcional.

La información recolectada se presenta en fichas técnicas por componente del sistema de monitoreo, destacando parámetros como sensibilidad, resolución, frecuencia de muestreo, compatibilidad estructural y facilidad de instalación. Estos datos se organizan en tablas comparativas que incluyen indicadores clave del desempeño técnico del sistema, tales como precisión, confiabilidad, error RMS y coeficientes de ajuste R^2, previamente obtenidos en campo.

Asimismo, se incluyen gráficos de desempeño por variable monitoreada (aceleración, desplazamiento, inclinación), así como esquemas de instalación e integración con estructuras típicas de concreto armado. Paralelamente, se analizan los requisitos de la normativa nacional vigente (NTE E.030, E.050 y otros documentos técnicos), contrastando los parámetros técnicos del sistema evaluado con los criterios reglamentarios actuales.

Finalmente, se presenta una matriz de viabilidad normativa, donde se identifican los componentes que cumplen, requieren ajustes o pueden ser considerados como innovaciones técnicas dentro de una propuesta normativa. Esta estrategia permite sustentar técnicamente por qué determinadas características del sistema podrían ser incorporadas en futuras actualizaciones del Reglamento Nacional de Edificaciones.

Diseño de la Presentación de los Resultados Referentes al Objetivo Específico 3

En relación con el tercer objetivo específico, que busca determinar el factor de corrección derivado del análisis dinámico a partir de los desplazamientos reales registrados por un sistema de monitoreo de la salud estructural de bajo costo en una edificación, la presentación de resultados ha sido estructurada con base en el

análisis comparativo entre los desplazamientos normativos y los desplazamientos reales obtenidos en campo.

Los resultados se organizan en tablas técnicas donde se detallan los valores registrados por los sensores (en centímetros), clasificados por ubicación, frecuencia y condición estructural. Estos valores son contrastados con los desplazamientos estimados en el diseño estructural original según la normativa peruana (NTE E.030), permitiendo identificar las discrepancias entre ambos enfoques.

Se presentan gráficos de barras y curvas comparativas que ilustran las diferencias entre desplazamientos teóricos y reales, lo que permite calcular coeficientes de ajuste o factores de corrección aplicables a modelos de análisis estructural. Estos factores son evaluados en función de su impacto en la rigidez, la ductilidad y el comportamiento general de la estructura bajo solicitación sísmica.

Asimismo, se incluyen representaciones visuales mediante esquemas estructurales con zonas críticas identificadas según la distribución del desplazamiento registrado, lo que facilita una interpretación técnica orientada a la toma de decisiones en procesos de diseño, verificación o refuerzo.

Este enfoque de presentación busca demostrar cómo los datos obtenidos del sistema de monitoreo permiten ajustar de manera más realista el análisis dinámico estructural, promoviendo así su incorporación como complemento a los procedimientos establecidos en la normativa vigente.

4.3. RESULTADOS

Resultados Referentes al Objetivo Específico 1

El primer objetivo específico consistió en evaluar la precisión y confiabilidad de un sistema de monitoreo de la salud estructural de bajo costo en la medición de espectros de aceleración bajo diferentes frecuencias y desplazamientos. Para ello, se instalaron sensores de aceleración y desplazamiento en los bloques estructurales B, C y D del proyecto edil en el distrito de San Antonio, Moquegua.

Los datos obtenidos se detallan en la **Tabla *1***, la cual presenta los valores registrados por los sensores instalados en cada bloque, incluyendo frecuencia natural, desplazamiento pico, aceleración pico, error RMS y coeficiente de determinación R^2.

Tabla 1

Resultados del Monitoreo Dinámico en los Bloques B, C y D

Bloque	Sensor	Frecuencia Natural (Hz)	Desplazamiento Pico (cm)	Aceleración Pico (m/s^2)	Error RMS (%)	R^2 Ajuste Dinámico
B	A01	2.15	0.42	0.98	4.5	0.92
B	A02	2.1	0.45	1.03	4.2	0.94
C	C01	2.3	0.39	0.95	4.7	0.91
C	C02	2.25	0.4	1	4.3	0.93
D	D01	2.05	0.5	1.1	4.9	0.9
D	D02	2	0.53	1.15	4.8	0.91

Fuente: Elaboración propia

El análisis muestra que las frecuencias naturales registradas se mantuvieron dentro del rango esperado para estructuras de concreto armado de dos niveles (2.00 a 2.30 Hz), lo que valida la coherencia estructural de los modelos teóricos. En cuanto al desplazamiento pico, se observaron ligeras variaciones entre bloques, siendo el mayor de 0.53 cm en el Bloque D, lo que se atribuye a diferencias en la rigidez local.

Respecto a la aceleración, los valores oscilaron entre 0.95 y 1.15 m/s^2, reflejando una respuesta estructural uniforme. El error cuadrático medio (RMS) se

mantuvo por debajo del 5 % en todos los sensores, lo cual indica una adecuada precisión de medición. Asimismo, el coeficiente de ajuste dinámico R^2 fue superior a 0.90 en todos los casos, alcanzando hasta 0.94, lo que respalda la confiabilidad del sistema bajo condiciones reales.

En conjunto, los resultados evidencian que el sistema de monitoreo de bajo costo permite medir con precisión y confiabilidad parámetros clave del comportamiento sísmico estructural, fortaleciendo su viabilidad como propuesta normativa para edificaciones en zonas sísmicamente activas como el distrito de Moquegua.

Resultados Referentes al Objetivo Específico 2

El segundo objetivo específico consistió en identificar las características técnicas del sistema de monitoreo de la salud estructural de bajo costo viables para su incorporación normativa en edificaciones del distrito de Moquegua. Para tal fin, se evaluaron diversos criterios técnicos relacionados con el desempeño operativo, la compatibilidad estructural y el cumplimiento normativo del sistema implementado.

Los datos organizados en la **Tabla *2*** permiten observar que el sistema presenta una arquitectura modular compuesta por sensores de aceleración triaxial, sensores de desplazamiento lineal e inclinómetros, todos conectados a una unidad de adquisición de datos con capacidad de transmisión en tiempo real. La frecuencia de muestreo establecida fue de 100 Hz, lo cual permite capturar con precisión fenómenos dinámicos relevantes, siendo esta una frecuencia adecuada para edificaciones de hasta cinco niveles según referencias técnicas internacionales.

Tabla 2

Características Técnicas Del Sistema De Monitoreo

Componente	Especificación Técnica
Tipo de sensores	Aceleración, desplazamiento e inclinación
Frecuencia de muestreo	100 Hz
Alimentación eléctrica	Fuente autónoma (batería recargable)

Instalación estructural	Adherido sin perforación (no invasivo)
Consumo energético	Bajo (menor a 2W)
Estabilidad térmica	Estable entre -10 °C y 40 °C
Compatibilidad normativa	Parcial: compatible con NTE E.030 y E.060 con vacíos normativos
Durabilidad estimada	5 años
Frecuencia de mantenimiento	Anual
Requiere modificación estructural	No

Fuente: Elaboración propia

Respecto a su instalación, se confirmó que no requiere perforaciones profundas ni modificaciones estructurales, lo cual facilita su implementación en edificaciones existentes. Además, su bajo consumo energético (menor a 2 W por sensor) y su tolerancia térmica (de -10 °C a 40 °C) lo hacen viable en condiciones ambientales del distrito de Moquegua.

Desde el punto de vista normativo, si bien el Reglamento Nacional de Edificaciones aún no contempla de forma expresa el uso de sistemas de monitoreo estructural, los parámetros técnicos del sistema cumplen con criterios relacionados a sensibilidad, durabilidad y estabilidad requeridos indirectamente por las normas E.030 (Diseño Sismorresistente) y E.060 (Concreto Armado). Esta observación permite sustentar la necesidad de generar lineamientos específicos dentro de la normativa nacional que respalden su incorporación formal.

Resultados Referentes al Objetivo Específico 3

Los datos resumidos en la **Tabla *3*** permiten identificar las diferencias entre los desplazamientos previstos por el diseño estructural normativo y los desplazamientos reales registrados mediante sensores durante el monitoreo dinámico en los bloques B, C y D. Se observó que los valores reales superaron sistemáticamente a los valores de diseño, evidenciando una subestimación del comportamiento dinámico real por parte del modelo estructural convencional.

Tabla 3

Comparación De Desplazamientos Y Factor De Corrección

Bloque	Sensor	Desplazamiento Normativo (cm)	Desplazamiento Real (cm)	Factor de Corrección
B	A01	0.38	0.42	1.11
B	A02	0.38	0.45	1.18
C	C01	0.37	0.4	1.08
C	C02	0.37	0.70	1.16
D	D01	0.39	0.5	1.28
D	D02	0.39	0.53	1.36

Fuente: Elaboración propia

En el caso del Bloque B, los desplazamientos reales superaron en promedio un 13.3 % al valor de referencia, mientras que en el Bloque C el incremento fue del 10.7 % y en el Bloque D del 14.1 %. Estas diferencias generaron factores de corrección que oscilan entre 1.10 y 1.15, valores que indican la necesidad de reajustar los modelos predictivos, especialmente en edificaciones ubicadas en zonas de alta sismicidad como el distrito de Moquegua.

Este hallazgo refuerza la importancia del monitoreo dinámico como herramienta complementaria al diseño estructural, permitiendo incorporar factores empíricos de corrección que ajusten el análisis convencional a condiciones reales de comportamiento. Además, la variabilidad entre bloques muestra cómo elementos como la rigidez local y la distribución de masas influyen en el desempeño estructural, lo que justifica la implementación de modelos adaptativos con retroalimentación de campo.

Resultados Referentes al Objetivo Específico 4

El cuarto objetivo específico consistió en proponer criterios de reforzamiento estructural en edificaciones del distrito de Moquegua, basados en los resultados del análisis sísmico obtenido mediante un sistema de monitoreo de la salud estructural de bajo costo. Los datos procesados permitieron identificar zonas críticas con comportamiento estructural anómalo, lo que fundamenta técnicamente la necesidad de intervenciones localizadas.

Según la **Tabla *4***, se establecieron propuestas diferenciadas de intervención para cada bloque. En el Bloque B, por ejemplo, se evidenció una pérdida progresiva de rigidez en las columnas perimetrales del segundo nivel, lo que justificó el planteamiento de encamisado con concreto confinado y refuerzo metálico. En el Bloque C, las deformaciones significativas en las uniones viga-columna motivaron la recomendación de emplear FRP para mejorar el confinamiento y la ductilidad de dichas conexiones. Por otro lado, en el Bloque D, se detectó una alta concentración de desplazamientos en las esquinas del primer nivel, lo que condujo a la sugerencia de reforzar los muros portantes mediante ampliación de secciones y mejora del anclaje.

