

Pasantía de investigación: “Apoyo en la construcción de una viga e implementación de una red neuronal con aprendizaje híbrido para estimar temperaturas en el concreto en el marco del proyecto de investigación VIE-UIS 2823”

Wilfredo Moreno Gamboa

Trabajo de Grado para Optar al Título de Ingeniero Civil

Director

Oscar Javier Begambre Carrillo

Doctorado en Ingeniería Civil- Estructuras

Codirector

José Miguel Benjumea Royero

Ph. D. in Civil and Environmental Engineering

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Físico mecánicas

Escuela de ingeniería civil

Bucaramanga

2024

Dedicatoria

A mi familia, por brindarme apoyo, cariño y buenos consejos durante este trayecto tan importante de mi vida; ellos son el motivo por el cual me esfuerzo cada día. A pesar de los momentos difíciles, siempre han estado ahí cuando más lo he necesitado.

Agradecimientos

En primer lugar, agradezco a Dios por guiarme en cada paso de mi vida, llenándome siempre de sabiduría y bendiciones.

A mis padres y hermana, por apoyarme desde el inicio de mi educación, impulsándome a ser el profesional que soy. Gracias por depositar su confianza en mí. Hoy puedo decir que cada esfuerzo dio fruto finalmente.

Agradezco a la Universidad Industrial de Santander por formarme y guiarme en mi formación de pregrado, aportando en mi ámbito personal, académico y profesional.

Agradezco a mis amigos y compañero por su invaluable colaboración en cada proyecto y desafío.

Tabla de Contenido

	Pág.
Introducción	12
2.Objetivos	13
2.1. Objetivo General.....	13
2.2. Objetivos Específicos.....	13
3. Revisión literaria de redes neuronales con aprendizaje no supervisado e híbrido.....	14
3.1. Metodología empleada para la revisión de literatura.....	14
3.2. Resultados de la revisión de literatura sobre RNA con aprendizaje no supervisado e híbrido.	15
3.2.1. <i>Aprendizaje no supervisado.</i>	16
3.2.2. <i>Aprendizaje híbrido.</i>	16
3.2.3. <i>Arquitectura de las RNA aprendizaje híbrido.</i>	17
3.2.4. <i>Tipos de red neuronal aprendizaje no supervisado o híbrido.</i>	17
3.2.5. <i>Redes con función de Base Radial.</i>	18
3.2.6. <i>Algoritmo de K-means.</i>	19
4. Apoyo en la construcción de un segmento de viga de estudio.	19
4.1. Metodología.....	20
4.2. Resultados.....	21
5. Realización de mediciones de temperatura en un segmento de viga mediante sistema de monitoreo.....	22
5.1. Metodología aplicada.....	23
6. Implementar una red neuronal con aprendizaje híbrido para la predicción de la temperatura interna de un bloque de concreto	25

6.1. Metodología	26
6.2. Alcance de la implementación de la RNA.....	29
6.3. Resultados del desarrollo de la RNA con aprendizaje supervisado.....	30
7. Conclusiones.....	31
Referencias Bibliográficas	33
Apéndices.....	35

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1 <i>Clasificación del nivel de importancia de los 27 artículos.</i>	15
Tabla 2 <i>Clasificación de los artículos por países.</i>	15
Tabla 3 <i>Ejemplos de RNA de Aprendizaje No supervisado</i>	17
Tabla 4 <i>Ejemplo de RNA de Aprendizaje Híbrido.</i>	18
Tabla 5 <i>Resultados de experimentos para predecir la temperatura interna, su número de iteraciones y la confiabilidad.</i>	30

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1 <i>Ubicación de los 40 termopares (TCs) en el segmento de la viga tipo I</i>	20
Figura 2 <i>Estación meteorológica.</i>	23
Figura 3. <i>Posicionamiento del dron DJI MAVIC ENTREPRISE ADVANCED (EU)</i>	24
Figura 4. <i>Posicionamiento Cámara FLIR C5</i>	24
Figura 5. <i>DAQ y Consola Vantage Pro2.</i>	25
Figura 6. <i>Bloque de estudio con inserción de 3 termopares en su cara superior, lateral y frontal</i>	26
Figura 7. <i>Estudio del bloque en concreto en el escenario.</i>	27

Lista de Apéndices

	pág.
Apéndice A. Resumen 27 artículos con sus títulos, autores, enlace, publicación y resumen destacando los aspectos más relevantes de cada uno.....	35
Apéndice B. Resumen informe de ensayo NTC 673 ensayo de comprensión de cilindros de concreto.....	35
Apéndice C. Horario para la toma de datos del segmento de viga tipo I.....	35
Apéndice D. Enlace de la implementación del código de la RNA, de las 3 capas de entradas (temperatura ambiente, radiación y temperatura externa), y la capa de salida (temperaturas internas en los termopares).....	36

Glosario

Red Neuronal: es un modelo de computación cuya estructura de capas se asemeja a la estructura interconectada de las neuronas en el cerebro, con capas de nodos conectados. Una red neuronal puede aprender de los datos, de manera que se puede entrenar para que reconozca patrones, clasifique datos y pronostique eventos futuros.

Aprendizaje Híbrido: Este caso, coexisten en la red los dos tipos básicos de aprendizaje: supervisado y no supervisado, los cuales ocurren en diferentes capas neuronales.

Redes con función de base radial: Se destaca por su capacidad para modelar relaciones complejas en los datos. Su funcionamiento se basa en la utilización de funciones de base radial, que son centros o nodos distribuidos en el espacio de entrada y que responden a patrones específicos en los datos.

