

Desarrollo de una red neuronal artificial para validar cálculos en el diseño estructural de puentes

Casanova del Angel Francisco¹ y Atilus Louissaint Wilbert²

Fecha de recepción: 17 de junio de 2013 - Fecha de aprobación: 27 de noviembre de 2013

RESUMEN

El objetivo central de este trabajo de investigación es el desarrollo de un método computacional para comparar el cálculo de esfuerzos normales en estructuras de puentes pre esforzados mediante redes neuronales artificiales con el apoyo de programas de computadora y un software comercial. El método neuronal desarrollado revisa los elementos estructurales de puentes, y valida, de manera binaria, los esfuerzos en el centro de la trabe cajón del puente en estudio. Los resultados del cálculo del estado de esfuerzos en la trabe cajón del puente permiten entrenar los patrones de la red neuronal artificial. Al comparar los esfuerzos normales calculados bajo una red neuronal artificial con los que se calculan mediante un paquete computacional comercial, hay una diferencia de error de alrededor de 1%, el que puede deberse a la cantidad de decimales que no se usan en los cálculos manuales.

Palabras clave: red neuronal artificial, puentes de concreto, algoritmo de propagación inversa, trabe cajón, nervaduras.

Development of an artificial neural network to validate calculations in the structural design of bridges

ABSTRACT

The main objective of this research is the development of a computational method to compare the calculation of normal stress in pre-stressed bridges structures using artificial neural networks with the support of computer programs and commercial software. The developed neural method checks the structural elements of bridges and validates, in a binary manner, stresses on the center of the box girder of the bridge under study. The results of stress status calculation in the box girder of the bridge allow training artificial neural network patterns. When comparing normal stresses calculated under an artificial neural network with those calculated using a commercial computer package, there is an error difference of about 1%, which may be due to decimal places that are not used in manual calculations.

Keyword: Neural network, concrete bridges, Backpropagation, box beam, ribbed.

¹ SEPI de la ESIA, UP ALM del IPN. Correo electrónico: fcasanova@ipn.mx
www.ipn.academia.edu/franciscocasanovadelangel

² Université d'État d'Haïti. Correo electrónico: wilbert.atilus@facebook.com

Nota: El período de discusión está abierto hasta el 1° de julio de 2014. Este artículo de investigación es parte de Ingeniería–Revista Académica de la Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Yucatán, Vol. 17, No. 3, 2013, ISSN 1665-529-X.

INTRODUCCIÓN

Breve reseña histórica sobre la construcción de puentes

El procedimiento general para analizar y diseñar puentes de concreto es parecido al usado en las estructuras de concreto de edificios. Las diferencias principales entre ellos son debidas a las condiciones de carga, al comportamiento y a su respuesta. El movimiento de cargas de los vehículos y el impacto producido por las mismas, influye en el análisis de puentes; el impacto es generalmente un problema menor en el análisis de estructuras de concreto para edificios, aunque debe ser considerado en aquellos casos donde es originado por dispositivos especiales como elevadores, grúas móviles y vehículos en cocheras localizadas en niveles superiores al de la calle. Otras diferencias importantes señaladas en la literatura entre un edificio y un puente son las cargas vehiculares (Rascón Chávez, 1999), la fuerza de frenado (AASHTO 1996; AASHTO 2002), la fuerza de impacto y la fuerza centrífuga (Arias-Salgado, 1998).

Los puentes de madera son más fáciles y más rápidos de construir que los de piedra y han resultado siempre más económicos, aunque han planteado problemas de durabilidad y por ello se han considerado siempre de una categoría inferior que los de mampostería; generalmente se les ha dado carácter de obra provisional. Los romanos fueron los grandes ingenieros históricos, no habiéndose superado su técnica y realizaciones hasta los últimos dos siglos. Los puentes de Alcántara, Mérida, Córdoba o el Acueducto de Segovia, España, son solamente algunas muestras de su arte e ingeniería que ha llegado hasta nuestros días (Peraza, 2008; Ritter, 1990; Meyer-Usteri, 2004; Freedman et al., 2002; Gómez, 2006).

La aparición de nuevos materiales de construcción, principalmente el acero, dio paso a un replanteamiento de la situación. Con la teoría de estructuras se elaboraron los modelos de cálculo para la comprobación de los diseños cada vez más atrevidos de los ingenieros, como arcos y armaduras para salvar grandes claros. El ferrocarril vino a acelerar el desarrollo de los puentes cada vez más grandes, de diseño más elaborado y con técnicas de construcción cada vez más desarrolladas y avanzadas. Ya en el siglo XX, el concreto reforzado y más tarde el concreto presforzado, contribuyeron todavía más al desarrollo de esta técnica, abaratando costos, facilitando técnicas y, en definitiva, popularizando su construcción.

Ahora bien, un puente es una estructura destinada a salvar obstáculos naturales y artificiales con el fin de unir caminos. La subestructura de un puente está formada por los estribos extremos, las pilas o apoyos centrales y los cimientos, que forman la base de ambos. La superestructura consiste en el tablero o parte que soporta directamente las cargas, constituida por vigas, cables, o bóvedas y arcos que transmiten las cargas del tablero a las pilas y los estribos. De acuerdo a su función, existen: puentes para carretera, puentes para ferrocarril y puentes móviles. La palabra viaducto generalmente se reserva para los puentes largos, con frecuencia de claros prolongados y altura constante.

La elaboración de este trabajo fue pensada en dar una idea general de todos los aspectos fundamentales que se deben tomar en cuenta para el diseño de un puente. Ésto implica considerar los estudios preliminares necesarios, así como la normatividad que rige, las cuales ya han sido establecidas, razón por la cual tomamos en cuenta la normatividad francesa, la de la American Concrete Institute (ACI), de la American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), así como estudios realizados por otros ingenieros para el diseño de determinados elementos estructurales o criterios de diseño según la regionalización donde se encuentre localizado el puente en estudio. Para efectos de este trabajo de investigación, el enfoque es el diseño estructural.

Breve reseña histórica de la red neuronal aplicada

En 1986, Rumelhart *et al.* desarrollaron un método que tenía por objetivo lograr que una red neuronal aprendiera la asociación que existe entre los patrones de entrada que ingresan a la misma y las clases correspondientes, utilizando más niveles de neuronas de los que empleó Rosenblatt en su Perceptrón. El método está basado en la generalización de la regla delta y logra ampliar considerablemente el rango de aplicación de las redes neuronales.

