

OPTIMIZACIÓN ESTRUCTURAL PARA COSTO MÍNIMO CON RESTRICCIONES DE CONFIABILIDAD: EVALUACIÓN DE ALTERNATIVAS DE DISEÑO SÍSMICO

Oscar Möller^a, Juan Pablo Ascheri^a, Ricardo O. Foschi^b, Marcelo Rubinstein^a

^a *Instituto de Mecánica Aplicada y Estructuras (IMAE), Universidad Nacional de Rosario, Riobamba y Berutti, 2000 Rosario, Argentina, moller@fceia.unr.edu.ar*

^b *Civil Engineering Department, University of British Columbia, 6250 Applied Sciences Lane, Vancouver, B.C., Canada V6T 1Z4, rowfa1@civil.ubc.ca*

Palabras clave: Optimización, Confiabilidad estructural, Dinámica no lineal, Diseño sísmico.

Resumen. El proceso de toma de decisiones en ingeniería involucra la consideración de diferentes estrategias de diseño con las ventajas y desventajas de cada solución. Las dificultades en las decisiones se incrementan con la importancia y complejidad del problema, los requerimientos de desempeño, las incertidumbres involucradas y el costo asociado a cada alternativa. En este trabajo se comparan dos alternativas de diseño sísmico, (a) pórtico tradicional, (b) pórtico con dispositivos de disipación de energía. En esta segunda alternativa los elementos estructurales son más livianos pero se agrega el costo de los disipadores. Dentro de este contexto, se utiliza un algoritmo de optimización de búsqueda aleatoria sin cálculo de gradientes, con restricciones de confiabilidad calculadas mediante el uso de redes neuronales que aproximan los índices de confiabilidad en función de diferentes parámetros de diseño. En el ajuste de las redes neuronales se utilizan resultados del análisis dinámico no lineal para la distorsión de piso en función del conjunto de variables aleatorias. El costo esperado total resulta muy similar entre las dos alternativas, con mejor comportamiento estructural en el diseño con control de vibraciones.

1 INTRODUCCIÓN

El proceso de toma de decisiones en ingeniería involucra, en general, la consideración de diferentes estrategias de diseño con las ventajas y desventajas de cada solución. Las dificultades en las decisiones se incrementan con la importancia y complejidad del problema, los requerimientos de desempeño, las incertidumbres involucradas y el costo asociado a cada alternativa. Este trabajo muestra la importancia de la optimización para obtener comparaciones más realistas, facilitando luego la elección de la solución más conveniente.

El problema analizado es el diseño sísmico de un pórtico de hormigón armado, teniendo en cuenta las incertidumbres presentes tanto en el movimiento del suelo como en los componentes estructurales, utilizando variables aleatorias. En el marco del diseño sísmico basado en el desempeño (SEAOC Vision 2000, 1995; FEMA 356, 2000), se especifican valores aceptables de confiabilidad (probabilidad de falla anual) para la distorsión máxima de piso en dos niveles de desempeño: operacional y seguridad de vidas.

Esta respuesta máxima se calcula con un análisis dinámico no lineal para combinaciones específicas de las variables del problema. Dado que, para la estimación de la probabilidad de falla o confiabilidad, es conveniente disponer de una representación continua de las funciones de estado límite, los valores discretos calculados son aproximados por una superficie de respuesta adecuadamente ajustada que se utiliza como sustituto de la verdadera respuesta estructural (Hurtado, 2004).

Se han estudiado diferentes formas para las superficies de respuesta (Möller et al., 2009), encontrándose que las redes neuronales tienen ventajas en flexibilidad y adaptabilidad, y son utilizadas en este trabajo. De todas maneras, cualquiera sea el sustituto, la mayor ventaja está en la eficiencia computacional en la estimación de la probabilidad de falla con métodos de simulación tipo Monte Carlo (Melchers, 1987).