Temperatura: es una magnitud escalar que mide la cantidad de energía térmica que tiene un cuerpo.

Puentes: son aquellas construcciones que sirven para conectar diferentes espacios a los que de otra manera no se podría acceder.

Error: Diferencia entre el resultado de la salida de la red neuronal y la salida real.

Resumen

Título: Apoyo en la construcción de una viga e implementación de una red neuronal con aprendizaje híbrido para estimar temperaturas en el concreto en el marco del proyecto de investigación VIE-UIS 2823. *

Autor: Wilfredo Moreno Gamboa **

Palabras Clave: Red Neuronal, Híbrido, Base Radial, Temperatura, Puentes.

Descripción: La elaboración de este trabajo tuvo como objetivo principal brindar apoyo en la construcción de una viga de concreto reforzado y la medición de su temperatura interna y externa, durante un periodo de cuatro meses, en el marco del proyecto de investigación VIE-UIS 2823. Para esto, se emplearon dos cámaras termográficas una FLIR C5 y un dron DJI MAVIC 2 ENTERPISE ADVANCED (EU), una estación meteorológica Davis Vantage Pro2, un sistema de adquisición de datos Hydra Series III y cuarenta termopares tipo T embebidos en el segmento de viga bajo estudio. Además, se desarrolló una red neuronal con aprendizaje híbrido para estimar la temperatura interna en un bloque de concreto. Específicamente, en este trabajo se presentan: las actividades de apoyo en la construcción de un segmento de viga de estudio y en, la medición de temperatura con 40 termopares instalados en la viga, una revisión de literatura sobre el uso de redes neuronales en la estimación de temperatura interna del concreto, y la implementación de una red neuronal híbrida para predecir la temperatura de un bloque de concreto. Para este último punto, se emplearon redes con función de base radial con aprendizaje híbrido, combinando el aprendizaje supervisado y no supervisado, implementando una programación usando el algoritmo K-means para aprendizaje no supervisado. Este enfoque permitió definir las variables de entradas de la RNA, la radiación solar, temperatura ambiente y la temperatura externa en las caras lateral, superior y frontal que influyen en la estimación de la temperatura interna del bloque de concreto analizado. Los resultados muestran que el índice de confianza, este es la relación entre los datos medidos y los resultados proporcionados por la RNA oscila entre el 85% y el 90%, dependiendo de la cantidad de datos con que se entrene la red.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Físico-mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director: Oscar Javier Begambre Carrillo, PhD. en Ingeniería. Codirector: José Miguel Benjumea Royero, PH. D. in Civil and Environmental Engineering.

Abstract

Title: Assistance in the construction of a girder and the implementation of hybrid-learning a neural network to estimate concrete temperatures within research project VIE-UIS 2823*

Author(s): Wilfredo Moreno Gamboa**

Key Words: Neural Network; Hybrid; Radial Basis; Temperature; Bridges.

Description: The main objective of this work was to provide support in the construction of a concrete beam reinforced and the measurement of its internal and external temperature, during a period of four months, within the framework of the research project VIE-UIS 2823. For this, two thermal imaging cameras, a FLIR C5 and a drone, were used. DJI MAVIC 2 ENTERPISE ADVANCED (EU), a Davis Vantage Pro2 weather station, a Hydra Series III data acquisition and forty T-type thermocouples embedded in the beam segment under study. In addition, a neural network with hybrid learning was developed to estimate the internal temperature in a block of concrete. Specifically, this work presents: the support activities in the construction of a segment of study beam and in, temperature measurement with 40 thermocouples installed in the beam, a literature review on the use of neural networks in the estimation of internal temperature of concrete, and the implementation of a network hybrid neural to predict the temperature of a concrete block. For this last point, networks were used with radial basis function with hybrid learning, combining supervised and unsupervised learning, implementing programming using the K-means algorithm for unsupervised learning. This approach allowed defining the input variables of the ANN, solar radiation, ambient temperature and external temperatura on the lateral, upper and frontal faces that influence the estimation of the internal temperature of the analyzed concrete block. The results show that the confidence index, this is the relationship between the measured data and the results provided by the ANN, ranges between 85% and 90%, depending on the amount of data used. train the network.

* Degree Work

** Faculty of Physical-Mechanical Engineering. School of Civil Engineering. Director: Oscar Javier Begambre, PhD. in Civil Engineering Codirector: José Miguel Benjumea, Ph. D. in Civil and Environmental Engineering.

Introducción

La ingeniería civil ha experimentado una notable evolución en los últimos años, impulsada en gran parte por los avances tecnológicos que han permitido abordar de manera más eficiente y precisa los desafíos en la construcción y mantenimiento de infraestructuras. En este contexto, el uso de redes neuronales de aprendizaje híbrido se ha destacado como una herramienta innovadora que ofrece soluciones efectivas para diversas aplicaciones (Andrushki et al., 2022).

Considerando lo expuesto anteriormente y siguiendo la propuesta del proyecto de investigación VIE-UIS No 2823, se han explorado las capacidades de las redes neuronales de aprendizaje híbrido en la medición de temperatura interna en los puentes. Las actividades llevadas a cabo en esta pasantía se dividen en varias secciones, que incluyen una revisión literaria sobre la implementación de estas redes en aplicaciones similares, el apoyo en la construcción de un segmento de viga tipo I de concreto reforzado, la colaboración en la etapa experimental del proyecto durante la medición de temperatura a través de sistemas de monitoreo instalados en el segmento de viga tipo I, la implementación de una red neuronal con aprendizaje híbrido para la predicción de la temperatura interna de un bloque de concreto y, finalmente, la presentación de las conclusiones derivadas de este trabajo de investigación. Estas actividades combinan conocimientos teóricos y prácticos en un esfuerzo por mejorar significativamente la capacidad de monitoreo térmico dentro del grupo de investigación INME-UIS.