El primer algoritmo de entrenamiento para redes multicapa fue desarrollado por Paul Werbos en 1974; éste se desarrolló en un contexto general, para cualquier tipo de redes, siendo las redes neuronales una aplicación especial, razón por la cual el algoritmo no fue aceptado dentro de la comunidad de desarrolladores de redes neuronales. Fue solo hasta mediados de los años 80 del siglo XX, cuando el algoritmo *Backpropagation* o algoritmo de propagación inversa fue redescubierto al mismo tiempo por varios investigadores (Rumelhart *et al.* 1986). El algoritmo se popularizó cuando fue incluido en el libro *Parallel distributed processing* por los

sicólogos David Rumelhart y James McClelland. La publicación de este libro trajo consigo un auge en las investigaciones con redes neuronales. La mayoría de los sistemas actuales de cómputo se han diseñado para llevar a cabo funciones matemáticas y lógicas a una velocidad asombrosamente alta para el ser humano (Laudon y Laudon, 2000). Sin embargo, la destreza matemática no es lo que se necesita para resolver problemas de reconocimiento de patrones en entornos ruidosos, característica que incluso dentro de un espacio de entrada relativamente pequeño puede llegar a consumir mucho tiempo. El problema es la naturaleza secuencial del propio computador; el ciclo tomar-ejecutar de la naturaleza Von Neumann solo permite que la máquina realice una operación a la vez (von Newman y Wiener, 1980). En la mayoría de los casos, el tiempo que necesita la máquina para llevar a cabo cada instrucción es tan breve (típicamente una millonésima de segundo) que el tiempo necesario para un programa, así sea muy grande, es insignificante para los usuarios.

Teniendo como objetivo la utilización de las redes neuronales artificiales como herramienta práctica que permita; a través de un entrenamiento, poder comparar y valorar los cálculos de los esfuerzos normales por flexión en la sección transversal compuesta en el centro del claro de la trabe cajón de puentes, de manera binaria, veamos la formulación teórica del cálculo de los elementos estructurales en el diseño de un puente.

METODOLOGÍA

Localización y datos generales de diseño

El puente no será identificado para respetar los derechos de autor. La longitud total del puente es de 90 m repartida en tres tramos para considerar tres carriles de vehículos con un ancho total de calzada de 10.50 m cada uno. Van adosadas a ambos lados sendas pasarelas para peatones con un ancho libre de 1.50 m, Figura 1.

Elección del tipo de puente y de sección

Teniendo en mente el perfil del río por cruzar, las características del terreno en el que se puede cimentar la estructura y el procedimiento de construcción a elegir, se puede pensar como solución adecuada un puente continuo de losa y nervaduras, estas últimas preesforzadas.

En los estudios para cimentación se encontró que se puede cimentar la estructura sobre un tepetate arenoso compacto, que proporciona una adecuada sustentación para garantizar que no se tendrán hundimientos en los apoyos y por consiguiente no habrá cambios en los esfuerzos a que quede sujeta la estructura. Por esta razón, y por la importancia decisiva del procedimiento de construcción en la economía de la obra, se optó por una estructura continua preesforzada formada por una losa nervada de concreto reforzado; las traveses o nervaduras serán continuas en los apoyos intermedios que por conveniencia se sitúan en las secciones 20 a partir de los extremos y que se preesforzarán mediante cables de pre esfuerzo. La superestructura consistirá en dos tramos en cantiléver con sección completa de puente excepto parapetos y guarniciones y que tendrán una longitud de 30 m. a los extremos del cantiléver se unirán dos traveses de

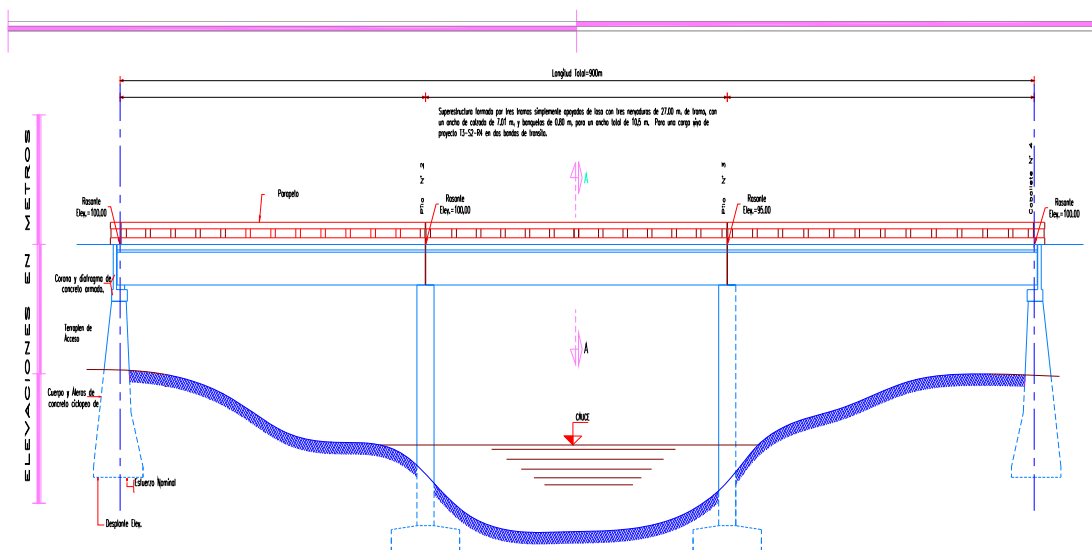


Figura 1. Corte longitudinal del puente en estudio.

acero de 127 cm que servirán como obra falsa metálica para el colado de la parte central del puente; la unión se logrará mediante el pre esfuerzo vertical de la trabe de concreto y acero. Posteriormente estas trabes serán empleadas en puente de definitivo continuo. Una vez colada la parte central del puente se hará este continuo mediante el pre esfuerzo de continuidad (Fernández *et al.* 1971).

Análisis estructural del puente

A partir de la elección del tipo de puente y de sección, se definió el tipo de sección del puente en estudio y el procedimiento de diseño de la superestructura preesforzada. Se realizó el diseño de esfuerzos al centro del claro por cargas de la superestructura. Posteriormente se eligió el tipo de red neuronal artificial, su arquitectura y se desarrolló ésta aplicándose a los datos previamente obtenidos del cálculo de la trabe cajón (caso real). Dentro de la sección correspondiente se muestran los diagramas de flujo detallados para el cálculo de esfuerzos y el entrenamiento de la red. También se especifica la *Época* o máximo número de iteraciones para obtener la convergencia del programa y su error máximo permitido. Finalmente, se comprueban los resultados a través de un software comercial y se bosquejan conclusiones.