El procedimiento para resolver el problema de optimización debe considerar la presencia de las restricciones formuladas en términos probabilísticos, la dimensionalidad, la forma y número de funciones objetivo. Los métodos de optimización pueden usar diferentes aproximaciones (Pérez López, 2005; Swisher et al., 2000), algunos requiriendo el cálculo de gradientes, con esquemas tipo *steepest descent* o de mayor pendiente, otros usando gradientes conjugados, Newton o cuasi-Newton, y aun otros que no utilizan gradientes sino algoritmos genéticos o de búsqueda aleatoria.

En este trabajo se utiliza un algoritmo de búsqueda aleatoria que ha sido desarrollado en trabajos previos (Möller et al., 2011a). Los parámetros de diseño a optimizar son valores medios de algunas de las variables aleatorias del problema. Para minimizar el volumen de cálculo numérico, el dominio de optimización va evolucionando según la dirección de avance del proceso de optimización, agregando nuevas evaluaciones solo en el sector ampliado, y organizándose un esquema iterativo global.

En las aplicaciones numéricas se comparan dos alternativas de diseño, (a) pórtico tradicional de hormigón armado, (b) pórtico de hormigón armado con dispositivos de disipación de energía. En esta segunda alternativa los elementos estructurales serán más livianos pero se agrega el costo de los disipadores. La decisión de la mejor solución se puede basar en la comparación de la solución óptima con mínimo costo de cada alternativa. Se incluye el costo inicial de construcción y el costo de reparación después de un número desconocido de sismos que podrían ocurrir durante la vida útil de la estructura.

La discusión trata de aportar a la respuesta de: para los mismos requerimientos de desempeño, es económicamente conveniente colocar disipadores de energía aun cuando su contribución al costo inicial pueda ser importante?

2 OPTIMIZACIÓN CONSIDERANDO VARIABLES ALEATORIAS

2.1 Función objetivo y restricciones

La optimización consiste en encontrar valores de los parámetros de diseño, agrupados en un vector \mathbf{x}_d , que hagan mínima una función objetivo $C(\mathbf{x}_d)$. En este trabajo la función objetivo es el costo total correspondiente a la suma del costo inicial de construcción $C_0(\mathbf{x}_d)$ más el costo de reparación por daños $C_d(\mathbf{x}_d)$ debido a la ocurrencia de terremotos durante la vida útil de la estructura, es decir

$$C(\mathbf{x}_d) = C_0(\mathbf{x}_d) + C_d(\mathbf{x}_d) \quad (1)$$

Además debe cumplir con restricciones expresadas en términos probabilísticos al reconocer la naturaleza aleatoria de las variables que intervienen en el problema

$$\beta_j(\mathbf{x}_d) \geq \beta_{jT} \quad , \quad j = 1, 2 \quad (2)$$

donde $\beta_j(\mathbf{x}_d)$ son los índices de confiabilidad en los 2 niveles de desempeño analizados: “operacional” y “seguridad de vidas o control de daños”; β_{jT} son los valores mínimos a cumplir, o valores objetivos, durante la vida útil T_D .

Los parámetros de diseño \mathbf{x}_d son parámetros estadísticos de algunas de las variables aleatorias \mathbf{X} del problema, por ejemplo el valor medio de las dimensiones de las secciones de los elementos estructurales, cuantías de armadura, resistencia y rigidez de los disipadores, etc.

2.2 Esquema general iterativo

Se propone el esquema general de avance en la optimización que se muestra en la Figura 1. Se comienza de un diseño inicial o primer “punto de anclaje” \mathbf{x}_{d0} , que es el resultado del diseño preliminar de la estructura. Se establecen valores máximos y mínimos para todas las variables aleatorias \mathbf{X} en función de requerimientos constructivos, prescripciones reglamentarias, limitaciones físicas, o cualquier otro elemento de juicio ingenieril.