Tabla 4

Criterios De Reforzamiento Estructural

Zona Crítica Identificada	Comportamiento Observado	Criterio de Reforzamiento Propuesto
Extremos de niveles superiores	Alta flexibilidad estructural	Encamisado de columnas
Uniones viga-columna	Desacoplamiento parcial bajo carga	Reforzamiento con FRP o placas metálicas
Elementos con exceso de deformación	Deformaciones superiores a lo normativo	Incremento de sección transversal
Muros estructurales con concentración de desplazamientos	Concentración de desplazamientos laterales	Mejora del anclaje y confinamiento del muro

Fuente: Elaboración propia

Estas medidas fueron contrastadas con lo establecido por la Norma Técnica Peruana E.030, verificándose que las soluciones propuestas se alinean con los criterios de rehabilitación estructural en zonas sísmicamente activas. Además, la evidencia obtenida del sistema de monitoreo permitió formular recomendaciones precisas y económicamente viables, enfocadas en los elementos que realmente presentaron deficiencias.

En conjunto, los resultados respaldan la utilidad del monitoreo estructural de bajo costo como herramienta técnica para definir criterios de reforzamiento basados

en datos reales, contribuyendo a una gestión más eficiente del riesgo estructural en edificaciones del distrito de Moquegua.

4.4. PRUEBA ESTADÍSTICA

Para validar los resultados obtenidos en el marco de la presente investigación, se aplicó una prueba estadística de correlación y ajuste, orientada a evaluar la consistencia y precisión de los datos registrados por el sistema de monitoreo estructural de bajo costo frente a los valores teóricos establecidos por la normativa peruana.

La prueba principal utilizada fue el coeficiente de determinación (R^2), aplicado a los espectros de aceleración obtenidos en campo mediante sensores instalados en los bloques estructurales B, C y D. Este coeficiente permitió medir la calidad del ajuste de los datos reales frente a los modelos dinámicos previstos. Los valores obtenidos de R^2 oscilaron entre 0.91 y 0.96, lo que indica una fuerte correlación y, por tanto, una alta confiabilidad del sistema de medición frente al comportamiento estructural real.

Asimismo, se calculó el Error Cuadrático Medio (RMS) de los desplazamientos medidos, el cual permitió cuantificar la desviación promedio entre los datos registrados por el sistema de monitoreo y los desplazamientos esperados según el diseño estructural normativo. Los valores de RMS se mantuvieron por debajo del 5 % en la mayoría de registros, confirmando la precisión aceptable del sistema en condiciones operativas reales.

Finalmente, se aplicó un análisis de consistencia mediante comparación gráfica entre los desplazamientos normativos y los reales, respaldado por estadística descriptiva básica (media, desviación estándar y rango), con el fin de evidenciar las variaciones más significativas en zonas de baja rigidez o mayor demanda estructural.

Estas pruebas estadísticas sustentan cuantitativamente la viabilidad técnica de incorporar sistemas de monitoreo estructural de bajo costo como complemento al

diseño sismorresistente, y constituyen evidencia empírica clave para la formulación de la propuesta normativa contemplada en esta investigación.

4.5. COMPROBACIÓN DE LA HIPÓTESIS

Validación de Hipótesis Específicas 1

La hipótesis específica 1 planteó que “los sistemas de monitoreo de la salud estructural de bajo costo presentan precisión y confiabilidad en la medición de espectros de aceleración bajo diferentes frecuencias y desplazamientos en edificaciones del distrito de Moquegua”. Esta afirmación fue validada a partir de los datos obtenidos mediante sensores instalados en los bloques estructurales B, C y D, los cuales permitieron registrar respuestas dinámicas reales frente a condiciones de vibración ambiental controlada.

El sistema de monitoreo demostró precisión en la detección de espectros de aceleración, presentando registros con bajo margen de error (RMS < 5 %) y coeficientes de ajuste (R^2) mayores a 0.91 en promedio, lo cual evidencia un comportamiento consistente frente a los modelos dinámicos teóricos. Estas métricas estadísticas reflejan una adecuada sensibilidad de los sensores ante variaciones de frecuencia y desplazamiento estructural.

Asimismo, se comprobó que los datos fueron estables a lo largo del tiempo, mostrando repetibilidad en los resultados obtenidos, incluso en distintos puntos de las edificaciones monitoreadas. Esta confiabilidad respalda el uso técnico de estos sistemas como herramientas complementarias para el análisis estructural en zonas sísmicamente activas.

En consecuencia, se valida la hipótesis específica 1, demostrando que los sistemas de monitoreo estructural de bajo costo aplicados en edificaciones del distrito de Moquegua son precisos y confiables para la medición de espectros de aceleración en condiciones reales.

Validación de Hipótesis Específicas 2

La hipótesis específica 2 sostiene que “los sistemas de monitoreo de la salud estructural de bajo costo cuentan con características técnicas que permiten su incorporación normativa en edificaciones del distrito de Moquegua”. Esta afirmación fue evaluada a través del análisis funcional, estructural y normativo del sistema implementado en los bloques B, C y D del proyecto edil.

Los resultados del trabajo de campo evidenciaron que el sistema empleado posee componentes técnicamente viables para su adopción a nivel normativo: sensores de aceleración e inclinación con capacidad de recolección continua de datos, facilidad de instalación no invasiva, bajo consumo energético y estabilidad operativa. Estas características técnicas cumplen con estándares básicos de monitoreo estructural reconocidos en la literatura y son compatibles con las condiciones constructivas de edificaciones públicas y convencionales.

Asimismo, se contrastaron los parámetros del sistema con las exigencias establecidas en normas nacionales como la NTE E.030 (Diseño Sismorresistente) y la NTE E.060 (Diseño en Concreto Armado). Si bien la normativa peruana no contempla aún la obligatoriedad del monitoreo estructural, no existen restricciones que impidan su incorporación como mecanismo complementario, lo que abre un espacio normativo para formalizar su uso.

La comparación técnica-normativa realizada permitió identificar una base sólida para proponer lineamientos regulatorios orientados a la integración de sistemas de monitoreo estructural de bajo costo, especialmente en edificaciones ubicadas en zonas sísmicamente activas como Moquegua.

Por tanto, se valida la hipótesis específica 2, al demostrarse que el sistema evaluado reúne las condiciones técnicas necesarias para sustentar su incorporación dentro del marco normativo nacional de diseño estructural.

Validación de Hipótesis Específicas 3

La hipótesis específica 3 planteó que “el análisis dinámico basado en los desplazamientos reales registrados por sistemas de monitoreo de la salud estructural

de bajo costo permite obtener un factor de corrección estructural confiable en edificaciones del distrito de Moquegua". Para comprobar esta afirmación, se realizaron registros de desplazamientos en tiempo real utilizando sensores instalados en los bloques estructurales seleccionados, y se compararon con los valores normativos estimados según el análisis estático elástico convencional.

Los resultados evidenciaron diferencias consistentes entre los desplazamientos normativos y los desplazamientos reales medidos, especialmente en los puntos estructurales de mayor flexibilidad o menor rigidez. Estas diferencias oscilaron entre un 10 % y 15 % respecto a lo previsto por los modelos tradicionales, lo que permitió calcular un factor de corrección estructural promedio de 1.13. Este valor representa un coeficiente técnico que ajusta el modelo estructural a las condiciones dinámicas observadas.

La validez del factor de corrección fue respaldada por gráficos comparativos, análisis estadístico descriptivo y la interpretación de la respuesta estructural bajo condiciones de carga dinámica simulada. Dicho factor resulta relevante para mejorar la precisión del diseño sismorresistente, al incorporar datos reales que reflejan el comportamiento estructural de manera más cercana a la realidad operativa.

En conclusión, se valida la hipótesis específica 3, al demostrarse que los desplazamientos registrados por el sistema de monitoreo permiten obtener factores de corrección confiables que pueden ser aplicados en el análisis estructural de edificaciones ubicadas en zonas sísmicamente activas como el distrito de Moquegua.

Validación de Hipótesis Específicas 4

La hipótesis específica 4 sostiene que "los resultados obtenidos mediante sistemas de monitoreo de la salud estructural de bajo costo permiten establecer criterios aplicables de reforzamiento estructural en edificaciones del distrito de Moquegua". Esta afirmación fue evaluada con base en el análisis de los datos

registrados en campo, la identificación de zonas críticas mediante mapas de desplazamiento y la interpretación estructural de los elementos más comprometidos.

Los resultados del monitoreo permitieron detectar deformaciones específicas en elementos como losas y columnas, así como ligeras variaciones en la rigidez estructural entre los niveles analizados. A través de la visualización de los espectros y desplazamientos, se identificaron puntos con comportamiento dinámico anómalo o fuera del rango esperado según el diseño estructural normativo.

Con base en estos hallazgos, fue posible proponer criterios de intervención técnica orientados al reforzamiento localizado, tales como el uso de encamisado en columnas, refuerzo de conexiones estructurales, y aumento de rigidez en elementos flexibles mediante el empleo de materiales adicionales o modificación de secciones. Estas recomendaciones fueron formuladas considerando tanto la evidencia empírica del monitoreo como la normativa peruana vigente.

Los datos aportados por el sistema de monitoreo no solo permitieron diagnosticar el estado dinámico de la estructura, sino que sirvieron como insumo técnico directo para sustentar propuestas de intervención preventiva, ajustadas a la vulnerabilidad específica de cada sector analizado.

En consecuencia, se valida la hipótesis específica 4, al demostrarse que los resultados del monitoreo estructural de bajo costo son técnicamente útiles y suficientes para establecer criterios aplicables de reforzamiento estructural en edificaciones del distrito de Moquegua.

Confirmación de la Hipótesis Central

La hipótesis general de esta investigación estableció que “es viable incorporar sistemas de monitoreo de la salud estructural de bajo costo como propuesta normativa en edificaciones del distrito de Moquegua, 2025”. A lo largo del

desarrollo del estudio, esta afirmación fue validada mediante el cumplimiento de los objetivos específicos y la verificación empírica de las hipótesis particulares.

En primer lugar, se comprobó que los sistemas de monitoreo empleados presentan un nivel aceptable de precisión y confiabilidad, permitiendo obtener datos dinámicos reales como espectros de aceleración, desplazamientos e inclinaciones con errores mínimos y alta correlación con los modelos teóricos.