Procedimiento de diseño de la superestructura preesforzada (trabes cajón)

El cálculo de la superestructura preesforzada la hemos iniciado con el cálculo de las descargas del sistema de cargas para un camión T3-S3 de las normas SCT de México. Posteriormente se han calculado las propiedades geométricas de la sección. Se han calculado el centroide y el momento de inercia por medio del teorema de los ejes paralelos. Se han analizado las cargas muertas que incluyen el peso propio de la trabe cajón, el peso de la losa, parapeto y banquetta considerando una carga adicional peatonal como lo marcan las normas calculando el momento y el cortante. Hecho lo anterior se ha procedido a la determinación de la carga viva que provoca el camión T3-S3 y determinado el impacto aplicando, a través de:

$$I = \frac{15 \cdot 24}{L + 38} \leq 30 \%$$

donde I es el coeficiente de impacto y L es la longitud del claro.

Para el momento máximo y la fuerza cortante máxima, ha sido necesario calcular el factor de concentración dado por la reducción en las cargas. Se realiza el análisis de esfuerzos al centro del claro con:

$$\sigma = \frac{M}{S} = f_s$$

donde σ representa a los esfuerzos en la superestructura al centro del claro, M es la carga aplicada, S es el módulo de sección y f_s esfuerzos resultantes al momento de la transferencia.

Para las secciones simples y compuestas, conociendo los esfuerzos obtenidos se obtienen las tensiones internas mediante:

$$T = \frac{\sum F_i}{\frac{1}{a} + \frac{e}{s_i}}$$

donde $\sum F_i$ es la suma total de los esfuerzos en la fibra inferior de la trabe en (ton/m²), a es el área de la sección transversal de la trabe en sección simple en m², S_i es módulo de sección inferior de la sección simple de la trabe cajón en m³ y e es la excentricidad propuesta del posible arreglo de torones no mayor que la distancia centroidal de la sección simple. La fórmula permite el cálculo del número de torones, utilizados para revisar que se tenga el preesfuerzo permisible.

El siguiente paso es revisar las pérdidas por preesfuerzo mediante:

$$\Delta f_s = SH + ES + CR + CR_a$$

donde SH = contracción, ES = acortamiento elástico, CR = escurrimiento plástico y CR_a = pérdidas por relajación del acero.

Estas pérdidas se agregan al esfuerzo permanente, para obtener el esfuerzo total efectivo, el cual deberá ser menor que el permisible. A continuación se ha revisado la flexión última, teniendo en cuenta si la sección es regular o irregular. Seguidamente se ha revisado la tensión diagonal para el cortante en el eje de apoyos:

$$V_{ue} = \frac{1.30}{\phi} \left(V_{cm} + \frac{5}{3} V_{cvi} \right)$$

donde V_{ue} es el valor del cortante último exterior, ϕ es el factor de reducción de capacidad de la sección, V_{cm} es el cortante por carga muerta al cuarto del claro y V_{cvi} es el cortante por carga viva más impacto. A este valor se le resta el cortante que resiste el concreto

para, con este resultado, calcular el acero en los estribos.

Diseño de esfuerzos al centro del claro por cargas de la superestructura

Los esfuerzos, σ , en la superestructura para el caso de la sección simple han sido calculados haciendo uso de las siguientes fórmulas.

$$\sigma = fs = \frac{M}{Ss}$$

para la sección simple superior o en compresión o para la sección compuesta de acuerdo a sus propiedades geométricas, con Ss el módulo de la sección simple, M la carga aplicada y fs esfuerzos resultantes al momento de la transferencia.

$$\sigma = fi = \frac{M}{Si}$$

para la sección simple inferior o en tensión, con Si el módulo de la sección simple inferior, y fi esfuerzos resultantes inferiores.

$$\sigma = fs' = \frac{M}{Ss'}$$

para la sección compuesta superior o en compresión en la losa, donde fs' son los esfuerzos resultantes compuestos superiores, y Ss' es el módulo compuesto de la sección, Figura 2.

A continuación hemos revisado el patín superior de la trabe, tomando en cuenta la trabe extrema y las entre trabes, calculando el peso de carga muerta que le corresponde, comprobando que el peralte propuesto sea el adecuado y la cantidad de acero la necesaria. El esfuerzo medio en el acero de preesfuerzo en la capacidad última, está dado por:

$$f_{su}^+ = f_s' \left(1 - \frac{0.5P^+ f_s'}{f_c'} \right)$$

donde f_{su}^+ es el esfuerzo medio del acero de preesfuerzo en la capacidad última, P^+ es el porcentaje de acero de preesfuerzo, f_s' son los esfuerzos resultantes compuestos superiores y f_c' es la resistencia del concreto a la compresión a los 28 días de edad

Y para el porcentaje máximo; debido a que cuando recién se aplica la fuerza del gato al elemento y el cable se estira entre los apoyos, el esfuerzo en el acero es f_T después de la transferencia de la fuerza al miembro del concreto (ya que ocurre una reducción inmediata del esfuerzo hasta su nivel inicial f_i ; debido al acortamiento elástico del concreto), para lo cual se han utilizado las fórmulas correspondientes para sección simple:

$$M_R \geq (1.2)M_{agr}$$

donde M_R es el momento resultante y M_{agr} es el momento de agrietamiento para la sección compuesta de la trabe cajón, calculado a través de:

$$M_{agr} = \left(2\sqrt{f_c'} + \frac{P}{A} + \frac{P^*e}{s_i} \right) * s_i$$

donde $2\sqrt{f_c'}$ es el módulo de ruptura, P es la fuerza final de preesfuerzo después de ocurridas las pérdidas, e es la excentricidad del arreglo de los torones, s_i es el módulo de sección inferior de la sección simple de la trabe cajón y A es el área de la sección simple de la trabe cajón.

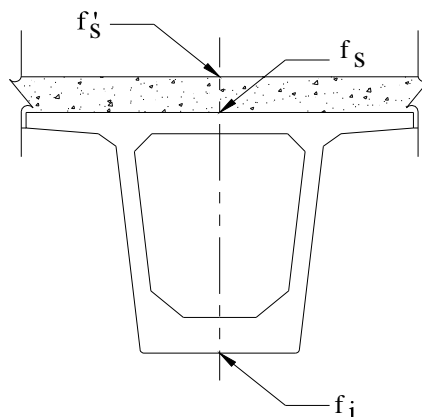


Figura 2. Localización de esfuerzos en la sección al centro del claro de la trabe cajón.