Para aquellas variables \mathbf{X} que son parámetros de diseño \mathbf{x}_d se establece un dominio inicial alrededor de \mathbf{x}_{d0} y dentro de los valores mínimos y máximos. En ese dominio se desarrolla la primera iteración del proceso de optimización, cuyos detalles se explican en la sección 2.5. Si en el proceso de búsqueda aleatoria se alcanza un límite del dominio, se modifica dicho límite en esa dirección de avance, y se realiza otra iteración general incorporando nuevas respuestas estructurales evaluadas solo en la región incorporada.

Con los nuevos resultados discretos más los ya disponibles, se ajustan nuevamente las redes neuronales que actúan como sustituto, con las cuales se evalúa la confiabilidad en las combinaciones de \mathbf{x}_d seleccionadas en la región incorporada. Estos resultados se agregan a los disponibles y se repite el entrenamiento de las redes neuronales que aproximan los índices de confiabilidad. Luego se continúa con el proceso de optimización.

Este proceso iterativo global finaliza cuando el proceso de optimización converge a la solución óptima.

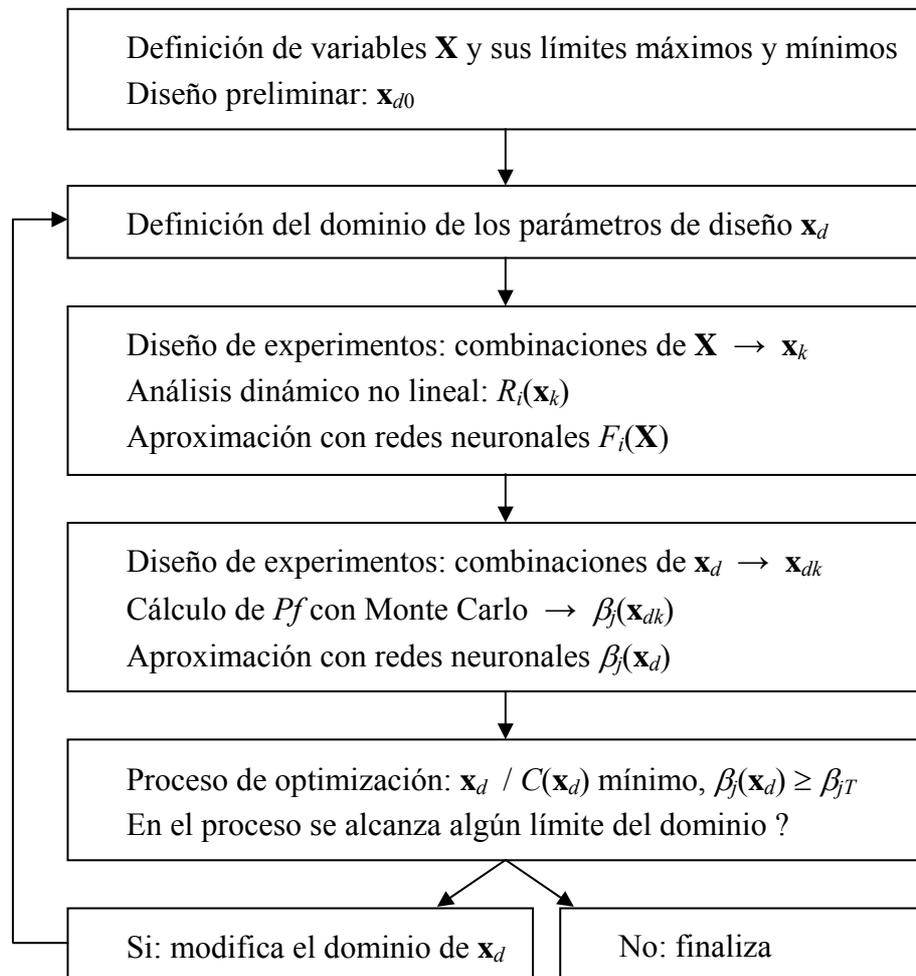


Figura 1: Proceso iterativo general

2.3 Análisis dinámico no lineal

La optimización requiere el cálculo de la respuesta dinámica no lineal de la estructura, en términos de las variables aleatorias \mathbf{X} y para cada acelerograma considerado.