2.Objetivos

2.1. Objetivo General.

Apoyar la construcción de una viga e implementar una red neuronal con aprendizaje híbrido para estimar temperatura en el concreto en el marco del proyecto de investigación VIE UIS 2823.

2.2. Objetivos Específicos.

Apoyar en la construcción de un segmento de viga de estudio.

Apoyar en la etapa experimental del proyecto durante la medición de temperatura mediante los sistemas de monitoreo instalados en el segmento de viga.

Realizar la revisión literaria para aplicación de redes neuronales con tipos aprendizaje no supervisado e híbrido empleadas en la estimación de temperatura del concreto.

Implementar una red neuronal con aprendizaje híbrido para la predicción de la temperatura interna de un bloque de concreto.

3. Revisión literaria de redes neuronales con aprendizaje no supervisado e híbrido.

La estrategia metodológica seguida en esta pasantía se fundamentó en una investigación minuciosa. Para la obtención de datos fiables y actualizados, se optó por emplear *Scopus* (Elsevier, 2013) como fuente de investigación principal. Asimismo, se recurrió a *Google Académico*, con el propósito de enriquecer el conjunto de información, y así identificar artículos académicos relevantes relacionados con las Redes Neuronales Artificiales (RNA).

3.1. Metodología empleada para la revisión de literatura.

A través, de la herramienta de búsqueda bibliográfica disponible en la biblioteca virtual UIS, *Scopus*, se llevó a cabo una indagación en los artículos relacionados con las Redes Neuronales Artificiales. Dado que esta base de datos alberga una amplia gama de información, se requirió la aplicación de varios filtros para acceder a la información relevante, mediante cadenas de búsqueda.

La búsqueda se inició utilizando las palabras clave "Artificial Neural Networks" (RNA), lo que resultó en la obtención de 255,605 documentos. Luego, se aplicó un segundo filtro con las palabras "Artificial Neural Networks in Bridges ", reduciendo los resultados a 318 artículos. Posteriormente, se aplicó un tercer filtro relacionado con las Redes Neuronales Artificiales en puentes de concreto y temperatura "Artificial Neural Networks in Concrete and Temperature Bridges", obteniéndose 36 resultados que se exportaron en formato CSV en *Excel*. Finalmente, se implementó un último filtro, excluyendo los documentos que no son artículos, de los resultados del aplicativo de *Scopus*, lo que redujo el conjunto a 27 artículos para su revisión.

3.2. Resultados de la revisión de literatura sobre RNA con aprendizaje no supervisado e híbrido.

Luego de la clasificación y selección de 27 artículos, el propósito central de esta investigación radica en la implementación de redes neuronales artificiales (RNA) en puentes de concreto para la estimación de la temperatura. Se realizó una interpretación y revisión minuciosa de estos artículos, siendo fundamental para el desarrollo de la pasantía, como se especifica en la Tabla 1.

Tabla 1

Clasificación del nivel de importancia de los 27 artículos.

Leyenda	Artículos
Importancia alta	2
Importancia Media	8
Importancia Media (RNA para resistencia del concreto)	6
No tan importante	8
Bajo	3

Se realiza una clasificación enfocándose específicamente en la relación directa con el tema central de esta investigación: la aplicación de redes neuronales artificiales (RNA) en puentes de concreto para la estimación de la temperatura en estas estructuras. Para cada artículo se incorpora, considerando su título, año de publicación, enlace, autores, países y resumen, resaltando los aspectos más relevantes de cada uno (consultar apéndice A).

Tras revisar los 27 artículos, se evidencia que China es el país que publicó más artículos científicos de investigaciones relacionadas con el tema de interés, seguido por Estados Unidos.

Tabla 2

Clasificación de los artículos por países.

Países	%
China	29
Estados Unidos	25
India	18
Otros	28

A continuación, se exponen las características de las RNA's con aprendizaje híbrido, teniendo en cuenta su arquitectura, tipo de aprendizaje y el algoritmo de entrenamiento utilizado. Estas características adquieren importancia en la identificación de patrones en los datos de temperatura y en la realización de predicciones.

3.2.1. Aprendizaje no supervisado.

Las redes de aprendizaje no supervisados no necesitan de la influencia externa para ajustar los pesos de las conexiones. La red no recibe ninguna información por parte del entorno que le indique si la salida producida con base en una determinada entrada es o no correcta; por lo tanto, a menudo se dice que estas redes se autoorganizan. La finalidad de estas redes es encontrar las características, regularidades, correlaciones o categorías que se puedan determinar entre la información presentada en su entrada. La interpretación de la salida de esta red depende de su estructura y del algoritmo de aprendizaje utilizado. La red aprende a adaptarse en base a las experiencias recogidas de los patrones de entrenamiento anteriores sin el beneficio de un maestro (Caicedo Bravo & López Sotelo, 2009).

3.2.2. Aprendizaje híbrido.

Este caso, coexisten en la red los dos tipos básicos de aprendizaje: supervisado y no supervisado, los cuales ocurren en diferentes capas neuronales. Los modelos de contra-propagación y las Redes con Funciones de Base Radial (RBF) son ejemplos de redes que utilizan este tipo de aprendizaje (Quezada Román, 2009).