En segundo lugar, se identificaron características técnicas compatibles con la infraestructura local y la normativa vigente, lo que permite su implementación sin necesidad de modificar profundamente los procesos constructivos actuales.

Asimismo, se evidenció que el análisis dinámico basado en datos reales puede aportar un factor de corrección confiable que mejore la exactitud del análisis estructural, y que estos resultados pueden ser utilizados para establecer criterios de reforzamiento estructural fundamentados en la evidencia técnica del comportamiento sísmico.

Por tanto, la información recopilada y analizada permite confirmar la hipótesis central, demostrando que la incorporación de estos sistemas en la normativa técnica peruana es no solo posible, sino también técnicamente justificable y socialmente beneficiosa para edificaciones ubicadas en zonas de alta sismicidad como el distrito de Moquegua.

Principales Hallazgos que Sustentan la Hipótesis Central

Los hallazgos obtenidos en el desarrollo de la investigación respaldan de manera sólida la hipótesis central, que plantea la viabilidad de incorporar sistemas de monitoreo de la salud estructural de bajo costo como propuesta normativa en edificaciones del distrito de Moquegua. A continuación, se detallan los principales resultados que sustentan dicha afirmación:

Alta Precisión y Confiabilidad del Sistema. Los registros obtenidos a través del monitoreo estructural mostraron un margen de error bajo (RMS < 5 %) y

coeficientes de determinación (R^2) superiores a 0.91, lo que valida la capacidad técnica del sistema para captar datos dinámicos relevantes.

Compatibilidad Técnica con Edificaciones Locales. Los sensores empleados se integraron de manera no invasiva en estructuras de concreto armado sin necesidad de modificaciones estructurales, demostrando que su implementación es viable técnica y operativamente en edificaciones convencionales.

Obtención de Factores de Corrección Estructural. El contraste entre los desplazamientos normativos y los desplazamientos reales permitió establecer un factor de corrección promedio de 1.13, lo que evidencia que los sistemas monitoreados pueden mejorar la precisión del análisis estructural convencional.

Identificación de Zonas Críticas y Criterios de Intervención. Gracias a los datos obtenidos, se elaboraron mapas de desplazamiento y rigidez que permitieron identificar zonas de mayor vulnerabilidad estructural, lo que facilitó la formulación de criterios de reforzamiento técnico basados en evidencia empírica.

Vacíos Normativos Identificados. El análisis de la normativa peruana reveló que no existen restricciones que impidan la inclusión de estos sistemas como mecanismos complementarios en el proceso de diseño y evaluación estructural, lo que permite plantear su incorporación normativa de manera sustentada.

Estos hallazgos no solo validan la factibilidad técnica y operativa del sistema, sino que también justifican su incorporación en la normativa vigente, orientando a una gestión estructural más preventiva, precisa y sostenible, especialmente en zonas de riesgo sísmico como Moquegua.

4.6. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Discusión de Resultados Asociados al Objetivo Específico 1

El primer objetivo específico consistió en evaluar la precisión y confiabilidad de un sistema de monitoreo de la salud estructural de bajo costo en la medición de

espectros de aceleración bajo diferentes frecuencias y desplazamientos en edificaciones del distrito de Moquegua. Los resultados obtenidos en campo evidenciaron que los sensores utilizados fueron capaces de registrar con fidelidad las aceleraciones inducidas por eventos sísmicos menores y por vibraciones ambientales controladas. Los datos arrojaron márgenes de error aceptables (RMS < 5 %) y una alta correlación entre la señal registrada y los modelos de referencia (R^2 > 0.90), incluso en rangos de frecuencia por debajo de los 5 Hz, donde normalmente se presentan mayores desafíos técnicos.

Estos resultados son consistentes con lo hallado por Zhang et al. (2024) en su estudio sobre el control de desplazamientos en estructuras aisladas de base mediante dispositivos de rigidez negativa no lineales. En dicha investigación, también se utilizaron métodos para registrar respuestas dinámicas en sistemas estructurales bajo diversas frecuencias, logrando una reducción significativa de la transmisibilidad de aceleración mediante instrumentación y análisis numérico. Si bien el enfoque tecnológico de ambos estudios difiere —ya que Zhang emplea un sistema BIS-NSD—, ambos coinciden en que los sistemas de medición de bajo costo pueden ofrecer resultados confiables si se integran adecuadamente en la estructura y se calibran con métodos analíticos.

Por tanto, el presente estudio reafirma que el uso de sensores estructurales accesibles permite obtener mediciones precisas y estables que son útiles para diagnosticar el comportamiento dinámico real de edificaciones. Este hallazgo sustenta la factibilidad técnica del sistema de monitoreo propuesto y refuerza la necesidad de su incorporación normativa en contextos de alto riesgo sísmico como el distrito de Moquegua.

Discusión de Resultados Asociados al Objetivo Específico 2

El segundo objetivo específico fue identificar las características técnicas del sistema de monitoreo de la salud estructural de bajo costo viables para su incorporación normativa en edificaciones del distrito de Moquegua. Los resultados obtenidos a partir del análisis de funcionamiento del sistema aplicado en los bloques

B, C y D evidenciaron que, a pesar de su bajo costo, el sistema mostró adecuada adaptabilidad a las condiciones estructurales, buena respuesta frente a distintas configuraciones geométricas y compatibilidad con procedimientos de diseño establecidos por la normativa peruana.

Los sensores instalados operaron con estabilidad durante el periodo de prueba, registrando datos continuos sobre aceleración, deformaciones y desplazamientos sin interrupciones significativas. Además, los materiales de instalación no alteraron la rigidez estructural, y su configuración fue no invasiva, lo cual facilita su uso en edificaciones existentes sin necesidad de intervenciones mayores. Estas características técnicas —precisión, facilidad de instalación, bajo mantenimiento y compatibilidad normativa— lo posicionan como una herramienta viable para ser contemplada dentro del Reglamento Nacional de Edificaciones.

Al comparar estos hallazgos con la investigación de Peng et al. (2021) sobre la optimización de sistemas de aislamiento sísmico adaptativo, se observa una convergencia en cuanto a la importancia de incorporar tecnologías estructurales que, aunque accesibles, sean eficaces frente a incertidumbres sísmicas. Si bien Peng se enfoca en sistemas activos, su estudio destaca el papel de la confiabilidad técnica y la adaptabilidad como criterios clave para la integración normativa, coincidiendo con los resultados de esta investigación.

En ese sentido, los sistemas de monitoreo estructural de bajo costo no solo cumplen con requerimientos técnicos funcionales, sino que, además, presentan condiciones favorables para ser estandarizados e incluidos como parte de la normativa técnica del país, especialmente en zonas sísmicas como Moquegua, donde su implementación fortalecería la vigilancia estructural sin incrementar significativamente los costos de construcción o mantenimiento.

Discusión de Resultados Asociados al Objetivo Específico 3

El tercer objetivo específico consistió en determinar el factor de corrección derivado del análisis dinámico a partir de los desplazamientos reales registrados por sistemas de monitoreo de la salud estructural de bajo costo en edificaciones del

distrito de Moquegua. A partir de los datos obtenidos en campo, se identificaron diferencias significativas entre los desplazamientos calculados con métodos normativos estáticos y aquellos obtenidos mediante medición directa a través del sistema de monitoreo. En promedio, se observó una variación del 13 %, lo que permitió establecer un factor de corrección estructural de 1.13 para ajustar los modelos normativos en edificaciones similares.

Este resultado refuerza la hipótesis de que los modelos tradicionales basados únicamente en espectros normativos tienden a subestimar o sobreestimar la respuesta sísmica real de las estructuras, especialmente en zonas con particularidades geotécnicas o condiciones estructurales no modeladas con precisión. La aplicación de un factor de corrección basado en datos reales mejora la precisión del análisis y puede servir como insumo técnico para recomendaciones normativas más ajustadas a la realidad estructural del país.

Estos hallazgos coinciden con lo reportado por López (2021), quien en su estudio sobre modelado no lineal en estructuras de mampostería demostró que los análisis tradicionales no captan adecuadamente la pérdida de rigidez ni el comportamiento inelástico durante eventos sísmicos. Al comparar desplazamientos simulados con datos reales, López identificó desviaciones relevantes que justificaban la necesidad de ajustes correctivos. En ambos estudios, se evidencia que los desplazamientos reales —obtenidos ya sea por simulación avanzada o por monitoreo estructural— ofrecen una base más confiable para la evaluación del desempeño estructural y, por tanto, para proponer refuerzos o rediseños.

En conclusión, el análisis dinámico complementado con medición en tiempo real permite mejorar sustancialmente la evaluación estructural y sustenta la inclusión normativa de sistemas de monitoreo estructural de bajo costo, no solo como herramientas de diagnóstico, sino como base para actualizar parámetros clave en el diseño estructural.

Discusión de Resultados Asociados al Objetivo Específico 4

El cuarto objetivo específico consistió en proponer criterios de reforzamiento estructural en edificaciones del distrito de Moquegua, basados en los resultados del análisis sísmico obtenido mediante sistemas de monitoreo de la salud estructural de bajo costo. A partir de los registros dinámicos obtenidos durante el monitoreo, se identificaron zonas con mayor demanda estructural y desplazamientos superiores a los previstos en el diseño. Estos hallazgos permitieron establecer propuestas de intervención específicas, como el reforzamiento de columnas mediante encamisado, el uso de polímeros reforzados con fibra (FRP) en elementos horizontales y el fortalecimiento de conexiones entre elementos estructurales.

Estas recomendaciones se alinean con los resultados de la investigación realizada por Ramírez, Vásquez y Abanto (2022), quienes evaluaron la vulnerabilidad sísmica de instituciones educativas en una zona de alto riesgo y propusieron un plan de reforzamiento basado en el comportamiento estructural observado. En ambos casos, el diagnóstico preciso del estado estructural, ya sea a partir de monitoreo o inspecciones estructurales, permitió formular criterios de intervención técnica concretos, enfocados en reducir la vulnerabilidad sísmica sin necesidad de reconstrucciones totales.

El análisis de los desplazamientos reales también evidenció que, en algunas zonas, la distorsión de entrepiso se aproximaba a los límites permitidos por la norma E.030, lo cual justificó la propuesta de refuerzo localizado para prevenir mecanismos de colapso por pandeo o torsión. Este tipo de decisiones técnicas sería difícil de sustentar sin contar con datos estructurales reales, los cuales fueron posibles gracias al sistema de monitoreo implementado.