Para la estructura sin control de vibraciones se utiliza un modelo de elementos de barra (Möller, 2001; Möller y Foschi, 2003; Möller et al., 2011b) que alcanza un buen balance entre precisión y simplicidad. El elemento de barra se descompone en varios subelementos conectados en serie, cada uno representando un mecanismo diferente que contribuye al comportamiento histerético de las regiones críticas de miembros de hormigón armado, siguiendo un modelo similar al de Filippou et al. (1992).

Para la estructura con control pasivo de vibraciones se utiliza el mismo modelo de barras mencionado en el párrafo anterior, con el agregado de otro tipo de elemento que modeliza la disipación de energía (Ascheri et al., 2009). Este elemento de barra disipador está compuesto de tres subelementos, dos de comportamiento elástico lineal y el tercero, ubicado en el interior de la barra en posición genérica tiene tres resortes, uno para cada grado de libertad, a los cuales se le pueden otorgar por separado diferentes ecuaciones constitutivas no lineales expresadas en fuerzas-desplazamientos.

2.4 Aproximación con redes neuronales

Con el modelo descrito en la sección 2.3 se obtienen las respuestas máximas, que intervienen en las funciones de estado límite o de falla de la estructura, para cada combinación de las variables \mathbf{X} elegida aleatoriamente con la técnica de diseño de experimentos. Estos resultados discretos se aproximan mediante una función continua representada con redes neuronales, cuya expresión general es

$$R(\mathbf{X}) \cong F(\mathbf{X}) = h \left(\sum_{j=1}^J W_{kj} h \left(\sum_{i=1}^N W_{ji} X_i + W_{j0} \right) + W_{k0} \right) \quad (3)$$

donde $R(\mathbf{X})$ es el “verdadero” valor de la respuesta obtenido con análisis dinámico no lineal para las variables X_i , $F(\mathbf{X})$ la aproximación con red neuronal, W_{kj} y W_{ji} son factores de peso a calcular, y $h(t)$ es la función no lineal de transferencia, que en este trabajo es la sigmoide:

$$h(t) = \frac{1.0}{(1 + \exp(-t))} \quad (4)$$

El proceso de entrenamiento consiste en encontrar los pesos W que minimicen el error total entre las predicciones de la red y los resultados del análisis dinámico no lineal para diferentes combinaciones de las variables de entrada X_i . En este trabajo se utilizó la técnica conocida de “backpropagation”.

2.5 Evaluación de la confiabilidad

Con las redes neuronales representando las respuestas i de la estructura $R_i(\mathbf{X})$ se plantean las funciones de falla, que en forma genérica se escribe

$$G_i(\mathbf{X}) = RLIM_i - R_i(\mathbf{X}) \cong RLIM_i - F_i(\mathbf{X}) \quad (5)$$

donde $RLIM_i$ es el valor límite de la respuesta i . El cálculo de la probabilidad de falla se realiza con el método de Monte Carlo estándar. Esto no implica dificultades, debido a la aproximación de las respuestas estructurales con las funciones explícitas de las redes neuronales.

$$Pf_j(\mathbf{x}_d) = P[G_{i,j}(\mathbf{X}) \leq 0] \rightarrow \beta_j(\mathbf{x}_d) \cong -\Phi^{-1}(Pf_j(\mathbf{x}_d)) \quad (6)$$

Las probabilidades de falla Pf_j , expresadas por los índices de confiabilidad β_j , se obtienen para distintas combinaciones de los parámetros de diseño \mathbf{x}_d , y dichos resultados discretos también se representan por medio de redes neuronales. Estas cumplen la función de hacer eficiente la comprobación de los requerimientos de confiabilidad, cada vez que los parámetros de diseño son cambiados durante el proceso de optimización.