Para la sección compuesta:

$$M_{agr} = M_1 + M_2$$

donde M_1 es el momento causado por la carga de peso propio y por la carga de losa de piso y M_2 es el momento causado por la carga muerta y viva.

$$M_2 = \left(2\sqrt{f_c'} - \frac{M_1}{s_i} + \frac{P}{A} + \frac{P * e}{s_i} \right) * s_i$$

Consecuentemente procedemos a la revisión por adherencia entre trabe y losa, que no deberá ser mayor que el permisible mediante;

$$v_U = \frac{Vu * Q}{I * b'}$$

donde v_U es el esfuerzo de adherencia, Vu es el cortante último, Q es el momento estático con respecto a la sección transversal superior o inferior en que se investiga el esfuerzo rasante, I es el momento de inercia con respecto al centroide de la sección y b' es el ancho de la sección transversal donde se analiza el esfuerzo rasante.

Por último, procederemos con el diseño de la losa de compresión, considerando que trabaja en colaboración con el voladizo de la trabe cajón (Dan, 1990).

Metodología de desarrollo de la red neuronal

La aplicación de las redes neuronales artificiales comprende varias fases o etapas. Para el desarrollo y validación de la estructura se tienen las siguientes fases:

- la definición de la red neuronal comprende la determinación del número de neuronas de las capas de entrada, oculta y salida, así como también las diferentes funciones de activación que se utilizarán en las neuronas de la capa oculta y salida,
- la fase de entrenamiento de la red neuronal define si el tipo de entrenamiento que se realizará será aprendizaje supervisado o no supervisado, y es donde se determinan los algoritmos de entrenamiento,
- la fase de utilización de la red neuronal es propiamente la ejecución de la estructura de la red. Se inicia cuando se presenta una entrada a la red y termina generando una

salida en función a las entradas proporcionadas, y

- el mantenimiento de la red neuronal sirve para solucionar problemas dinámicos, por lo tanto es necesaria e indispensable una validación continua que garantice una buena utilización. A medida que transcurra el tiempo surgirán nuevos conjuntos de datos reales desconocidos por la red, por lo que será necesario un nuevo aprendizaje o, dependiendo del caso, realizar una nueva definición.

Una red neuronal, consta de dos momentos de explicación de su procesamiento; el *momento de aprendizaje* y el *momento de utilización* o aplicación de la estructura de la red (Faucet, 1993).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Programa Puente 1

Obtiene las áreas de la trabe cajón, los valores de las figuras correspondientes y se determinan las áreas de la sección compuesta. Si se examina con atención aquellos problemas que no se pueden expresar a través de un algoritmo, se da uno cuenta de que todos ellos tienen una característica común: la experiencia. Así, parece claro que una forma de aproximarse al problema consiste en la construcción de sistemas que sean capaces de dar solución rápida.

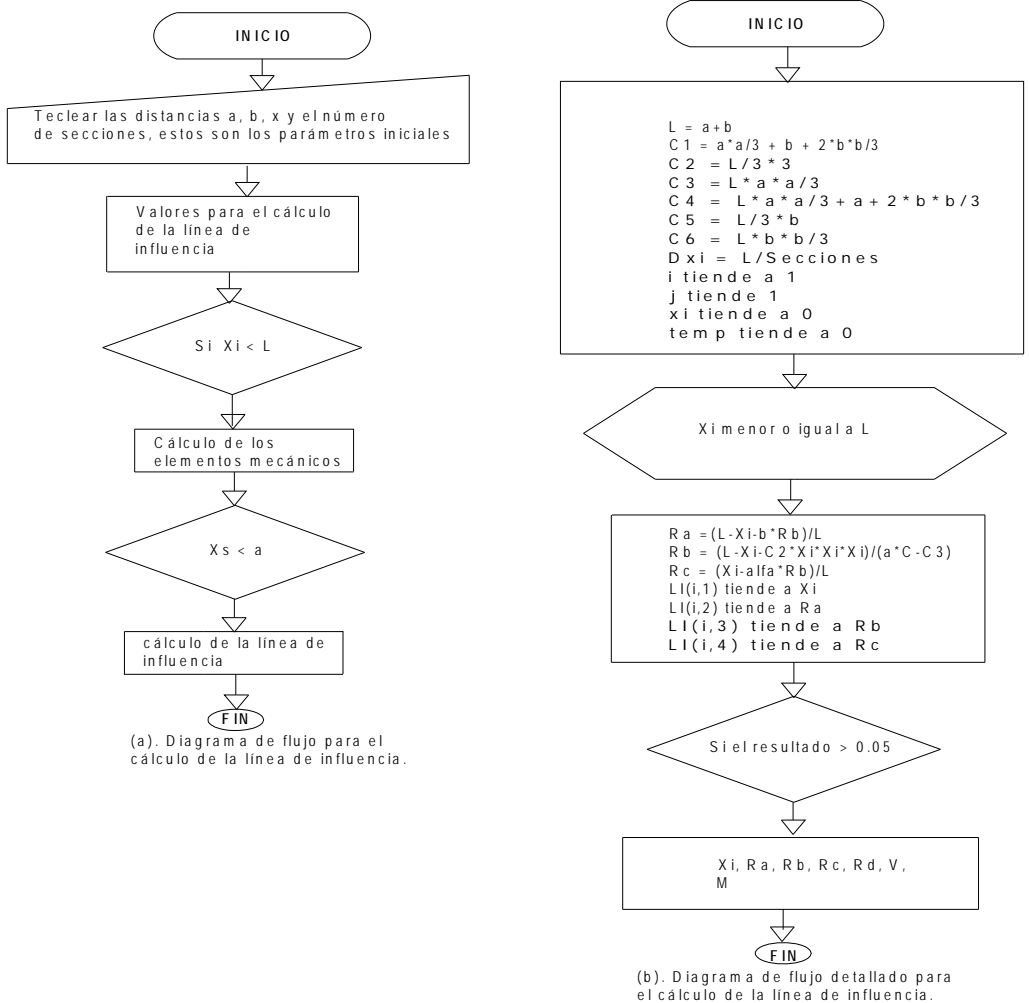
Archivo de datos

$S_1, S_2, S_3, S_4, S_5, S_6, S_7, S_8, S_9, S_{10}, S_{11}, S_{12}, y_1, y_s, C, A, M_1, M_{12}, M_{13}, F_b, F_s, F_{ss}, N, Q, L, K, Y_{inf}, y_{sup}, I, J, e, yy, zz, L_i, Re, Rf, Rd, zx, M, V, d, k_1, k_2, k_3, k_4, k_5, k_6,$

donde las S son los módulos de sección, A el área, C el centroide, las M son los momentos, las F son los esfuerzos, I es la inercia, k son las constantes, L_i es la línea de influencia, N es el número de iteraciones, V es el cortante, R son las reacciones y y los centros de gravedad. El diagrama de flujo del programa para el cálculo de la línea de influencia del puente en análisis, se muestra en la Figura 3.