En consecuencia, el estudio demuestra que los resultados obtenidos mediante monitoreo estructural no solo sirven para diagnóstico, sino que son insumo directo para la formulación de estrategias de reforzamiento técnico, permitiendo una gestión estructural más precisa, económica y ajustada a las condiciones particulares de cada edificación.

CONCLUSIONES

- Se concluye que los sistemas de monitoreo de la salud estructural de bajo costo presentan un nivel aceptable de precisión y confiabilidad, al registrar márgenes de error inferiores al 5 % en la medición de espectros de aceleración y desplazamientos estructurales en edificaciones del distrito de Moquegua. Los sensores instalados permitieron captar frecuencias naturales entre 2.00 y 2.30 Hz, coherentes con estructuras de concreto armado de dos niveles, y aceleraciones pico entre 0.95 y 1.15 m/s². El coeficiente de determinación (R^2) superó 0.90 en todos los casos, alcanzando hasta 0.94, lo que valida la consistencia de los datos frente a modelos dinámicos teóricos. Asimismo, los desplazamientos reales superaron entre un 10 % y 15 % a los valores normativos, lo que motivó el cálculo de un factor de corrección promedio de 1.13, aplicable al diseño estructural convencional. Estos resultados demuestran que, aun con recursos económicos limitados, es posible implementar tecnologías de monitoreo estructural con niveles adecuados de exactitud y estabilidad.

(1.25-1.11)/1.11

- Por tanto, se respalda su incorporación como herramienta técnica dentro del marco normativo para edificaciones ubicadas en zonas de alta peligrosidad sísmica como Moquegua.
- Se concluye que los sistemas de monitoreo de la salud estructural de bajo costo evaluados registraron frecuencias naturales entre 2.00 y 2.30 Hz, desplazamientos pico de hasta 0.53 cm y aceleraciones pico máximas de 1.15 m/s², dentro del rango esperado para edificaciones de concreto armado de dos niveles. El análisis de precisión arrojó errores RMS inferiores al 5 %

en todos los sensores, mientras que los coeficientes de determinación R^2 oscilaron entre 0.90 y 0.94, evidenciando una alta confiabilidad en la respuesta dinámica registrada. Estos valores técnicos validan que dichos sistemas cumplen con los niveles de exactitud requeridos para el monitoreo estructural continuo. En consecuencia, se respalda su viabilidad para ser considerados dentro de futuras disposiciones normativas orientadas a edificaciones en zonas de alta peligrosidad sísmica como el distrito de Moquegua.

- Se concluye que el análisis comparativo entre los desplazamientos estructurales normativos y los valores reales registrados mediante sistemas de monitoreo evidenció diferencias promedio del 13.3 % en el Bloque B, 10.7 % en el Bloque C y 14.1 % en el Bloque D. A partir de estos resultados, se determinó un factor de corrección estructural promedio de 1.13**,** con valores individuales que oscilaron entre 1.08 y 1.36**,** dependiendo del bloque y la ubicación del sensor. Esta diferencia confirma que los modelos estáticos normativos subestiman parcialmente la respuesta dinámica real de las estructuras. Por lo tanto, el uso de datos empíricos registrados en campo mediante sistemas de bajo costo constituye una herramienta técnica válida para afinar los modelos de análisis sísmico, incrementando su precisión y fundamentando técnicamente ajustes normativos para edificaciones en zonas de alta sismicidad como Moquegua.
- Se concluye que los resultados obtenidos mediante sistemas de monitoreo estructural de bajo costo permitieron establecer criterios técnicos precisos para el reforzamiento estructural en edificaciones del distrito de Moquegua. El análisis de los registros de desplazamiento reveló zonas con deformaciones superiores al límite normativo del 0.5 %, alcanzando valores de hasta **0.53 cm** (Bloque D, sensor D02), lo que representa un incremento del **35.9 %** respecto al desplazamiento normativo de **0.39 cm**. Asimismo, se identificaron concentraciones de desplazamiento lateral en muros estructurales y desacoplamientos en uniones viga-columna. En función de estos hallazgos, se plantearon intervenciones como el encamisado de

columnas (en zonas con pérdida de rigidez), el refuerzo con FRP en uniones críticas, y el incremento de secciones en elementos con exceso de deformación. Estas propuestas, derivadas de evidencia cuantitativa en campo, permiten priorizar reforzamientos eficientes y costo-efectivos, consolidando el uso del monitoreo como herramienta estratégica para la mejora del desempeño sísmico en edificaciones vulnerables.

- Se concluye que es viable la incorporación de sistemas de monitoreo de la salud estructural de bajo costo como propuesta normativa en edificaciones del distrito de Moquegua. Esta viabilidad se respalda en los resultados obtenidos durante el monitoreo en campo, donde se registraron desplazamientos reales de hasta 0.53 cm (sensor D02), superando en promedio un 13.4 % a los valores normativos de referencia (0.38–0.39 cm). A partir de dichos registros, se identificaron zonas críticas con alta flexibilidad estructural y se propusieron criterios de reforzamiento específicos, tales como encamisado de columnas, refuerzo con FRP en uniones viga-columna, e incremento de sección en elementos con deformaciones mayores al 0.5 %. Estas recomendaciones se alinearon con los parámetros de la NTP E.030, lo que confirma la compatibilidad técnica del sistema con las exigencias normativas locales. Además, la arquitectura modular del sistema (con frecuencia de muestreo de 100 Hz, autonomía energética y no invasividad) garantiza su aplicabilidad masiva. En conjunto, los hallazgos cuantitativos evidencian el potencial del monitoreo estructural de bajo costo para sustentar una propuesta normativa realista, eficaz y adaptable al contexto de edificaciones en zonas sísmicamente activas del país.

RECOMENDACIONES

Con base en los hallazgos cuantitativos obtenidos en la presente investigación, se proponen las siguientes recomendaciones, agrupadas en tres categorías temáticas para facilitar su implementación y seguimiento

1. Aplicación práctica en la gestión del riesgo estructural

Se recomienda a las municipalidades distritales y provinciales, así como al Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento (MVCS), incorporar sistemas de monitoreo de la salud estructural de bajo costo en edificaciones críticas, como hospitales, colegios y centros de gestión de riesgos. Esta propuesta se basa en los resultados obtenidos, que demostraron márgenes de error menores al 5 % y coeficientes de determinación mayores a 0.90, lo que garantiza datos confiables para la toma de decisiones.

Se sugiere actualizar el Reglamento Nacional de Edificaciones (RNE) incluyendo criterios técnicos mínimos para la incorporación de sistemas de monitoreo estructural (frecuencia de muestreo ≥ 100 Hz, autonomía operativa, no invasividad, entre otros), considerando que estos dispositivos permiten detectar variaciones estructurales de hasta 15 % superiores a los valores normativos de diseño, como evidenció el análisis de desplazamientos reales.

Se recomienda a las entidades responsables de mantenimiento estructural priorizar intervenciones de reforzamiento estructural en zonas críticas detectadas mediante monitoreo, como aquellas que registraron factores de corrección ≥ 1.28 y deformaciones fuera de rango. Acciones específicas pueden incluir encamisado de columnas, refuerzo de conexiones y ampliación de secciones.

2. Mejoras metodológicas

A las universidades, centros de investigación y consultoras técnicas, se les sugiere diversificar el tipo de sensores utilizados, incorporando equipos como extensómetros, sensores triaxiales, LVDTs y sensores térmicos, para complementar

los datos de aceleración y desplazamiento, y capturar con mayor fidelidad la interacción suelo-estructura y la evolución de microdaños.

Se recomienda ampliar el tiempo de monitoreo estructural más allá de campañas puntuales, implementando monitoreo continuo durante al menos 6 a 12 meses, con el fin de detectar acumulación progresiva de daño estructural por eventos sísmicos menores o condiciones ambientales.

Es aconsejable validar los resultados obtenidos por los sensores mediante simulaciones dinámicas no lineales, utilizando herramientas como ETABS, OpenSees o SAP2000, para establecer correlaciones robustas entre los datos de campo y el modelo estructural teórico.

Líneas futuras de investigación

Se exhorta a desarrollar modelos normativos adaptativos, que integren factores de corrección empíricos como los determinados en esta investigación (valores promedio entre 1.13 y 1.36), de modo que el análisis sísmico se ajuste a condiciones reales.

Se sugiere investigar la aplicación de algoritmos de inteligencia artificial (IA) y aprendizaje automático para el análisis predictivo de fallas estructurales, empleando bases de datos obtenidas en campo. Esto permitiría generar alertas anticipadas en función del comportamiento histórico de cada edificación.

Finalmente, se propone realizar estudios comparativos entre edificaciones con y sin sistemas de monitoreo, utilizando indicadores como reducción del tiempo de respuesta post-sismo, disminución de costos de intervención, y porcentaje de desviación estructural respecto al modelo teórico, para demostrar cuantitativamente el impacto de estas tecnologías en la resiliencia sísmica urbana.

REFERENCIAS

Adrés, J., & Duque, M. (2007). *Sistemas de control derespuesta sísmica en edificaciones.* Revista EIA. Retrieved from http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1794-12372006000200010

Aguilar, R., & Cagua, B. (2022, junio). Sistema Computacional "CEINCI LAB" como una herramienta para la enseñanza de Ingeniería Sísmica-Estructural. *DYNA, 89*(222), 74-82. doi:10.15446/dyna.v89n222.101814.

Ahmadvand, M., Maleki, A., & Pourbaba, M. (2025). Non-linear analysis of masonry infilled steel frame under in-plane loading using Multi Pier method. *Case Studies in Construction Materials, 22*. doi:10.1016/j.cscm.2024.e04044

Bacuilima, M., & Barbecho, J. (2022). Sistemas de Monitoreo de Salud Estructural de Estructuras Civiles: una revisión bibliográfica. *Journal Scientific MQRInvestigar, 6*(3), 1641-1667. doi:10.56048/MQR20225.6.3.2022.1641-1667

Barrera, J. (2022). Nuevo método para la estimación de los parámetros de los sistemas dinámicos de segundo orden sobreamortiguados. *Congreso Bienal del IEEE de Argentina (ARGENCON)*. doi:10.1109/ARGENCON55245.2022.9940065

Benito, B. (2013). *Geología, terremotos y riesgo sísmico: Avances y perspectivas.* Universidad Autónoma de Madrid. Fundación General.

Bowles, J. (1997). *Foundation Analysis and Design.* McGraw-Hill Companies.

Cajan, N., & Falla, X. (2020). *Vulnerabilidad sísmica aplicando el método De benedetti - petrini de las edificaciones Categoría c descritas en la norma e.030 de Nueve sectores de la ciudad de reque,Provincia de chiclayo, departamento de Lambayeque.* USMP.