2.6 Proceso de optimización

El procedimiento numérico propuesto (Möller et al., 2010), dentro de un dominio de \mathbf{x}_d en una iteración global, se puede resumir en los siguientes pasos, los cuales se representan esquemáticamente en la Figura 2.

a) La búsqueda comienza desde un punto inicial, o primer “punto de anclaje” \mathbf{x}_{d0} , que es el resultado del diseño preliminar de la estructura. Se evalúan los correspondientes índices de confiabilidad utilizando las redes neuronales $\beta_j(\mathbf{x}_{d0})$ y el costo con ec.(1).

b) Si el resultado del diseño preliminar \mathbf{x}_{d0} no cumple con las restricciones de

confiabilidad ec.(2), se sigue con los pasos c), d) o e), y la primera combinación que las satisfaga, se toma como primer punto de anclaje.

c) Se seleccionan n combinaciones de \mathbf{x}_d en las proximidades de \mathbf{x}_{d0} , eligiendo aleatoriamente un valor para cada uno de los parámetros de diseño, x_{di} , dentro de un entorno $x_{d0i} \pm r_1 x_{d0i}$. Para cada una de las n combinaciones se verifica que se satisfagan las restricciones de confiabilidad, si no se reemplaza por otra combinación, y se evalúa el costo. Si el costo mínimo entre las n combinaciones es menor al del anclaje, la correspondiente combinación pasa a ser el nuevo punto de anclaje y el proceso se reinicia. En este trabajo se utilizó $n = 50$.

d) Si entre las n combinaciones no se encuentra alguna con costo menor al del punto de anclaje, se densifica la búsqueda seleccionando más combinaciones dentro del entorno de búsqueda $x_{d0i} \pm r_1 x_{d0i}$, hasta que se obtenga la primera con costo menor al del anclaje. Esta densificación tiene un límite de 500 combinaciones para este trabajo.

e) Si todavía no se encuentra alguna combinación que tenga un costo menor al del anclaje, se amplía el radio de búsqueda a $r_2 = r_1 + \Delta r$. Se seleccionan m combinaciones de \mathbf{x}_d en el volumen agregado, manteniendo la misma densidad anterior, y que cumplan las restricciones de confiabilidad. La primera de las m combinaciones, con un máximo de 800, que tenga un costo menor al del anclaje es retenida y utilizada como el nuevo anclaje. Esta ampliación del límite de búsqueda se repite tres veces en este trabajo y tiene por objetivo reducir la posibilidad de encontrar un mínimo local.

f) El proceso finaliza cuando ya no se encuentre una combinación de los parámetros de diseño con costo menor al del anclaje.

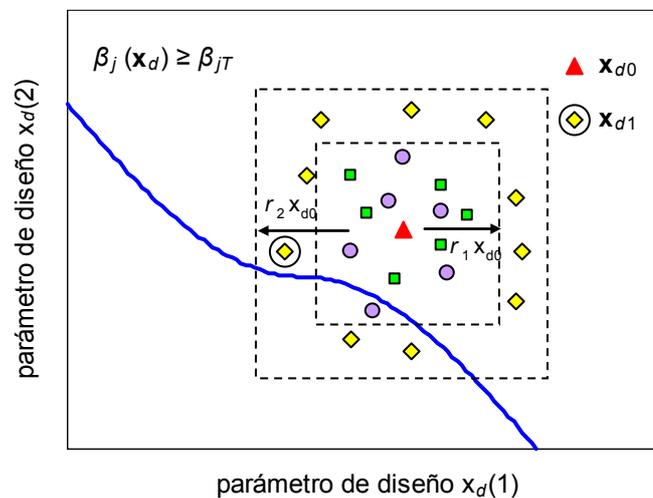


Figura 2: Esquema del proceso de optimización

3 APLICACIÓN 1: ESTRUCTURA SIN CONTROL DE VIBRACIONES

3.1 Datos de la estructura y variables aleatorias

Se analiza la optimización de un pórtico de un vano y dos pisos solicitado por cargas permanentes y acción sísmica, cuya geometría se presenta en la Figura 3.