En la Figura 4 se encuentran los diagramas de flujo detallados para el cálculo de la línea de influencia.

Los diagramas de flujo de la Figura 5 han sido diseñados para el entrenamiento de la red, el cálculo del esfuerzo y el reconocimiento respectivamente de la red neuronal artificial.



a).
Figura 3. Diagrama de flujo para el cálculo de la línea de influencia.

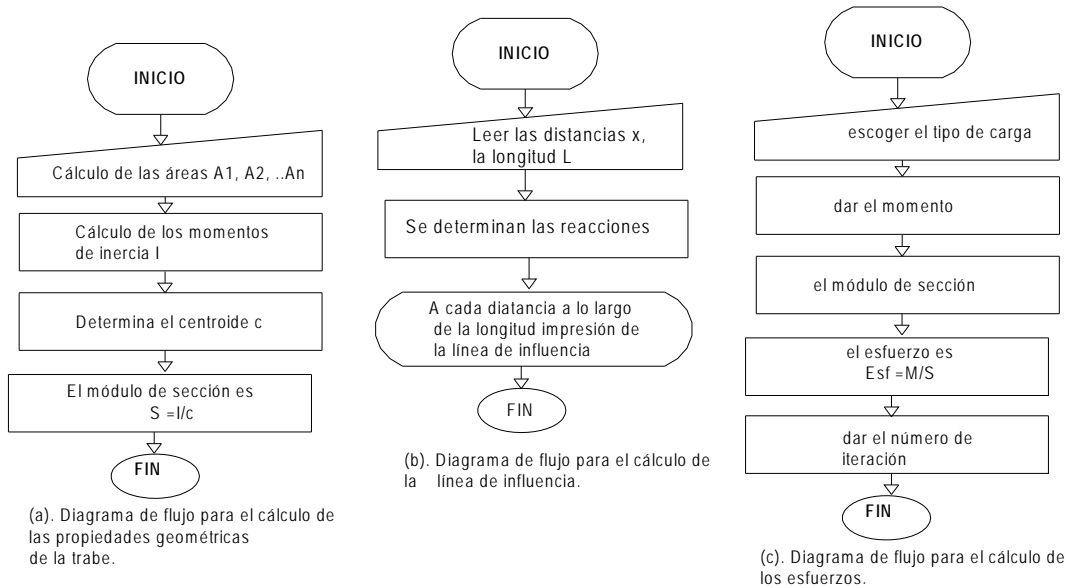


Figura 4. Diagrama de flujo para el cálculo de los esfuerzos.

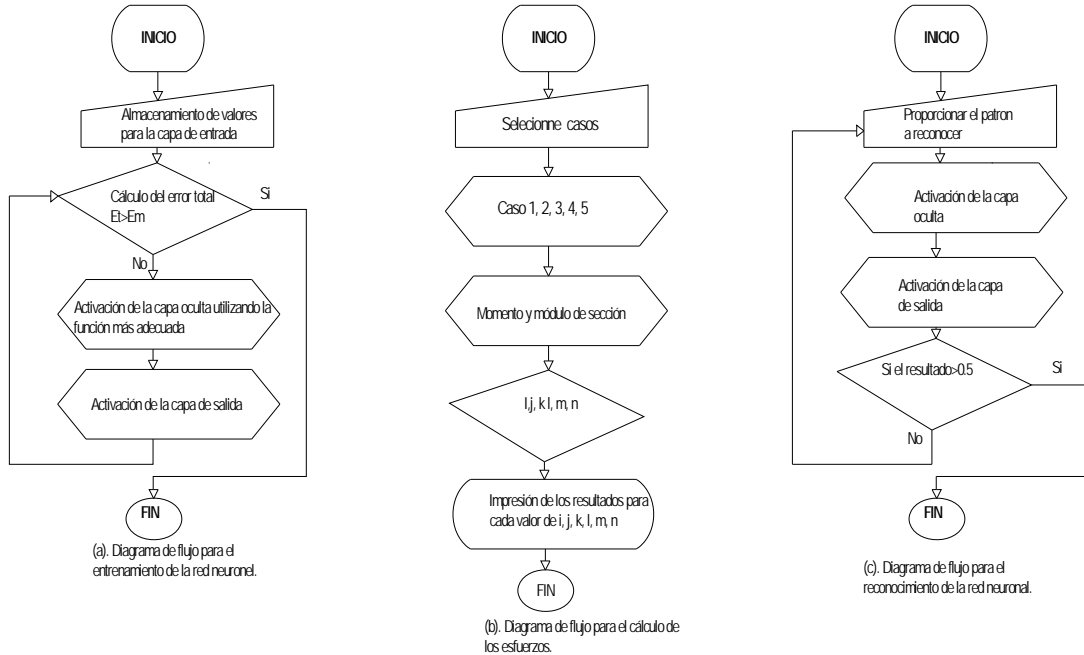


Figura 5. Diagrama de flujo para el entrenamiento y reconocimiento de la red neuronal.