Carrión, F., Quintana, A., & López, A. (2023, Mayo 15). Diseño y estrategia para un centro de monitoreo de puentes y estructuras inteligentes de México. México: Instituto Mexicano del Transporte.

Celigüeta, J. (2022, Julio 6). Análisis sísmico de estructuras. España: Publicaciones Universidad de Navarra.

Cisneros, E., Gil, J., & Pérez, S. (2023). Salud estructural de edificios utilizando tecnología BIM:Revisión literaria. *Ingenieria y Competitividad, 25*(1). doi:10.25100/iyc.v25i1.11765

Cobo, A., Martínez, D., Gonzáles, M., Medina, E., & Bastidas, J. (2011). Ductilidad del acero inoxidable bajo en níquel para estructuras de hormigón armado. *Materiales de Construcción, 61*(304), 613-620. doi:10.3989/mc.2011.57210.

Collantes, G. (2022). Diseño sísmico para el desempeño de elementos no estructurales utilizando la metodología de desplazamiento directo en edificaciones de concreto reforzado. *Revista Ingenieria de Construcción, 37*(2). doi:10.774/ric.00027.21

Das, B. (2012). *Fundamentos de Ingniería de cimentaciones* (Séptima ed.). CENGAGE Learning.

De Resende, L., Gonzaga, L., Pellegrini, M., Marchezini, V., & Soriano, E. (2018). Vulnerability, health and disasters in São Paulo coast (Brazil): challenges for a sustainable development. *Ambiente & Sociedade, 21*. doi:10.1590/1809-4422asoc0102r2vu18l1ao

Gallardo, N. (2023). Análisis estático y dinámico no lineal en el desempeño sismorresistente de un colegio diseñado bajo la norma E.030 en Ferreñafe. Lamabayeque, Perú: Universidad Católica Santo Toribio de Mogrovejo.

Garita, C. (2016). Enfoques de integración de información para sistemas de monitoreo de salud estructural de puentes. *Revista Tecnología en Marcha*. doi:10.18845/tm.v29i1.2542

Gaudio, C., Rosti, A., Penna, A., Ricci, P., Rota, M., & Verderame, G. (2023). Empirically based approaches for the derivation of fragility curves of Italian RC building typologies. *Procedia Structural Integrity, 44*, 259-266. doi:10.1016/j.prostr.2023.01.034

Jones, D., & Ashby, M. (2018, Noviembre). *Engineering Materials.*

Li, S., & Gardoni, P. (2024, Diciembre). Optimized seismic hazard and structural vulnerability model considering macroseismic intensity measures. *Reliability Engineering & System Safety, 252*(110460). doi:10.1016/j.ress.2024.110460

López, N., Maldonado, J., & Almache, L. (2021, Diciembre). Monitoreo de la salud estructural del edificio “La Estancia” de la Universidad Católica de Cuenca. *Ciencias Técnicas y Aplicadas, 7*(6), 1446-1463. doi:10.23857/dc.v7i6.2403

López, N., Maldonado, J., & Almache, L. (2021, Octubre-Diciembre). Monitoreo de la salud estructural del edificio “La Estancia” de la Universidad Católica de Cuenca". *Revista Cientifica Dominio de las Ciencias, 7*(6), 1446-1463. doi:10.23857/dc.v7i6.2403

López, O., Coronel, G., & Rojas, R. (2014). *Índices De Priorización Para La Gestión Del Riesgo Sísmico En Edificaciones Existente.* Revista de la Facultad de Ingeniería U.C.V. Retrieved from chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://ve.scielo.org/pdf/rfiucv/v29n4/art10.pdf

López, S., & Ayala, A. (2013). Método de Diseño Sísmico Basado en Desplazamientos para Marcos de Concreto Reforzados. *Revista de Ingenieria Sísmica*(88), 91-111. doi:10.18867/ris.88.11

López, X. (2021). Modelado no lineal de un edificio de tres niveles a base de muros de mampostería. México: Universidad Nacional Autónoma de México.

Macioski, G., De Souza, D., Capraro, A., & De Medeiros, M. (2016, Diciembre). Análisis de la corrosión de barras de acero en función de la variación del pH del medio. *Revista Alconpat, 6*(3). doi:10.21041/rav6i3.153

Martínes, F. (2023). Corrosión. Tipos. Prevención. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias, 32*(2).

Martínes, F. (2023). Corrosión. Tipos.Prevención. *Revista Ciencias Técnologicas Agropecuarias, 32*(2). Retrieved from https://revistas.unah.edu.cu/index.php/rcta/article/view/1724

Ministerio de Transportes y Comunicaciones. (2016). *Manual de Ensayos de Materiales.* mayo.

Morales, C., Bernal, I., Tavera, H., Arredondo, L., & Oyola, J. (2017). Espectros de respuesta elástica de pseudoaceleración a partir del análisis dinámico lineal equivalente del suelo en Chimbote-Perú. *Boletín de Geología, 39*(2). doi:10.18273/revbol.v39n2-2017002

Mosquera Rey, E. R., & Pérez Valcárcel, J. B. (s.f.). La verificación de la seguridad estructural en la edificación mediante metodologías probabilistas explícitas. Considerando el carácter espacial y temporal de las acciones.

Muñoz, A. (2020). Servicio Nacional de Capacitación para la Industria de la Construcción. Retrieved from chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/1129512/COMENTARIOS_A_LA_NORMA_PERUANA_E.030_DISE%C3%91O_SISMORRESISTENTE.pdf

Paredes, P., & Romero, J. (2021). Analisis Dinámico No Lineal de un Edificio Aporticado de Hormigón Armado con Mampostería durante el Terremoto de Muisne,Ecuador del 2016. *Revista Investigación y Desarrollo, 15*, 45-57. doi:10.31243/id.v15.2022.1592

Peng, Y., Ma, Y., Huang, T., & De Domenico, D. (2021). Reliability-based design optimization of adaptive sliding base isolation system for improving seismic performance of structures. *Reliability Engineering & System Safety, 205*(107167). doi:10.1016/j.ress.2020.107167

Pérez, J., Aguirre, J., & Ramirez, L. (2018). Sismicidad y seguridad estructural en las construcciones: lecciones aprendidas en México. *Salud Pública de México, 60*. doi:10.21149/9300

Pirsaheb, H., Javad, M., & Milani, G. (2020). A Multi-Pier MP method for the non-linear static analysis of out-of-plane loaded masonry walls. *Engineering Structures, 223*(111040). doi:10.1016/j.engstruct.2020.111040

Quispe, R., Diaz, M., Jaramillo, J., & Inocente, I. (2022). Evaluación del monitoreo de la salud estructural en el hospital Edgardo Rebagliati Martins con un número limitado de acelerómetros en la ciudad de Lima. *TECNIA, 32*(2). doi:10.21754/tecnia.v32i2.1422

Quispe, S., & Hanampa, J. (2023). *Análisis de costo-beneficio para implementar un Sistema de Monitoreo de la Salud Estructural en el Puente Maranura en la provincia de la Convención-Cusco.* Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas (UPC). Retrieved from https://repositorioacademico.upc.edu.pe/bitstream/handle/10757/670005/Quispe_CS.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Ramírez, F., Vásquez, M., & Abanto, S. (2022). Vulnerabilidad sísmica y reforzamiento estructural de instituciones educativas públicas de una provincia peruana con riesgo sísmico. *20th LACCEI International Multi-*

Conference for Engineering, Education, and Technology. doi:10.18687/LACCEI2022.1.1.493

Razo, D., & Domínguez, O. (2020). Evaluación Integral de la Seguridad Estructural de Edificaciones Existentes Dañadas por Sismos de Gran Magnitud. *Ingenieria Sísmica*(104), 51-71. doi:10.18867/ris.104.565.

Rivera, M. (2024). *Evaluación probabilística del peligro sísmico de la región Amazonas, Perú.* Tesis, Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza de Amazonas, Chachapoyas.

Ruiz, D., Borrero, M., Leon, M., & Vacca, H. (2013). Estimación de la incertidumbre aleatoria de la razón de deriva sísmica de entrepiso de pórticos de concreto reforzado teniendo en cuenta la variabilidad del módulo de elasticidad del concreto en Bogotá. *Revista ingenieria de construccion, 28*(1), 95-106. doi:10.4067/S0718-50732013000100006

Salazar, G. (2018). Terremotos y salud: lecciones y recomendaciones. *Salud Pública de México, 60*(1). doi:10.21149/9445

Salazar, J. (2016, Abril). Introducción al fenómeno de corrosión: tipos, factores que influyen y control para la protección de materiales. *Scielo.sa, 28*(3), 127-136.

Salgado, M., Carreño, M., Barbat, A., & Cardona, O. (2016). Evaluación probabilista del riesgo sísmico en Lorca mediante simulaciones de escenarios. *Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería, 32*(2), 70-78. doi:10.1016/j.rimni.2014.12.001

Sarhosis, V., & Lemos, J. (2018, Agosto). A detailed micro-modelling approach for the structural analysis of masonry assemblages. *Computers & Structures, 206*, 66-81. doi:10.1016/j.compstruc.2018.06.003

Seif, H., & Galal, K. (2018, Febrero). Effect of reinforcement anchorage end detail and spacing on seismic performance of masonry shear walls. *Engineering Structures, 157*, 268-279. doi:10.1016/j.engstruct.2017.11.073

Servicio Geológico Mexicano. (2017, Octubre 2). Sismos: Causas, características e impactos. México.

Sifuentes, A., Suárez, M., & Estacio, L. (2022). Monitoreo de la salud estructural de muros de hormigón armado de un edificio residencial en Lima, Perú, utilizando un sensor Raspberry Shake 4D. *Tecnia, 32*(2). doi:10.21754/tecnia.v32i2.1412

Suárez, X., Mazorra, M., & Marrero, R. (2023, Abril). Factores incidentes en el deterioro por corrosión del acero laminado en frío DC01 importado. *Tecnología Química, 43*.

Terán, A. (2010). *El futuro del diseño sismorresistente de las edificaciones de concreto reforzado: Una visión basada en la sustentabilidad.* Concreto y Cemento.Investigación y Desarrollo.

Toirac, J. (2004). Patología de la construcción, grietas y fisuras en obras de hormigón, origen y prevención. *Ciencia y Sociedad, 29*(1), 72-114. Retrieved from http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=87029104

Universidad de Cantabria, & Universidad de Burgos. (2016). Latin American Congress on "Construction Pathology, Rehabilitation Technology and Heritage Management", REHABEND 2014. University of Cantabria.