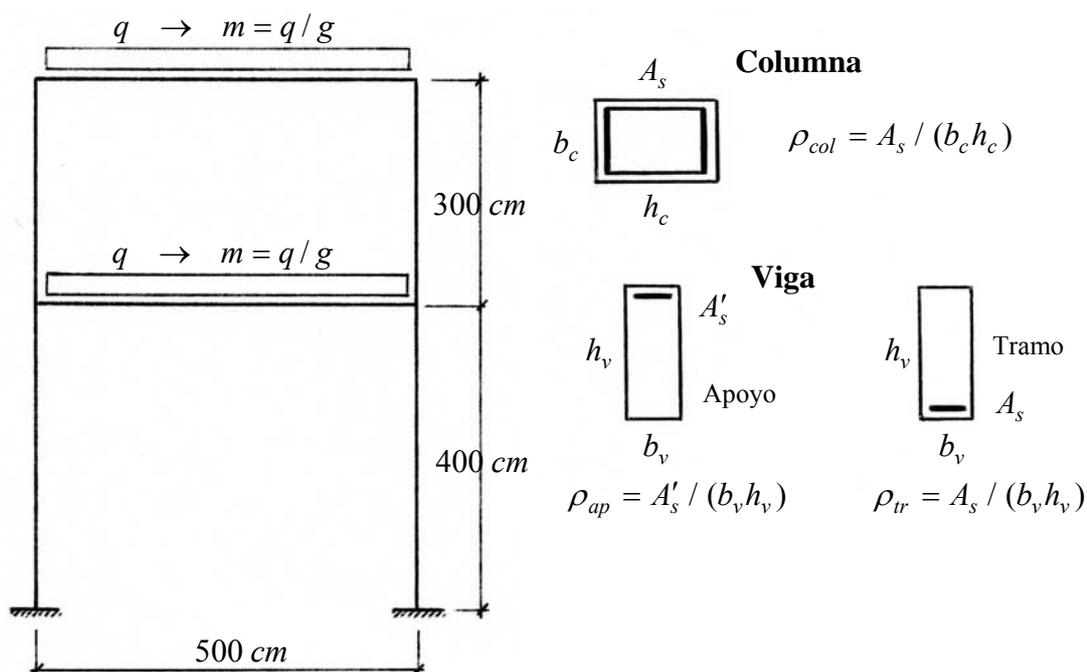


Figura 3: Geometría del pórtico

Las variables consideradas para calcular las respuestas discretas, con sus límites mínimo y máximo, se presentan en la Tabla 1

Variable	Límite inferior	Límite superior	Definición
$X(1) = m \text{ (KN s}^2 / \text{cm}^2\text{)}$	2.04×10^{-4}	6.12×10^{-4}	Masa por unidad de longitud en vigas
$X(2) = b_v \text{ (cm)}$	15	30	Ancho de la sección de vigas
$X(3) = h_v \text{ (cm)}$	30	70	Altura de la sección de vigas
$X(4) = b_c \text{ (cm)}$	20	40	Ancho de la sección de columnas
$X(5) = h_c \text{ (cm)}$	30	100	Altura de la sección de columnas
$X(6) = \rho_{tr}$	0.00298	0.01389	Cuantía de armadura de tramo en vigas
$X(7) = \rho_{ap}$	0.00298	0.01389	Cuantía de armadura de apoyo en vigas
$X(8) = \rho_{col}$	0.008	0.04286	Cuantía de armadura en columnas
$X(9) = f_r / f'_{c0}$	0	0.15	Presión de confinamiento normalizada
$X(10) = a_G \text{ (cm / s}^2\text{)}$	25	1200	Aceleración pico del suelo
$X(11) = f_g \text{ (Hz)}$	2	3	Frecuencia central del suelo

Tabla 1: Límites de las variables.