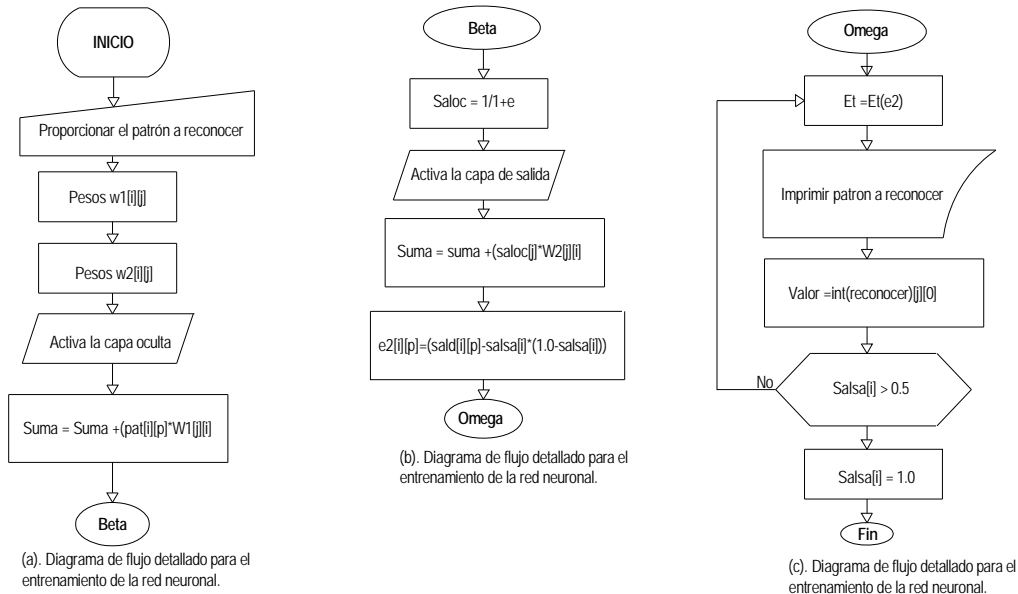


Figura 6. Diagrama de flujo detallado de la red neuronal artificial para el entrenamiento.

Los diagramas de flujo de la Figura 6 son el detalle de la red neuronal artificial que sirven para su entrenamiento.

En la Figura 7 se encuentran los diagramas de flujo detallados de la red neuronal artificial para su reconocimiento.

Para el desarrollo y aplicación de la red neuronal, se

calcularon primero las propiedades geométricas de los elementos estructurales del puente en estudio, su diagrama de flujo se muestra con las Figuras 3.a y 3.b, así como la línea de influencia de la superestructura de la trabe cajón del puente.

El siguiente sistema calcula la salida de la red neuronal artificial de tipo *Backpropagation* utilizando la función sigmoidea y entrenamiento supervisado.

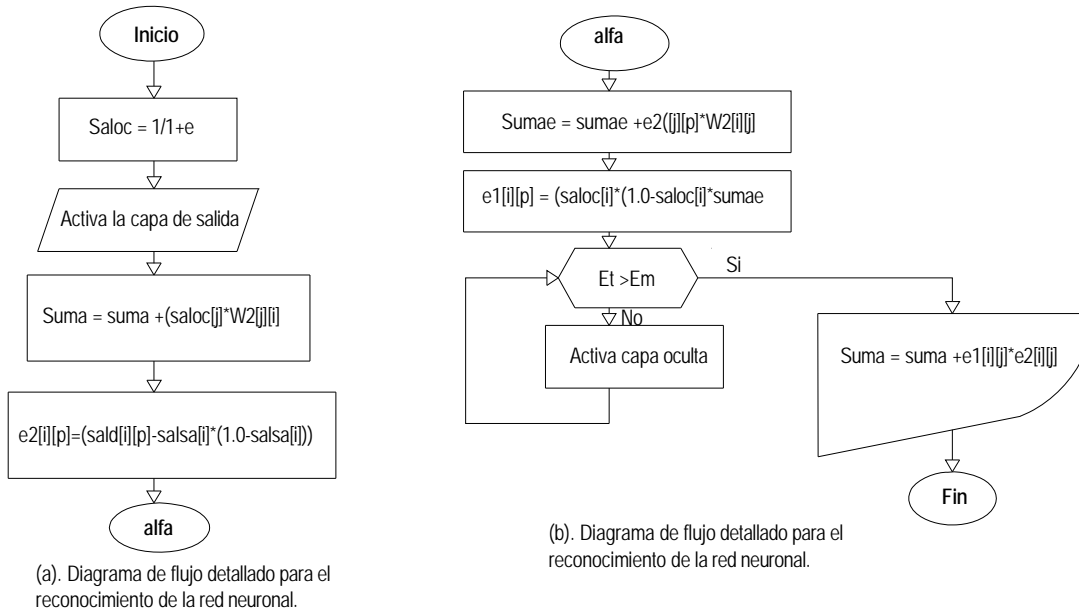


Figura 7. Diagrama de flujo detallado para el reconocimiento de la red neuronal artificial.

Aplicación de las redes neuronales artificiales tipo Backpropagation al caso real

Aquí se muestran los cálculos de los esfuerzos conociendo los momentos y los módulos de sección de la trabe cajón y son casos de cargas diferentes. El objetivo es el de obtener los esfuerzos en el centro de

la trabe cajón de la estructura del puente, dándose los momentos y los módulos de sección y calcular los esfuerzos para un vehículo tipo T3-S3 de 46 toneladas. A lo largo del trabajo de investigación Esf_1 , Esf_2 , Esf_3 nombran respectivamente el esfuerzo en la parte superior, inferior y media de la trabe cajón del puente.

Caso 1: peso propio. Datos de entrada (ton, m)

Momentos	Mod. sección
134.870000000000	0.274700000000000
134.870000000000	0.215200000000000

Datos de salida. Número de datos generados: 1000

Esf_1	Esf_2	Esf_3
490.971969421187	626.719330855019	278.082474226804
490.971969421187	626.719330855019	278.082474226804

Caso 2: peso de la losa. Datos de entrada (ton, m)

Momentos	Mod. sección
78.7300000000000	0.274700000000000
78.7300000000000	0.215200000000000
78.7300000000000	0.000011333500000

Datos de salida. Número de datos generados: 1000

Esf_1	Esf_2	Esf_3
286.603567528213	365.845724907063	
286.603567528213	365.845724907063	

Caso 3: peso adicional. Datos de entrada (ton, m)

Momentos	Mod. sección
43.7400000000000	0.704900000000000
43.7400000000000	0.263200000000000

Datos de salida. Número de datos generados: 1000

Esf_1	Esf_2	Esf_3
62.0513548020996	166.185410334347	92.4931275111017
62.0513548020996	166.185410334347	92.4931275111017

Caso 4: peso de peatones. Datos de entrada (ton, m)

Momentos	Mod. sección
8.020000000000000	0.704900000000000
8.020000000000000	0.263200000000000
8.020000000000000	0.472900000000000

Datos de salida. Número de datos generados: 1000

Esf_1	Esf_2	Esf_3
11.3775003546602	30.4711246200608	16.9591879890040
11.3775003546602	30.4711246200608	16.9591879890040
11.3775003546602	30.4711246200608	16.9591879890040

Caso 5: carga móvil. Datos de entrada (ton, m)

Momentos	Mod. sección
175.6300000000000	0.704900000000000
175.6300000000000	0.263200000000000
175.6300000000000	0.472900000000000

Datos de salida. Número de datos generados: 1000

Esf_1	Esf_2	Esf_3
249.155908639523	667.287234042553	371.389300063438
249.155908639523	667.287234042553	371.389300063438

Para hacer predecibles los cálculos de los esfuerzos normales emplearemos el programa de redes neuronales artificiales, en cual resuelve la red de *Backpropagation* con las vías independientes ajustadas a los momentos iniciales y módulos de sección dados.