3.2.3. Arquitectura de las RNA aprendizaje híbrido.

Las RNA de aprendizaje híbrido combinan el aprendizaje supervisado y el no supervisado. La arquitectura de las redes neuronales con aprendizaje no supervisado e híbrido combina la capacidad de identificar patrones y características en datos complejos, sin necesidad de etiquetas explícitas, característica del aprendizaje no supervisado, mientras el aprendizaje supervisado tiene la capacidad de realizar predicciones y clasificaciones precisas (Caicedo Bravo & López Sotelo, 2009). Este enfoque híbrido busca optimizar el rendimiento del modelo al aprovechar al máximo la información contenida en los datos de entrada, lo que resulta particularmente valioso en tareas de estimación de temperatura y otros procesos de modelado en los que la disponibilidad de datos etiquetados es limitada o costosa. La arquitectura se estructura de manera que la red neuronal puede aprender y adaptarse de forma autónoma a las características inherentes de los datos, al mismo tiempo que se le proporciona orientación y supervisión para mejorar su capacidad predictiva.

3.2.4. Tipos de red neuronal aprendizaje no supervisado o híbrido.

En las tablas 3 y 4 se exponen algunos de los modelos de redes neuronales más conocidos con aprendizaje no supervisado e híbrido.

Tabla 3

Ejemplos de RNA de Aprendizaje No supervisado

TIPO DE APRENDIZAJE NO SUPERVISADO	MODELO DE RED
APRENDIZAJE HEBIANO	RECURRENTES
	MATRIZ DE APRENDIZAJE
	TEMPORAL ASOCIATIVA
	CON MEMORIA
	MEMORIA ASOCIATIVA
	LINEAL (LAM)
	OPTIMAL LAM
	IMPULSO CON REFUERZO

	MEMORIA ASOCIATIVA DIFUSA
	ADITIVA DE GROSSBERG
	DERIVACIÓN DE GROSSBERG
	MEMORIA ASOCIATIVA BIDIRECCIONAL (BAM)
	BAM ADAPTATIVA
APRENDIZAJE COMPETITIVO/ COOPERATIVO	CUANTIZADOR VECTORIAL POR APRENDIZAJE
	COGNITRON/ NEOCOGNITRON
	MAPA QUE PRESERVA LA TOPOLOGÍA
	TEORÍA DE RESONANCIA ADAPTATIVA

Nota. Cubas Glenn y Borrero del Rio (2007, p. 32).

Tabla 4

Ejemplo de RNA de Aprendizaje Híbrido.

TIPO DE APRENDIZAJE HÍBRIDO	MODELO DE RED CONTRA-PROPAGACIÓN RED CON FUNCIÓN DE BASE RADIAL
-----------------------------------	--

Nota. Cubas Glenn y Borrero del Rio (2007, p. 33).

3.2.5. Redes con función de Base Radial.

La red con función de base radial (RBF) “es una técnica de aprendizaje híbrido (aprendizaje supervisado y no supervisado), que se destaca por su capacidad para modelar relaciones complejas en los datos. Su funcionamiento se basa en la utilización de funciones de base radial, que son centros o nodos distribuidos en el espacio de entrada y que responden a patrones específicos en los datos. Estas funciones capturan la distancia entre los datos de entrada y los centros, lo que permite al modelo realizar una transformación no lineal de los datos”. El algoritmo RBF se utiliza en una

variedad de aplicaciones, incluyendo la aproximación de funciones, la clasificación y la regresión, y su versatilidad lo convierte en una herramienta valiosa en el campo de la inteligencia artificial y el aprendizaje automático (Cevallos Ampuero, 2008).

3.2.6. Algoritmo de K-means.

El algoritmo de K-means es un método de agrupamiento (clustering) que tiene como objetivo dividir un conjunto de datos en K grupos o clústers, de manera que los puntos dentro de un mismo grupo sean más similares entre sí que con los puntos de otros grupos. El algoritmo opera iterativamente asignando cada punto al clúster cuyo centroide (punto representativo del grupo) está más cercano, y luego recalcula los centroides basándose en la nueva asignación (Vallejo Huanga, 2016).

En la ingeniería civil, el algoritmo de K-means puede tener aplicaciones en la evaluación de riesgos de fallas estructurales. Esto puede ayudar a los ingenieros civiles a identificar las áreas de riesgo y tomar medidas para mitigar los riesgos (Choi & So, 2014).

4. Apoyo en la construcción de un segmento de viga de estudio.

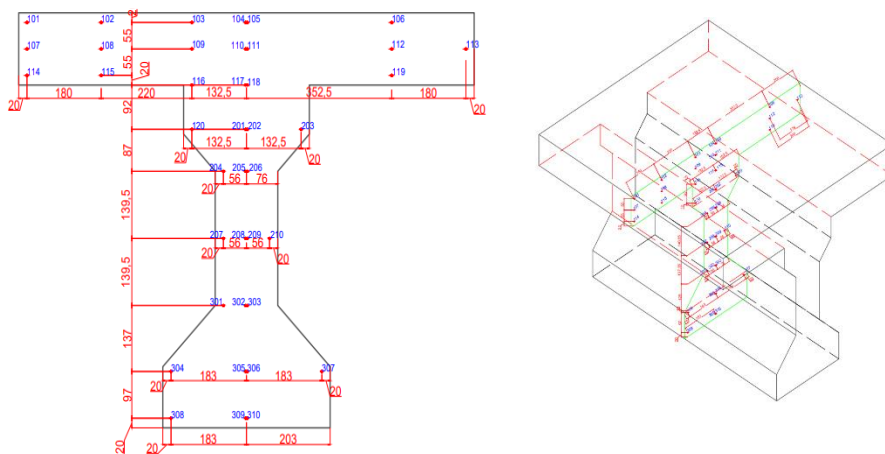
En este contexto, se contribuye al desarrollo de un segmento específico de viga tipo I en concreto reforzado mediante un enfoque integral en la construcción de vigas. Las vigas desempeñan un papel fundamental al soportar cargas y proporcionar estabilidad a las estructuras. La presente metodología se enfoca en garantizar la calidad de la viga a lo largo de cada etapa del proceso, abarcando desde el montaje, construcción y ensayos para garantizar la ubicación de los termopares y resistencia a la compresión del concreto según lo especificado en el diseño, el segmento de viga tipo I está ubicado en la terraza del edificio Álvaro Beltrán Pinzón de la Universidad Industrial de Santander.