Vega, P., Robert, J., Demoraes, F., Moreno, C., & Gouëset, V. (2022). Estructura urbana y movilidad como factores de vulnerabilidad. Lima y Bogotá en tiempos de cuarentena. *Revista Bitácora Urbano Territorial, 32*(2), 47-62. doi:10.15446/bitacora.v32n2.99425

Zhang, Y., Hu, Y., Zhou, Z., Li, N., Zhang, D., & Ma, Y. (2024, Enero). On the displacement control performance of base-isolated structures incorporating

nonlinear negative stiffness device. *Structures, 64*(106558). doi:10.1016/j.istruc.2024.106558

APÉNDICE

- Matriz de consistencia del informe final de tesis.

INCORPORACIÓN DE SISTEMAS DE MONITOREO DE SALUD ESTRUCTURAL A BAJO COSTO COMO PROPUESTA NORMATIVA EN EDIFICACIONES, DISTRITO DE MOQUEGUA, 2025						
PROBLEMA GENERAL	**OBJETIVO GENERAL**	**HIPÓTESIS GENERAL**	**VARIABLE DEPENDIENTE**	**DIMENSIONES**	**INDICADORES**	**METODOLOGÍA**
¿Cómo incorporar sistemas de monitoreo de salud estructural a bajo costo como propuesta normativa en edificaciones del distrito de Moquegua, 2025?	Incorporar sistemas de monitoreo de salud estructural a bajo costo como propuesta normativa en edificaciones, distrito de Moquegua, 2025.	Se plantea que incorporar sistemas de monitoreo de la salud estructural de bajo costo como propuesta normativa en edificaciones del distrito de Moquegua es viable, porque mejora la evaluación sísmica, reduce incertidumbre en el desempeño y orienta decisiones de reforzamiento.	Propuesta normativa en edificaciones	Resultados del Desempeño Sísmico asociado a parámetros	Cortante Basal	**TIPO**: BÁSICA / CUANTITATIVA **NIVEL DE INVESTIGACIÓN**: CORRELACIONAL **DISEÑO DE INVESTIGACIÓN**: No Experimental - Transversal **POBLACIÓN:** Bloques estructurales del proyecto de la Municipalidad Distrital de San Antonio (Bloques A, B, C y D). **MUESTRA:** Bloque B, seleccionado por muestreo no probabilístico por conveniencia, por su accesibilidad y representatividad estructural. **TÉCNICA** : documental, fotografía y fotogrametría, SAP 2000, observación directa e indirecta **INSTRUMENTO:** Sensores de salud estructural, registros de mantenimiento y observación, software de monitoreo, guía de observación y fichas de resultados.
					Deformación	
					Desplazamiento	
				Evaluación del Análisis Sísmico Estático y Modal Dinámica	Sistema de Edificaciones	
					Modos de Vibración	
					Periodos Fundamentales	
					Rigidez Estructural	
PROBLEMAS ESPECÍFICOS	**OBJETIVOS ESPECÍFICOS**	**HIPÓTESIS ESPECIFICA**	**VARIABLE INDEPENDIENTE**	**DIMENSIONES**	**INDICADORES**	
¿Cómo evaluar la precisión y confiabilidad de sistemas de monitoreo de la salud estructural de bajo costo en la medición de espectros de aceleración bajo diferentes frecuencias y desplazamientos en edificaciones del distrito de Moquegua?	Evaluar la precisión y confiabilidad de sistemas de monitoreo de la salud estructural de bajo costo en la medición de espectros de aceleración bajo diferentes frecuencias y desplazamientos en edificaciones del distrito de Moquegua.	Se hipotetiza que los sistemas de monitoreo de la salud estructural de bajo costo permiten medir espectros de aceleración con errores RMS menores al 5 % y coeficientes de determinación R^2 superiores a 0.90, bajo distintas frecuencias y desplazamientos en edificaciones de Moquegua.	Sistemas de monitoreo de la salud estructural de bajo costo	Desempeño técnico del sistema de monitoreo	Precisión en la medición de aceleración	
					Confiabilidad bajo distintas frecuencias	
					Margen de error RMS	
					R^2 de los ajustes dinámicos	
¿Cómo identificar las características técnicas de los sistemas de monitoreo de la salud estructural de bajo costo viables para su incorporación normativa en edificaciones del distrito de Moquegua?	Identificar las características técnicas de los sistemas de monitoreo de la salud estructural de bajo costo viables para su incorporación normativa en edificaciones del distrito de Moquegua.	Se plantea que los sistemas de monitoreo de la salud estructural de bajo costo cuentan con características técnicas compatibles con su incorporación normativa, al operar con frecuencias de muestreo cercanas a 100 Hz, consumos inferiores a 5 W y montaje no invasivo en edificaciones del distrito de Moquegua.		Caracteristicas de los Materiales	Ensayo de la Resistencia a la Compresión	
					Ensayo de la Resistencia a la Tracción	
					Refuerzo Corrugado	
					Estudio de Mecánica de Suelos	
¿Cómo determinar el factor de corrección derivado del análisis dinámico a partir de los desplazamientos reales registrados por sistemas de monitoreo de la salud estructural de bajo costo en edificaciones del distrito de Moquegua?	Determinar el factor de corrección derivado del análisis dinámico a partir de los desplazamientos reales registrados por sistemas de monitoreo de la salud estructural de bajo costo en edificaciones del distrito de Moquegua.	Se sostiene que el análisis dinámico basado en los desplazamientos reales registrados por sistemas de monitoreo de bajo costo permite obtener un factor de corrección estructural confiable, con valores promedio cercanos a 1.13 y rangos entre 1.10 y 1.36 en las edificaciones estudiadas.		Diseño Estructural	Peligro Sismico	
					Analisis Sismorresistente	
¿Cómo proponer criterios de reforzamiento estructural en edificaciones del distrito de Moquegua, basados en los resultados del análisis sísmico obtenido mediante sistemas de monitoreo de la salud estructural de bajo costo?	Proponer criterios de reforzamiento estructural en edificaciones del distrito de Moquegua, basados en los resultados del análisis sísmico obtenido mediante sistemas de monitoreo de la salud estructural de bajo costo.	Se propone que los resultados obtenidos mediante sistemas de monitoreo de la salud estructural de bajo costo permiten establecer criterios aplicables de reforzamiento estructural, priorizando intervención en zonas donde los desplazamientos reales superan en más de 10 % los límites normativos de derivas en edificaciones del distrito de Moquegua.			Aceleración del Terreno	

- Instrumentos utilizados.

Sensores de Salud Estructural

Nombre del Instrumento

Sensor triaxial de aceleración, inclinación y desplazamiento.

Descripción

Dispositivo electrónico capaz de registrar aceleraciones, desplazamientos e inclinaciones en los tres ejes ortogonales (X, Y, Z). Permite analizar la respuesta dinámica de una estructura frente a cargas vibratorias naturales o inducidas. Funciona mediante la detección de variaciones de posición y velocidad en el tiempo, convirtiéndolas en señales eléctricas procesables.

Función dentro de la Investigación

Los sensores fueron instalados en zonas críticas de los bloques B, C y D del proyecto de la Municipalidad Distrital de San Antonio, Moquegua. Su finalidad fue registrar en tiempo real los parámetros dinámicos de la edificación, tales como: aceleración máxima, desplazamiento pico y variaciones de inclinación, tanto bajo condiciones normales como ante estímulos inducidos (simulaciones o vibración ambiental).

Frecuencia de Muestreo

≥ 100 Hz, con capacidad de almacenamiento interno y transmisión inalámbrica de datos.

Justificación

Su uso permitió generar un diagnóstico detallado del estado dinámico de las estructuras monitoreadas, proporcionando datos técnicos necesarios para la

validación de los objetivos específicos y la formulación de una propuesta normativa.

Registros Técnicos de Observación

Nombre del Instrumento

Bitácora técnica de campo (formato físico y digital)

Descripción

Herramienta de registro sistemático empleada durante las visitas técnicas a las edificaciones. Consiste en un cuaderno físico y un formato digital complementario en el que se consignan observaciones estructurales relevantes, condiciones del entorno, ubicación y estado de los sensores instalados, así como incidencias durante el monitoreo.

Función dentro de la Investigación

Permitió documentar el proceso de instalación de sensores en los bloques B, C y D, registrar el estado estructural visible (fisuras, deformaciones, asentamientos), y llevar un control del funcionamiento y calibración periódica de los sensores. También sirvió para anotar cambios ambientales, actividades simultáneas en la obra y observaciones complementarias del comportamiento estructural durante la recolección de datos.

Frecuencia de Uso Estimada

Durante cada jornada de monitoreo o intervención técnica, con actualizaciones inmediatas en campo.

Justificación

Garantiza la trazabilidad de los datos obtenidos y respalda la interpretación técnica de los resultados, reforzando la validez del estudio mediante la verificación de condiciones reales y el estado funcional del sistema de monitoreo.

Software de Monitoreo Estructural

Nombre del Instrumento

Plataforma de análisis y visualización de datos estructurales

Descripción

Herramienta digital que permite la recepción, almacenamiento, procesamiento y visualización gráfica de los datos registrados por los sensores instalados. Incluye módulos para el análisis en tiempo real de aceleraciones, desplazamientos e inclinaciones, y permite la generación automática de alertas ante la detección de valores fuera de rangos preestablecidos.

Función dentro de la Investigación

El software fue utilizado para procesar los datos recolectados en los bloques B, C y D del distrito de San Antonio, Moquegua. Permitió observar la evolución temporal de los parámetros dinámicos, identificar comportamientos estructurales irregulares y contrastar los valores registrados con los límites establecidos en las normativas vigentes.

Frecuencia de Uso Estimada

Diaria o continua durante los periodos de monitoreo, con capacidad de procesamiento en tiempo real y exportación de resultados para análisis posterior.

Justificación

Su integración fue esencial para interpretar los datos obtenidos por los sensores, facilitando la evaluación técnica del estado estructural y proporcionando una base objetiva para sustentar la propuesta normativa planteada en esta investigación.

- Matriz de datos.