Archivo de datos

Red neuronal de *Backpropagation* para hacer válido los esfuerzos en el diseño estructural del puente.

Matriz de vectores columna de entrenamiento de la red neuronal de *Backpropagation*, donde M son los momentos (ton-m), S son los módulos de sección (m^3), N es el número de datos. Se obtendrán como datos de salida a los Esf (Esfuerzos).

La matriz de momentos obtenida de estos datos, dividida por los módulos de sección conduce prácticamente a los esfuerzos normales para lo cual fueron necesarias 10,000 iteraciones para la primera neurona.

Explicación del programa de la red neuronal artificial de tipo *Backpropagation* y los resultados al ejecutar el programa

El programa ilustra el funcionamiento de una red neuronal artificial de tipo *Backpropagation*, donde el programa permite observar cómo se realiza el aprendizaje de una función lógica *sigmoidea*. El programa ha sido compilado con el lenguaje turbo C++ versión 3.0, con un amplitud de paso de 0.05 o tasa de aprendizaje (Pandya y Macy, 1995). Aquí, la *Época* es el máximo número de iteraciones para obtener la convergencia del programa y un error máximo permitido de 0.00001. También se sabe el tiempo máximo de entrenamiento; es decir, los segundos que tardará el programa para generar resultados.

Cálculo de los esfuerzos mediante el paquete *Staad Pro2003*

Se completa la comprobación los resultados de los esfuerzos en el centro de la trabe cajón del puente utilizando el paquete *Staad Pro2003*, que se resume en la gráfica de un elemento de placa de la Figura 8. Se sigue el mismo procedimiento para verificar los otros valores de los esfuerzos, obteniéndose los resultados para los diferentes tipos de carga.

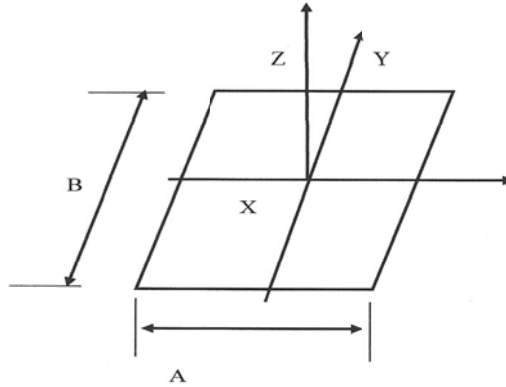


Figura 8. Gráfica de un elemento de placa.

Placa núm. 4			
$M_x =$	1.243 kNm/m		
$M_y =$	-18.065 kNm/m		
A =	0.19 m = 19 cm		
B =	0.3 m = 30 cm		
$M_x =$	12675.07 kg-cm/m		
$M_y =$	-184212 kg-cm/m		
	Área = 570 cm ²		
$I_x =$	42750 cm ⁴	$r_x =$	8.66 cm
$I_y =$	17147.5 cm ⁴	$r_y =$	5.48 cm
$S_x =$	4936.3 cm ³		
$S_y =$	3126.4 cm ³		
$M_x =$	2408.263 kg-cm		
$M_y =$	-55263.5 kg-cm		
$\sigma_x =$	0.487864 kg/cm ²		4.878637 ton/m ²
$\sigma_y =$	-17.6767 kg/cm ²		-176.767 ton/m ²

En la Tabla 1 se muestran los esfuerzos normales comparándolos con los cálculos manuales y con los que realiza Staad Pro2003, tanto en la parte superior, inferior y media, respectivamente, de la trabe cajón del puente. Al comparar los esfuerzos normales que se calculan neuronalmente con los que se calculados mediante el software Staad Pro2003, hay una diferencia de error de alrededor de 1%; eso puede

deberse a la cantidad de decimales que no se usan en los cálculos manuales, Tabla 1. Al observar los resultados de la red neuronal artificial, por su capacidad de usar valores binarios, no se descarta la posibilidad de proponer resultados correctos de salida a la red. Al analizar los resultados, la red neuronal artificial de *Backpropagation* es satisfactoria en la comparación de resultados.

Tabla 1. Esfuerzos normales en comparación con los cálculos manuales y Staad Pro2003 en la parte superior, inferior y media, respectivamente, de la trabe cajón del puente.

Esfuerzos obtenidos con	Peso propio	Peso de la losa	Carga adicional	Peso de peatones	Carga móvil
Parte superior de la traba cajón					
Cálculo neuronal	490.970	286.603	62.050	11.370	249.160
Staad Pro2003	495.164	290.546	67.089	12.978	253.471
Parte inferior de la traba cajón					
Cálculo neuronal	626.720	365.850	166.180	30.470	667.290
Staad Pro2003	645.304	367.203	176.767	34.447	670.114
Parte media de la traba cajón					
Cálculo neuronal	278.080	No hay	92.490	16.960	371.390
Staad Pro2003	284.332	No hay	95.265	17.254	374.570

En las Figuras 9, 10 y 11 se muestran los diagramas de esfuerzos normales de la trabe cajón del puente. La Figura 9 es la relativa a los esfuerzos normales caso del peso propio de la trabe cajón del puente. La Figura 10 muestra los esfuerzos normales caso de la carga de la losa de la trabe cajón del puente, y la Figura 11 los esfuerzos normales peso propio más la posición 2 de la carga viva de la trabe cajón del puente.

CONCLUSIONES

Se ha tratado de presentar un amplio panorama sobre redes neuronales artificiales y también de puentes. Del presente resumen del trabajo realizado, observamos que el camino hacia la concepción de nuevas formas para el análisis estructural y muy especialmente en el caso de puentes, con la creación de nuevas técnicas para el cálculo estructural, está abierto.

En este trabajo de investigación se muestra la aplicación de redes neuronales artificiales tipo *Backpropagation* a la validación del cálculo de los esfuerzos en el diseño estructural, y que sirven como complemento y/o sustitución de algunos pasos importantes en el diseño de los elementos estructurales de puentes. La aplicación de las redes neuronales artificiales, al validar los cálculos de esfuerzos en el diseño estructural, es viable. Es posible programar una red de tipo *Backpropagation* para validar los cálculos de esfuerzos en la trabe cajón del puente en estudio obteniéndose la solución casi exacta para diversos valores de momento y de módulo de sección de la estructura.