4.1. Metodología.

A continuación, se ejecutan las siguientes etapas como apoyo en el proyecto investigación VIE-UIS 2823. Se llevó a cabo en varias fases un trabajo colaborativo con la participación de otros auxiliares de investigación, el tutor de la pasantía (ingeniero Pedro Cavadia) y docentes. Inicialmente, se planifica el diseño de la viga definiendo las dimensiones de esta según las normas de la AASHTO (AASHTO, 2023) para un diseño tipo I. El diseño tiene como objetivo simular las condiciones ambientales experimentadas en Bucaramanga del segmento de viga tipo I, que servirá para recolectar datos ambientales y de temperatura interna por medio del sistema de monitoreo instalado que son los 40 termopares tipo T distribuidos en la viga, (Figura 1) se realizó siguiendo las recomendaciones propuestas del tutor, el Ingeniero Pedro Cavadia, y diseños propuestos por Hagerdon et al. 2019, el uso de termopares tipo T, distribuidos uniformemente en la viga, se colocaron de forma que no hubiera contacto entre el termopar y el acero para evitar cualquier influencia en las lecturas de temperatura.

Figura 1

Ubicación de los 40 termopares (TCs) en el segmento de la viga tipo I



Posteriormente, se procede a la selección de materiales, realizando ensayos para garantizar que cumplan con los estándares establecidos por la NTC 673 (NTC 673, 2021). (adaptación de la ASTM C39 (ASTM C39, 2016))., siguiendo proporciones específicas del diseño. Se aplicaron técnicas de curado para asegurar la resistencia y durabilidad del concreto, manteniendo condiciones óptimas de temperatura y humedad durante el fraguado.

La fase de desencofrado siguió al tiempo de fraguado adecuado, seguida de una inspección visual para evaluar la calidad de la superficie y la forma de la viga. Durante la construcción, se realizaron ensayos de compresión en cilindros de concreto extraídos de la misma mezcla utilizada en la viga. Estos ensayos evaluaron la resistencia a la compresión del concreto y verificaron siguiendo los lineamientos de los planos y modelos realizados por el grupo de investigación (VIE UIS 2823), asegurando que cumpliera con una resistencia a la compresión de 4000 psi.

La culminación de esta actividad implica el cumplimiento de estándares de construcción de acuerdo con lo especificado en los planos y modelos de con el propósito de prevenir posibles fallas por compresión, flexión, tracción, para controlar la calidad del concreto, haciendo una proyección de la estructura de hormigón y garantizar la vida útil de la viga durante los ensayos propuestos por el grupo.

4.2. Resultados

Durante el proceso de construcción del segmento de viga tipo I, siendo esta una de las etapas más importantes del proyecto se garantizó su vida útil y la instalación del sistema de monitoreo de acuerdo con los lineamientos del diseño. Este ensayo es esencial para garantizar la resistencia a la compresión deseada, la durabilidad y prevenir fallas en la viga, de acuerdo con los estándares descritos en la NTC 673 (NTC 673, 2021). (adaptación de la ASTM C39 (ASTM C39, 2016)).

La viga tipo I se construyó integrando el sistema de monitoreo de contacto, que consiste en cuarenta termopares ubicados como se observa en la Figura 1. Está diseñada con el propósito de registrar datos de la temperatura interna en intervalos regulares. La importancia de la viga radica en que será el punto de referencia para la aplicación de una RNA. Esta red permitirá determinar con precisión la temperatura interna de la viga en tiempo real, proporcionando información crucial para el monitoreo y control térmico de la estructura del proyecto.

Se realizó el ensayo de cilindros de comprensión, teniendo en cuenta que la resistencia a la compresión de diseño del concreto era de 4000 psi, se ha obtenido un promedio en los 5 especímenes que indica que la resistencia a la compresión del concreto es un 12,77% superior a la requerida por el diseño. Este resultado significa que la viga exhibe una capacidad de carga y resistencia a la compresión mayor que lo inicialmente planeado. Este resultado constituye un indicio positivo de seguridad en la construcción del segmento de viga, respaldan la solidez estructural del proyecto (ver Apéndice B).

Por lo tanto, el concreto demuestra ser apto para su implementación en la viga tipo I al cumplir con los requisitos de resistencia y durabilidad establecidos para el proyecto, lo cual es beneficioso para la integridad y la seguridad de la construcción.

5. Realización de mediciones de temperatura en un segmento de viga mediante sistema de monitoreo.

El apoyo en la fase experimental implica la medición de la temperatura a través de los sistemas de monitoreo instalados en el segmento de viga tipo I, los 40 TCs y equipos de medición de temperatura externa.