La matriz de datos contiene los registros procesados obtenidos mediante los sensores instalados en los bloques B, C y D de la edificación monitoreada. A continuación, se presenta un ejemplo estructurado de los principales parámetros analizados para la validación de los objetivos específicos de la investigación:

Bloque	Sensor	Frecuencia Natural (Hz)	Desplazamiento Pico (cm)	Aceleración Pico (m/s²)	Deformación (%)	Modo de Vibración	Rigidez Estimada (kg/cm)
B	A01	2.15	0.42	0.98	0.65	1er Modo	520
B	A02	2.1	0.45	1.03	0.7	1er Modo	500
C	C01	2.3	0.39	0.95	0.6	1er Modo	540
C	C02	2.25	0.4	1	0.62	1er Modo	530
D	D01	2.05	0.5	1.1	0.72	1er Modo	490
D	D02	2	0.53	1.15	0.75	1er Modo	470

Fuente: Elaboración propia

Observaciones

Los datos fueron recolectados durante un periodo de 2 semanas.

Los bloques presentan rigideces similares, aunque el Bloque D mostró mayores desplazamientos.

Todos los bloques mantuvieron un comportamiento estructural estable durante el monitoreo, sin superar umbrales críticos normativos.

- Procesamiento de datos para frecuencia de muestreo de 200 Hz

created_at	entry_id	cm/s2 aceleración field1	cm/s velocidad field2	tiempo hrs field3	cm desplazamiento field4	cm desplazamiento etbas	dif1	dif2	
					y_i	$\hat{y}_i$	$(y_i-\hat{y}_i)^2$	$(y_i-\bar{y})^2$	
2025-06-04t04:02:51	1	-0.1742171	-0.01939	0	-0.128571429	-0.147144981	0.000344977	0.017158693	
2025-06-04t04:02:51.005	2	-0.1871611	-0.0232	0.005	-0.129047619	-0.143226641	0.000201045	0.017283673	
2025-06-04t04:02:51.01	3	-0.1429195	-0.02633	0.01	-0.129047619	-0.174429629	0.002059527	0.017283673	
2025-06-04t04:02:51.015	4	-0.0572938	-0.02841	0.015	-0.12952381	-0.154775884	0.000637667	0.017409107	
2025-06-04t04:02:51.02	5	0.04197931	-0.02852	0.02	-0.13	-0.137107978	5.05234E-05	0.017534994	
2025-06-04t04:02:51.025	6	0.12759103	-0.02696	0.025	-0.13	-0.15413479	0.000582488	0.017534994	
2025-06-04t04:02:51.03	7	0.18050191	-0.02395	0.03	-0.13047619	-0.156243026	0.00066393	0.017661335	
2025-06-04t04:02:51.035	8	0.19433126	-0.0204	0.035	-0.130952381	-0.143553549	0.000158789	0.017788129	
2025-06-04t04:02:51.04	9	0.17564271	-0.01684	0.04	-0.130952381	-0.140515743	9.14579E-05	0.017788129	
2025-06-04t04:02:51.045	10	0.13848563	-0.0139	0.045	-0.131428571	-0.14404426	0.000159156	0.017915377	
2025-06-04								0.017915377	
2025-06-04								0.017915377	
2025-06-04								0.018043078	
2025-06-04								0.018043078	
2025-06-04								0.018043078	
2025-06-04								0.018171233	
2025-06-04								0.018171233	
2025-06-04								0.018171233	
2025-06-04								0.018171233	
2025-06-04								0.018299842	
2025-06-04								0.018299842	
2025-06-04								0.018299842	
2025-06-04								0.018299842	
2025-06-04								0.018428904	
2025-06-04								0.018428904	
2025-06-04								0.018428904	
2025-06-04t04:02:51.13	27	0.03737268	-0.0036	0.13	-0.133333333	-0.18146755	0.002316903	0.018428904	
2025-06-04t04:02:51.135	28	0.03658756	-0.00294	0.135	-0.133333333	-0.143180198	9.69607E-05	0.018428904	
2025-06-04t04:02:51.14	29	0.03590363	-0.00228	0.14	-0.133333333	-0.183167181	0.002483412	0.018428904	
2025-06-04t04:02:51.145	30	0.03544234	-0.00165	0.145	-0.133333333	-0.161810431	0.000810945	0.018428904	
...	...	...	...	...	...	...	...	...	
2025-06-04t04:04:130.98	15997	0.0193018	-0.00429	79.98	-0.082857143	-0.112090095	0.000854566	0.007272151	
2025-06-04t04:04:130.985	15998	0.01185852	-0.00403	79.985	-0.082857143	-0.08325137	1.55415E-07	0.007272151	
2025-06-04t04:04:130.99	15999	0.00752509	-0.00387	79.99	-0.083333333	-0.104348371	0.000441632	0.007353594	

Tabla 1

Resultados del Monitoreo Dinámico en los Bloques B, C y D

Bloque	Sensor	Frecuencia Natural (Hz)	Desplazamiento Pico (cm)	Aceleración Pico (m/s²)	Error RMS (%)	R² Ajuste Dinámico
B	A01	2.15	0.42	0.98	4.5	0.92
B	A02	2.1	0.45	1.03	4.2	0.94
C	C01	2.3	0.39	0.95	4.7	0.91
C	C02	2.25	0.4	1	4.3	0.93
D	D01	2.05	0.5	1.1	4.9	0.9
D	D02	2	0.53	1.15	4.8	0.91

aceleracion pico	0.98
desplazamiento pico	0.42
promedio	0.00241976
$\sum_{i=1}^{n}(y_i-\hat{y}_i)^2$	19.5925052
$\sum_{i=1}^{n}(y_i-\bar{y})^2$	370.252966
r2	0.94708346

Coeficiente de Determinación

(R cuadrado)

$$R^2 = 1 - \frac{\sigma_r^2}{\sigma^2} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}(y_i-\hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^{n}(y_i-\bar{y})^2}$$

- Procesamiento de datos para frecuencia de muestreo de 100 Hz

created_at	entry_id	cm/s2 aceleración field1	cm/s velocidad field2	tiempo hrs field3	cm desplazamiento field4	cm desplazamiento etbas $\hat{y}_i$	dif1 $(y_i - \hat{y}_i)^2$	dif2 $(y_i - \bar{y})^2$
2025-06-04t04:02:51.005	2	-0.1871611	-0.0232	0.005	-0.129047619	-0.143226641	0.000201045	0.017285849
2025-06-04t04:02:51.015	4	-0.0572938	-0.02841	0.015	-0.12952381	-0.154775884	0.000637667	0.01741129
2025-06-04t04:02:51.025	6	0.12759103	-0.02696	0.025	-0.13	-0.15413479	0.000582488	0.017537186
2025-06-04t04:02:51.035	8	0.19433126	-0.0204	0.035	-0.130952381	-0.143553549	0.000158789	0.017790336
2025-06-04t04:02:51.045	10	0.13848563	-0.0139	0.045	-0.131428571	-0.14404426	0.000159156	0.017917592
2025-06-04t04:02:51.055	12	0.06296167	-0.01021	0.055	-0.131428571	-0.17606224	0.001992164	0.017917592
2025-06-04t04:02:51.065	14	0.01884817	-0.00881	0.065	-0.131904762	-0.132647547	5.5173E-07	0.018045301
2025-06-04t04:02:51.075	16	-0.0122439	-0.00878	0.075	-0.132380952	-0.133908624	2.33378E-06	0.018173464
2025-06-04t04:02:51.085	18	-0.0177214	-0.00957	0.085	-0.132380952	-0.156271446	0.000570756	0.018173464
2025-06-04t04:02:51.095	20	0.022175	-0.00965	0.095	-0.132857143	-0.134461977	2.57549E-06	0.01830208
2025-06-04t04:02:51.105	22	0.05745293	-0.00809	0.105	-0.132857143	-0.183767691	0.002591884	0.01830208
2025-06-04t04:02:51.115	24	0.05267774	-0.00597	0.115	-0.133333333	-0.178819893	0.002069027	0.01843115
2025-06-04t04:02:51.125	26	0.03977498	-0.00431	0.125	-0.133333333	-0.176124426	0.001831078	0.01843115
2025-06-04t04:02:51.135	28	0.03658756	-0.00294	0.135	-0.133333333	-0.143180198	9.69607E-05	0.01843115
2025-06-04t04:02:51.145	30	0.03544234	-0.00165	0.145	-0.133333333	-0.161810431	0.000810945	0.01843115
2025-06-04t04:02:51.155	32	0.03736039	-0.00034	0.155	-0.133333333	-0.16187498	0.000814626	0.01843115
2025-06-04t04:02:51.165	34	0.03492013	0.000992	0.165	-0.133809524	-0.146267448	0.0001552	0.018560674
2025-06-04t04:02:51.175	36	0.03862518	0.002252	0.175	-0.133809524	-0.184536342	0.00257321	0.018560674
2025-06-04t04:02:51.185	38	0.07092626	0.004185	0.185	-0.133333333	-0.152850176	0.000380907	0.01843115
2025-06-04t04:02:51.195	40	0.10138527	0.007495	0.195	-0.133333333	-0.13688913	1.26437E-05	0.01843115
2025-06-04t04:02:51.205	42	0.09609287	0.011277	0.205	-0.133333333	-0.173148149	0.00158522	0.01843115
2025-06-04t04:02:51.215	44	0.07900165	0.014539	0.215	-0.132857143	-0.14412566	0.000126979	0.01830208
2025-06-04t04:02:51.225	46	0.05595484	0.017105	0.225	-0.132857143	-0.182807264	0.002495015	0.01830208
2025-06-04t04:02:51.235	48	0.00154648	0.018221	0.235	-0.132380952	-0.13822668	3.41725E-05	0.018173464
2025-06-04t04:02:51.245	50	-0.0481918	0.01713	0.245	-0.131904762	-0.151439565	0.000381609	0.018045301
2025-06-04t04:02:51.255	52	-0.0252096	0.015376	0.255	-0.131428571	-0.171112085	0.001574781	0.017917592
..	..	..	..	..	..	..	..	..
2025-06-04t04:04:130.965	15994	0.05083908	-0.00619	79.965	-0.082857143	-0.094011891	0.000124428	0.007273562
2025-06-04t04:04:130.975	15996	0.0290609	-0.00472	79.975	-0.082857143	-0.0860873	1.04339E-05	0.007273562
2025-06-04t04:04:130.985	15998	0.01185852	-0.00403	79.985	-0.082857143	-0.08325137	1.55415E-07	0.007273562

aceleracion pico	0.97
desplazamiento pico	0.42
promedio	0.00242804
$\sum_{i=1}^{n}(y_i - \hat{y}_i)^2$	9.96402795
$\sum_{i=1}^{n}(y_i - \bar{y})^2$	185.121903
r2	0.94617586

Coeficiente de Determinación

(R cuadrado)

$$R^2 = 1 - \frac{\sigma_r^2}{\sigma^2} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}(y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^{n}(y_i - \bar{y})^2}$$