Otra manera de comprobar los resultados de los esfuerzos es estimarlos mediante un programa de cómputo estructural. Eso se hizo utilizando Staad Pro2003 y la diferencia está alrededor de 1%.

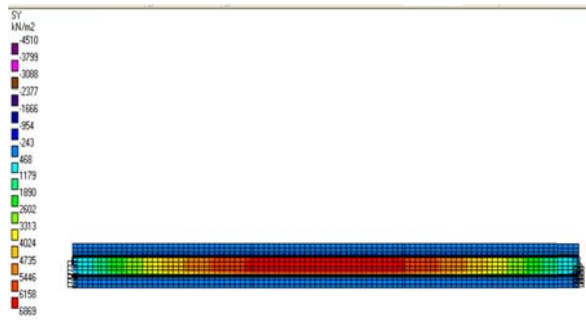


Figura 9. Esfuerzos normales caso del peso propio de la trabe cajón del puente.

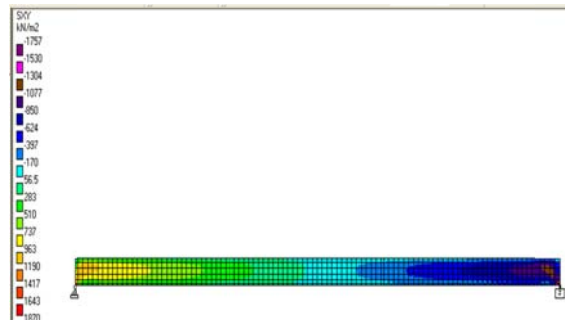


Figura 10. Esfuerzos normales caso de la carga de la losa de la trabe cajón del puente.

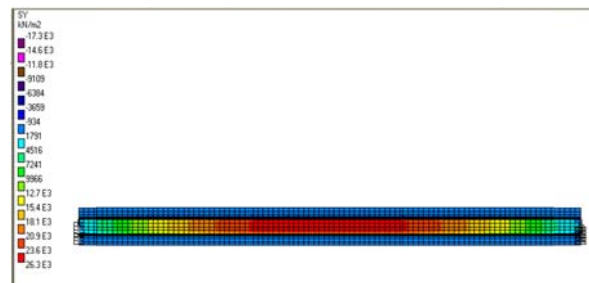


Figura 11. Esfuerzos normales peso propio más la posición 2 de la carga viva de la trabe cajón del puente.

AGRADECIMIENTOS

Este artículo y su correspondiente investigación llevada a cabo, fue desarrollado con parte del tiempo de los proyectos de investigación IPN-SIP 20120585 y IPN-SIP 20130805.

REFERENCIAS

AASHTO Standard. (2002). *Especificaciones AASHTO para el diseño de puentes por el método LRFD*. American Association of State Highway and Transportation Officials. Segunda edición.

Arias-Salgado Montalvo R. (1998). *Instrucción relativa a las acciones a considerar en el proyecto de puentes de carretera (IAP)*. Ministerio de Obras Públicas. Boletín Oficial del Estado. Madrid. España.

Dan E. N. (1990). *Diseño de Vigas de Concreto Reforzado*, primera edición. México Limusa. (Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto AC).

Faucet L. (1993). *Fundamental of Neural Networks: Architectures, Algorithms and Applications*. Prentice Hall International Inc, New Jersey. 296p. ISBN-13: 978-0133341867.

Fernández C., Sorneville G., y Páez B. (1971). *Puentes y pasos elevados para carreteras y vías urbanas*. Editores Técnicos Asociados. Barcelona España. ISBN: 84-7146-051-3.

Freedman G., Mettern C., Larsen P., Edwards S., Reynolds T. y Enjil V. (2002). *Timber Bridges and Foundations*. A report produced for the Forestry Commissions. Trada & BRE & Forestry Civil Engineering, p. 12.

Gómez Sánchez M. I. (2006). *Las estructuras de madera en los Tratados de Arquitectura (1500-1810)*. Revista de Madera para la Construcción y la Arquitectura. Asociación de Investigación Técnica de las Industrias de la Madera. 373 páginas.

Laudon K. y Laudon J. (2000). *Management Information Systems, Organization and Technology*. Cuarta Edición. Editorial Prentice Hall Hispanoamericana. ISBN-13:978-0-13-0117328.

Meyer-Usteri K. (2004). *Timber Bridges in Emmental and the upper Canton Bern*. Bollegin. Egger Kommunikation, Bernl. Covered Bridge Manual. US Department of transportation - Federal Highway Administration. 2005. Publication Number: FHWA-HRT-04-098, p. 346. www.fhwa.dot.gov/publications/research/

Normas AASHTO-96. (1996). *Standard Specifications for Highway Bridges*, Décimosexta edición. American Association of State Highway and Transportation Officials. Washington, D.C. p 644.

Pandya A. S., y Macy R. B. (1995). *Pattern Recognition with Neural Networks in C++*. CRC Press, Boca Raton, Florida. USA. ISBN-13: 978-0849394621.

Peraza F. (2008). *Puentes*. Los puentes de Madera en la historia. Boletín de Información Técnica Núm. 255, pp. 48-57. Revista de Madera para la Construcción y la Arquitectura. Asociación de Investigación Técnica de las Industrias de la Madera.

Rascón Chávez O. A. (1999). *Sistema de Cargas Vivas Vehiculares para Diseño de Puentes en Carreteras Alimentadoras*. Publicación Técnica Núm., 130. Instituto Mexicano del Transporte. Secretaría de Comunicaciones y Transporte. Sanfandila, Qro. México. ISSN: 0188-7297.

Ritter M. A. (1990). *Timber Bridges. Design, Construction, Inspection and Maintenance*. US Department of Agriculture - Forest Service. Editor. National Technical Information Service.

Rumelhart D. E, Hinton G. E. y Williams R. J. (1986). *Learning internal representations by error propagation*. In, Parallel distributed processing: explorations in the microstructure of cognition. Vol I, pp 318-362. The MIT Press, Cambridge, Massachusetts. USA. ISBN:-13:0-262-68053-X.

von Neumann J. y Wiener N. (1980). *From Mathematics to the Technologies of Life and Death*. Cambridge, Massachusetts: MIT Press. ISBN: 0-262-08105-9.

Este documento debe citarse como: Casanova del Angel F. y Atilus Louissaint W. (2013). **Desarrollo de una red neuronal artificial para validar cálculos en el diseño estructural de puentes**. Ingeniería, Revista Académica de la FI-UADY, 17-3, pp 191-203, ISSN 1665-529-X.