A continuación, se detalla un enfoque estructurado para llevar a cabo esta tarea de manera efectiva, abarcando desde la preparación y calibración de los instrumentos hasta la recolección de datos y el análisis de los mismos. La importancia de esta fase experimental radica en su contribución a la generación de información valiosa para el proyecto en curso.

5.1. Metodología aplicada.

En primer lugar, se recibe una inducción por parte del tutor el ingeniero Pedro Juan Cavadia Ibáñez, la cual fue fundamental para el desarrollo de la pasantía de investigación para el sistema de monitoreo instalado en el segmento de viga tipo I, además del uso de equipos para el registro de la temperatura externa, que se utilizan antes, durante y después del proceso constructivo del segmento para garantizar un registro efectivo de los datos y verificar su funcionamiento adecuado.

Luego, se procede con la calibración de los 40 termopares, que funcionan como sensores de temperatura, asegurando su precisión y calibración. Posteriormente, se aborda la funcionalidad de otros equipos clave en el proyecto como la estación meteorológica, que registra variables climatológicas como radiación solar, temperatura ambiente y velocidad del viento Figura 2.

Figura 2

Estación meteorológica.



Así como el uso del dron DJI MAVIC 2 ENTREPRISE ADVANCED (EU) para la toma de las fotos térmicas en el segmento de viga tipo I. Estas fotografías se capturan en intervalos regulares desde las 6:30 a.m. hasta las 4:00 p.m. y, en caso de condiciones climáticas desfavorables, se recurre a la cámara FLIR C5 (Figura 3).

Figura 3

Posicionamiento del dron DJI MAVIC ENTREPRISE ADVANCED (EU)



Tanto el dron como la cámara FLIR C5 se utilizan para tomar fotos de la viga desde una distancia de 1.5 m, tanto en la cara este, como la oeste, lo cual se considera óptimo para mantener la resolución y precisión en la medición de temperatura externa (Figura 4).

Figura 4

Posicionamiento Cámara FLIR C5



Además, el equipo Hydra Series III Data Acquisition Unit (DAQ) (Figura 5) es configurado para tomar datos continuos de los 40 termopares embebidos en la viga tipo I, registrando su temperatura interna.

Figura 5.

DAQ y Consola Vantage Pro2.



En colaboración con otros pasantes de investigación del proyecto en curso, se establece un horario para asegurar la recopilación de datos de manera constante (ver Apéndice C).

6. Implementar una red neuronal con aprendizaje híbrido para la predicción de la temperatura interna de un bloque de concreto

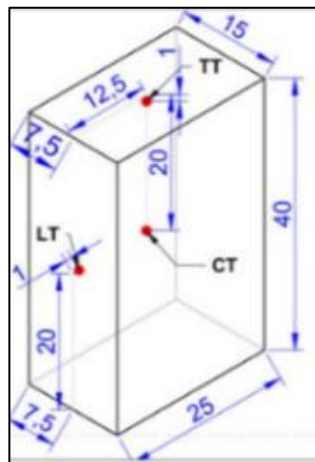
Para el desarrollo eficaz de una red neuronal artificial (RNA) de aprendizaje híbrido para la predicción de la temperatura de un bloque de concreto en aplicaciones de monitoreo y control

térmico en proyectos de construcción, se implementó un procedimiento. En este, se emplearon datos de temperatura interna en un bloque de concreto (Figura 6), recopilados previamente por el ingeniero Pedro Cavadia, quien ejerció como tutor durante esta fase de pasantía. El uso de una RNA de aprendizaje híbrido permite, una vez que la red ha sido debidamente entrenada, realizar predicciones precisas de la temperatura interna.

Figura 6.

Bloque de estudio con inserción de 3 termopares en su cara superior, lateral y frontal

- TT: termopar superior
- LT: termopar lateral
- CT: termopar central



6.1. Metodología.

Como se ha señalado previamente, en el marco del proyecto, se contaba con registros tabulados que abarcan tanto la temperatura interna como externa del bloque de concreto, los cuales fueron recopilados por el sistema de monitoreo mediante termopares. Además, se disponía de datos de la temperatura superficial del bloque de concreto, obtenidos a través de la cámara termográfica FLIR C5. Los registros concernientes a la temperatura ambiente y la radiación solar se obtuvieron mediante la estación meteorológica, utilizando su consola Vantage Pro2. El proceso de implementación de la RNA se inició utilizando los datos recopilados para un escenario

predeterminado relacionado con el bloque de concreto. Este escenario comprende el bloque de concreto en contacto directo con la placa, es decir, una situación de contacto de concreto con concreto (Figura 7).

Figura 7.

Estudio del bloque en concreto en el escenario.



Se registraron un total de 200 tomas de datos en intervalos de 30 min de las 6:30 am hasta las 4:00 pm durante 10 días, pero como resultado se obtuvo 194 datos, debido a que se presentaron circunstancias como mal tiempo y fotos mal tomadas. Luego, se organizó la información en un archivo de Excel, que incluyó la temperatura registrada en los termopares, así como las imágenes térmicas de la parte lateral, superior y frontal del bloque de concreto. Adicionalmente, se registraron datos como la temperatura ambiente, la velocidad y dirección del viento, la radiación solar y la precipitación, obtenidos a través de la estación meteorológica Davis Vantage Pro2. Luego, se creó un archivo CSV para separar los decimales con punto. Estos datos formaron la base para el entrenamiento y validación de la RNA. La programación de la RNA Base Radial se llevó a cabo mediante una extensión del software *Python* (Python Software Foundation, 2023), conocida como *Google Colab*, que permite escribir y ejecutar código a través del navegador web (Google

Chrome). Utilizando la biblioteca *TensorFlow*. Posteriormente, se procedió al entrenamiento de la red con aprendizaje híbrido, lo que implica la programación del aprendizaje no supervisado mediante el algoritmo K-means. Este proceso incluyó la inicialización de los centroides, la asignación de puntos a clústers, la actualización de los centroides y la repetición de estos pasos hasta que la asignación de puntos a clústers ya no cambie significativamente o se alcance un número predeterminado de iteraciones (Aprende IA, 2023). Las variables de entrada de la red neuronal incluyeron la temperatura ambiente, radiación solar y la temperatura externa en las caras lateral, frontal y superior del bloque de concreto.