- Procesamiento de datos para frecuencia de muestreo de 50 Hz

created_at	entry_id	cm/s2 aceleración field1	cm/s velocidad field2	tiempo hrs field3	cm desplazamiento field4	cm desplazamiento etbas y_i	$\hat{y}_i$	$(y_i - \hat{y}_i)^2$ dif1	$(y_i - \bar{y})^2$ dif2
2025-06-04t04:02:51	1	-0.1742171	-0.01939	0	-0.128571429	-0.147144981		0.000344977	0.017157897
2025-06-04t04:02:51.015	4	-0.0572938	-0.02841	0.015	-0.12952381	-0.154775884		0.000637667	0.017408305
2025-06-04t04:02:51.03	7	0.18050191	-0.02395	0.03	-0.13047619	-0.156243026		0.00066393	0.017660527
2025-06-04t04:02:51.045	10	0.13848563	-0.0139	0.045	-0.131428571	-0.14404426		0.000159156	0.017914564
2025-06-04t04:02:51.06	13	0.0375845	-0.00928	0.06	-0.131904762	-0.180191248		0.002331585	0.018042262
2025-06-04t04:02:51.075	16	-0.0122439	-0.00878	0.075	-0.132380952	-0.133908624		2.33378E-06	0.018170414
2025-06-04t04:02:51.09	19	-0.0016113	-0.00979	0.09	-0.132380952	-0.153485399		0.000445398	0.018170414
2025-06-04t04:02:51.105	22	0.05745293	-0.00809	0.105	-0.132857143	-0.183767691		0.002591884	0.01829902
2025-06-04t04:02:51.12	25	0.04519692	-0.00506	0.12	-0.133333333	-0.185047244		0.002674329	0.018428079
2025-06-04t04:02:51.135	28	0.03658756	-0.00294	0.135	-0.133333333	-0.143180198		9.69607E-05	0.018428079
2025-06-04t04:02:51.15	31	0.03608705	-0.00099	0.15	-0.133333333	-0.150930719		0.000309668	0.018428079
2025-06-04t04:02:51.165	34	0.03492013	0.000992	0.165	-0.133809524	-0.146267448		0.0001552	0.018557591
2025-06-04t04:02:51.18	37	0.05145743	0.003069	0.18	-0.133809524	-0.182918868		0.002411728	0.018557591
2025-06-04t04:02:51.195	40	0.10138527	0.007495	0.195	-0.133333333	-0.13688913		1.26437E-05	0.018428079
2025-06-04t04:02:51.21	43	0.08739682	0.012997	0.21	-0.133333333	-0.145200145		0.000140821	0.018428079
2025-06-04t04:02:51.225	46	0.05595484	0.017105	0.225	-0.132857143	-0.182807264		0.002495015	0.01829902
2025-06-04t04:02:51.24	49	-0.0285609	0.017927	0.24	-0.132380952	-0.151557047		0.000367723	0.018170414
2025-06-04t04:02:51.255	52	-0.0252096	0.015376	0.255	-0.131428571	-0.171112085		0.001574781	0.017914564
2025-06-04t04:02:51.27	55	0.08590398	0.017245	0.27	-0.130952381	-0.177275933		0.002145871	0.017787319
2025-06-04t04:02:51.285	58	0.03253648	0.021369	0.285	-0.13047619	-0.131866074		1.93178E-06	0.017660527
2025-06-04t04:02:51.3	61	-0.026272	0.02083	0.3	-0.12952381	-0.175666782		0.002129174	0.017408305
2025-06-04t04:02:51.315	64	-0.0390893	0.01921	0.315	-0.129047619	-0.143963892		0.000222495	0.017282874
2025-06-04t04:02:51.33	67	-0.0682919	0.015438	0.33	-0.128571429	-0.167475176		0.001513502	0.017157897
2025-06-04t04:02:51.345	70	0.06825407	0.014994	0.345	-0.128095238	-0.142269086		0.000200898	0.017033373
2025-06-04t04:02:51.36	73	0.0637241	0.019895	0.36	-0.127142857	-0.144003435		0.000284279	0.016785686
2025-06-04t04:02:51.375	76	-0.0099136	0.020625	0.375	-0.126666667	-0.170282899		0.001902376	0.016662522
2025-06-04t04:02:51.39	79	0.07826232	0.022188	0.39	-0.126190476	-0.149127791		0.00052612	0.016539813
…	…	…	…	…	…	…		…	…
2025-06-04t04:04:130.95	15991	0.07574503	-0.00981	79.95	-0.082380952	-0.084405464		4.09865E-06	0.007190646
2025-06-04t04:04:130.965	15994	0.05083908	-0.00619	79.965	-0.082857143	-0.094011891		0.000124428	0.007271633
2025-06-04t04:04:130.98	15997	0.0193018	-0.00429	79.98	-0.082857143	-0.112090095		0.000854566	0.007271633

aceleracion pico	0.97
desplazamiento pico	0.42
promedio	0.00241673
$\sum_{i=1}^{n}(y_i - \hat{y}_i)^2$	6.62998929
$\sum_{i=1}^{n}(y_i - \bar{y})^2$	123.418139
r2	0.94628027

Coeficiente de Determinación

(R cuadrado)

$$R^2 = 1 - \frac{\sigma_r^2}{\sigma^2} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}(y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^{n}(y_i - \bar{y})^2}$$

- Procesamiento de datos para frecuencia de muestreo de 20 Hz

created_at	entry_id	cm/s2 aceleración field1	cm/s velocidad field2	tiempo hrs field3	cm desplazamiento field4	y_i cm desplazamiento etbas	$\hat{y}_i$ dif1	$(y_i-\hat{y}_i)^2$ dif2	$(y_i-\bar{y})^2$
2025-06-04t04:02:51	1	-0.1742171	-0.01939	0	-0.128571429	-0.147144981	0.000344977	0.017154595	
2025-06-04t04:02:51.05	11	0.09757153	-0.01166	0.05	-0.131428571	-0.138442056	4.9189E-05	0.01791119	
2025-06-04t04:02:51.1	21	0.04463449	-0.00903	0.1	-0.132857143	-0.152871797	0.000400586	0.018295609	
2025-06-04t04:02:51.15	31	0.03608705	-0.00099	0.15	-0.133333333	-0.150930719	0.000309668	0.018424656	
2025-06-04t04:02:51.2	41	0.10237349	0.009422	0.2	-0.133333333	-0.146377002	0.000170137	0.018424656	
2025-06-04t04:02:51.25	51	-0.048122	0.016148	0.25	-0.131904762	-0.175818119	0.001928383	0.018038876	
2025-06-04t04:02:51.3	61	-0.026272	0.02083	0.3	-0.12952381	-0.175666782	0.002129174	0.017404979	
2025-06-04t04:02:51.35	71	0.09649351	0.01658	0.35	-0.127619048	-0.130351679	7.46727E-06	0.016906024	
2025-06-04t04:02:51.4	81	0.08207239	0.025523	0.4	-0.125238095	-0.151137705	0.00067079	0.016292535	
2025-06-04t04:02:51.45	91	0.10488185	0.030076	0.45	-0.122380952	-0.137902802	0.000240928	0.015571315	
2025-06-04t04:02:51.5	101	0.04664964	0.032199	0.5	-0.119047619	-0.138310146	0.000371045	0.014750525	
2025-06-04t04:02:51.55	111	0.04684728	0.039755	0.55	-0.115238095	-0.118773914	1.2502E-05	0.013839691	
2025-06-04t04:02:51.6	121	-0.0043213	0.04484	0.6	-0.11	-0.13343095	0.000549009	0.012634686	
2025-06-04t04:02:51.65	131	0.01583787	0.045752	0.65	-0.105238095	-0.134345368	0.000847233	0.011586847	
2025-06-04t04:02:51.7	141	0.00605478	0.036362	0.7	-0.1	-0.110726271	0.000115053	0.010486604	
2025-06-04t04:02:51.75	151	-0.0049034	0.044564	0.75	-0.095238095	-0.110714761	0.000239527	0.009534002	
2025-06-04t04:02:51.8	161	0.01097584	0.046568	0.8	-0.09	-0.110232017	0.000409335	0.008538522	
2025-06-04t04:02:51.85	171	0.02447921	0.058931	0.85	-0.083809524	-0.096517495	0.000161493	0.007432793	
2025-06-04t04:02:51.9	181	0.08696519	0.071002	0.9	-0.077142857	-0.0972268	0.000403365	0.006327722	
2025-06-04t04:02:51.95	191	0.0938691	0.061722	0.95	-0.06952381	-0.094814005	0.000639594	0.005173627	
2025-06-04t04:02:52	201	-0.0228674	0.057655	1	-0.061904762	-0.080470919	0.000344702	0.004135632	
2025-06-04t04:02:52.05	211	-0.1398031	0.060654	1.05	-0.054761905	-0.075891031	0.00044644	0.003267954	
2025-06-04t04:02:52.1	221	0.08145751	0.063007	1.1	-0.048095238	-0.053828884	3.28747E-05	0.002550185	
2025-06-04t04:02:52.15	231	-0.0870266	0.054592	1.15	-0.040761905	-0.043734053	8.83366E-06	0.001863306	
2025-06-04t04:02:52.2	241	-0.0117021	0.047003	1.2	-0.034952381	-0.046312481	0.000129052	0.001395508	
2025-06-04t04:02:52.25	251	0.12001763	0.056173	1.25	-0.029285714	-0.03064785	1.85541E-06	0.001004246	
…	…	…	…	…	…	…	…	…	
2025-06-04t04:04:130.85	15971	0.1035854	-0.0214	79.85	-0.079047619	-0.093122564	0.000198104	0.006634386	
2025-06-04t04:04:130.9	15981	0.01912217	-0.01244	79.9	-0.080952381	-0.091470953	0.00011064	0.006948306	
2025-06-04t04:04:130.95	15991	0.07574503	-0.00981	79.95	-0.082380952	-0.084405464	4.09865E-06	0.007188509	

aceleracion pico	0.88
desplazamiento pico	0.42
promedio	0.00240412
$\sum_{i=1}^{n}(y_i-\hat{y}_i)^2$	1.9901309
$\sum_{i=1}^{n}(y_i-\bar{y})^2$	37.0271106
r2	0.94625206

Coeficiente de Determinación

(R cuadrado)

$$R^2 = 1 - \frac{\sigma_r^2}{\sigma^2} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}(y_i-\hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^{n}(y_i-\bar{y})^2}$$