Se definió una capa oculta con 10 centroides, a causa de que si se usaban menos centroides puede llevar a un subajuste (underfitting) donde la red no es lo suficientemente flexible como para adaptarse a la complejidad de los datos (Artola Moreno, 2019). Y una red con exceso de centroides podría conducir a un sobreajuste (overfitting), donde la red se adapta demasiado a los datos de entrenamiento y tiene dificultades para generalizar a nuevos datos. Este número de centros deseados actúan como filtros y ayudan a la red a identificar las características más relevantes y ajustarse a un patrón. Como resultado, se obtuvo la capa de salida, relacionada con los datos registrados por los termopares y ajustada por la RNA con un valor aceptable. Posteriormente, se procedió a realizar la programación del aprendizaje supervisado, consecuente del algoritmo K-means, dentro del modelo de red secuencial conformado por capas interconectadas de neuronas.

Durante el proceso de entrenamiento y calibración de la RNA se entrenó utilizando el 80% de los datos recopilados del bloque de concreto, dejando el 20% restante para la validación, no se normalizaron los datos debido a que puede ocasionar pérdida de información original, ya que ajusta los valores a un rango específico, eliminando detalles importantes. Además, introduce complejidad en el análisis al transformar los datos a una escala común, dificultando la comparación directa e

interpretación, lo que podría requerir análisis adicional (Géron, 2017). También, la normalización es sensible a valores atípicos, los cuales pueden tener un impacto significativo en los resultados y distorsionar la distribución de los datos. Es esencial destacar que la RNA se entrenó con el objetivo de prever las temperaturas internas en el bloque de concreto.

Como se aprecia en la Tabla no 5, a partir de las 9000 iteraciones no se consiguen mejoras significativas en el índice de confiabilidad, el sobre entrenamiento de la Red de Base radial ocurre luego de las 9000 iteraciones, ya que la pérdida en el conjunto de entrenamiento sigue disminuyendo, pero la pérdida en el conjunto de validación deja de mejorar o comienza a aumentar (Rivas Santos, 2003). Para obtener los resultados presentados en la Tabla no 5, se realizó el modelo considerando 3 capas de entrada (radiación solar, temperatura ambiente y la temperatura externa en las caras lateral, frontal y superior del bloque de concreto). Para la capa de salida se empleó las temperaturas registradas en los termopares lateral, superior y frontal. Este proceso permitió determinar la relación y comportamiento entre las capas de entrada y salida de la red. El código empleado en la implementación de la red para realizar el entrenamiento de la RNA con 9000 y 12000 iteraciones (ver Apéndice D).

6.2. Alcance de la implementación de la RNA.

El proceso de implementación de una RNA de aprendizaje híbrido para la estimación de temperatura de bloques de concreto se puede dividir en las siguientes etapas:

- Preparación de los datos: los datos de temperatura interna del bloque deben ser preprocesados para eliminar valores atípicos y homogeneizar la distribución.
- Diseño de la RNA: se debe seleccionar la arquitectura de la red, que incluye el número de neuronas en la capa de entrada, oculta y salida de la red.

- Entrenamiento de la RNA: la red se entrena utilizando los datos previamente preprocesados.
- Validación de la RNA: se evalúa el rendimiento de la red utilizando datos no utilizados en el entrenamiento.
- Estimación de la temperatura: una vez valida la red, se puede utilizar para estimar las temperaturas internas a partir de datos de temperatura obtenidos en la superficie del bloque

6.3. Resultados del desarrollo de la RNA con aprendizaje supervisado.

El grupo del proyecto de investigación VIE-UIS 2823 realizó un análisis previo para determinar las capas de entrada más significativas para el entrenamiento de una red neuronal para la predicción de la temperatura interna del bloque de concreto. Los datos de entrada seleccionados fueron: radiación solar, temperatura ambiente y la temperatura externa en las caras lateral, frontal y superior del bloque de concreto.

La red neuronal se programó con aprendizaje no supervisado utilizando el algoritmo K-means definiendo 10 centroides y con aprendizaje supervisado para optimizar y validar los resultados de la capa de salida.

Para evaluar la confiabilidad de la red, se realizaron cuatro experimentos con diferentes números de iteraciones: 3000, 7000, 9000 y 12000. Los resultados de los experimentos se muestran en la Tabla 5. Resultados de experimentos para predecir la temperatura interna, su número de iteraciones de entrenamiento y la confiabilidad.

Tabla 5

Resultados de experimentos para predecir la temperatura interna, su número de iteraciones y la confiabilidad.

No. Experimento	N° Iteraciones	Confiabilidad
1	3000	68,38%
2	7000	80,34%
3	9000	89,74%
4	12000	91,45%

Nota: Los resultados de los experimentos muestran que la red neuronal tiene una confiabilidad aceptable con un número de iteraciones de 9000 que es de aproximadamente el 90%.

7. Conclusiones

A continuación, se presentan las conclusiones de cada una de las actividades realizadas durante la pasantía de investigación.

A partir de la revisión literaria de la aplicación de redes neuronales artificiales (RNA) con función de base radial en la estimación de la temperatura en puentes de concreto, se destaca como una herramienta prometedora. Como resultado de la revisión los artículos, muestran que los investigadores se centran en comprender el comportamiento interno de los esfuerzos térmicos debido a las variaciones de temperatura interna y externa con el objetivo de mejorar la seguridad y la durabilidad de los puentes.

Con relación al apoyo en la construcción del segmento de viga tipo I en concreto reforzado, se construyó para que cumpliera satisfactoriamente las especificaciones de su diseño y que tuviese una resistencia a la compresión superior a los 4000 psi, esto fue posible debido a la calidad de los materiales. Permitiendo que esta estructura sea la base de la recolección de datos ambientales y de temperatura, incorporando un sistema de monitoreo de contacto con 40 termopares estratégicamente distribuidos.

Con el sistema de monitoreo llevado a cabo en el segmento de viga desde el 11 de julio hasta el 26 de julio, se registraron 12000 datos con la información de la foto térmica con la Flir C5 en la cara lateral izquierda y derecha y con el dron en la parte superior y lateral izquierda de la viga, con la colaboración del tutor y otros pasantes. Estos datos serán utilizados para procesar la información mediante los softwares Flir tools y DJI termal analysis tool 3, permitiendo la consolidación de una base de datos que refleje la temperatura interna en el segmento de viga tipo I.

Con relación al modelo de la red de base radial, los resultados obtenidos demuestran la eficacia del uso de redes neuronales artificiales de base radial y secuencial en este contexto específico. Las redes híbridas son particularmente significativas, ya que presentan una alta precisión en la predicción de la temperatura interna en el bloque de concreto, alcanzando un índice de confianza del aproximadamente 90 %.

Referencias Bibliográficas

- AASHTO. (2023). Manual de Dispositivos Uniformes de Control de Tráfico (MUTCD).
- Andrushy, A. D., Anand, N., Neebha, T. M., Naser, M. Z., & Lubloy, E. (2022). Autonomous detection of concrete damage under fire conditions. *Automation in Construction*, 140.
- Aprende IA. (2023, junio). Aprendizaje no supervisado: K-Means Clustering.
- Artola Moreno, Á. (2019). Clasificación de imágenes usando redes neuronales convolucionales en Python. Trabajo de fin de grado, Pontificia Universidad de Sevilla.
- ASTM International. (2016). ASTM C39: Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens.
- Caicedo Bravo, E. F., & López Sotelo, J. A. (2009). Una aproximación práctica a las Redes Neuronales Artificiales. Cali, Colombia: Programa Editorial Universidad del Valle.
- Cevallos Ampuero, J. (2008). Redes Neuronales de Base Radial aplicadas a la mejora de la calidad. *Revista Industrial Data*, 11(2), 63-72.
- Choi, Y-M., & So, H. K-H. (2014). Map-reduce processing of K-means algorithm with FPGA-accelerated computer cluster. En *Application-specific Systems, Architectures and Processors (ASAP)*, 2014 IEEE 25th International Conference on (pp. 9–16).
- Cubas Glenn, G., & Borrero del Rio, O. (2007). Estudio y aplicaciones de las redes ART (teoría de la resonancia adaptiva). Universidad Tecnológica de Bolívar, Cartagena, Colombia.
- Géron, A. (2017). *Hands-on machine learning with Scikit-Learn and TensorFlow*. Sebastopol, CA: O'Reilly Media.
- Google Colab. (2023). Google Colaboratory.
- Google Scholar. (s.f.). Google Scholar.

Hagedorn, R., Martí-Vargas, J. R., Dang, C. N., Hale, W. M., & Floyd, R. W. (2019). Temperature Gradients in Bridge Concrete I-Girders under Heat Wave. *Journal of Bridge Engineering*, 24(8).

Microsoft Corporation. (2019). Microsoft Excel (Version 2019). Microsoft.

NTC 673. (2021). Método de ensayo de resistencia a la compresión de especímenes cilindros de concreto.

Python Software Foundation. (2023). Python Programming Language.

Quezada Román, P. A. (2009). Redes RBF con aprendizaje híbrido para la predicción de captura de anchovetas. Trabajo de fin de grado, Pontificia Universidad Católica de Valparaíso.

Rivas Santos, V. M. (2003). Optimización de redes neuronales de funciones base radiales mediante algoritmos evolutivos. Tesis doctoral, Universidad de Granada.

Scopus. (2013). Elsevier.

TensorFlow. (2023). TensorFlow: Open source machine learning framework.

Vallejo Huang, D. F. (2016). Clustering de documentos con restricciones de tamaño. Trabajo de fin de máster, Universidad Politécnica de Valencia.

Apéndice D. Enlace de la implementación del código de la RNA, de las 3 capas de entradas (temperatura ambiente, radiación y temperatura externa), y la capa de salida (temperaturas internas en los termopares)

- 12000 iteraciones:
<https://colab.research.google.com/drive/1wnbEK2li6stFQFyGDje8vRICghuplCRX?usp=sharing>
- 9000 iteraciones:
<https://colab.research.google.com/drive/1xFwpKCCX2T1tt0x4RSNvJwwVGsQEFGQZ?usp=sharing>