Para la acción sísmica se utiliza la sismicidad de la ciudad de Mendoza, Argentina. Se consideran variables la aceleración pico del suelo a_G y la frecuencia central del filtro del suelo f_g . Otras variables para la generación de los acelerogramas son funciones de a_G y f_g , ó se

adoptan valores constantes.

3.2 Respuesta estructural y aproximación

Dentro del dominio donde se desarrolla el proceso de optimización y aplicando la técnica de diseño de experimentos, se generan $NP = 450$ combinaciones de las variables, cantidad que permite una aceptable densidad en todo el dominio y que las redes neuronales puedan tener un máximo de 25 neuronas en la capa intermedia que asegura buena precisión (Möller et al., 2010). Las variables cumplen con restricciones de cuantía máxima y mínima, relación entre armadura superior e inferior en las secciones de vigas, además de proveer una resistencia adecuada para las cargas gravitacionales sobre la viga.

Para cada combinación se generan $NS = 10$ sub-combinaciones teniendo en cuenta las siguientes variables aleatorias secundarias: (a) El conjunto de ángulos de fase aleatorios para generar un acelerograma (Möller, 2001; Shinozuka, 1967), luego escalado a la aceleración pico a_G incluida en esa combinación particular; (b) La resistencia del hormigón y del acero que generan variabilidad en los parámetros de las relaciones momento - curvatura de las secciones de la viga y columnas, ver Möller et al. (2006).

Se realizan los análisis dinámicos no lineales con el modelo de elementos de barra descripto en la sección 2.3, obteniéndose la distorsión máxima de piso $DIST$ como parámetro de respuesta. Así, para cada combinación y sus sub-combinaciones, se obtiene R_{kj} , $j = 1, NP$, $k = 1, NS$ y se calculan los valores medios y desvíos estándar con

$$\bar{R}_j = \frac{1}{NS} \sum_{k=1}^{NS} R_{kj} \quad \sigma_{R_j} = \sqrt{\frac{1}{NS-1} \sum_{k=1}^{NS} (R_{kj} - \bar{R}_j)^2} \quad (7)$$

Con estos resultados se ensamblan dos bases de datos para la respuesta $DIST$, que son usadas para entrenar dos redes neuronales: una para el valor medio y otra para el desvío estándar de la respuesta sobre las sub-combinaciones. La aproximación de $F(\mathbf{X})$ a $R(\mathbf{X})$ nunca es perfecta, existiendo una dispersión que se cuantifica con el desvío estándar del error relativo, que es un coeficiente de variación promedio, dado por:

$$\sigma_{\varepsilon_r} = \sqrt{\frac{1}{NP-1} \sum_{k=1}^{NP} \left(\frac{Y_k - T_k}{Y_k} \right)^2} \quad (8)$$

donde Y_k es el valor calculado con la red neuronal, T_k es el valor obtenido con análisis dinámico no lineal y NP el número de combinaciones en la base de datos. Luego el valor medio y el desvío estándar de la respuesta $DIST(\mathbf{X})$ del pórtico se puede escribir con

$$\bar{F}_i = \bar{Y}_i (1. + \sigma_{\varepsilon_m} X_{N_1}) \quad \sigma_{F_i} = \sigma_{Y_i} (1. + \sigma_{\varepsilon\sigma} X_{N_2}) \quad (9)$$

donde \bar{Y}_i , σ_{Y_i} son el valor medio y desvío estándar de la respuesta i : $DIST(\mathbf{X})$ calculado con la red neuronal correspondiente, y X_{N_1} , X_{N_2} son variables Normales estándar.

Finalmente la distorsión de piso máxima $DIST(\mathbf{X})$, considerando una distribución lognormal, resulta

$$DIST(\mathbf{X}) \cong F(\mathbf{X}) = \frac{\bar{F}(\mathbf{X})}{\sqrt{1. + \left(\frac{\sigma_F(\mathbf{X})}{\bar{F}(\mathbf{X})} \right)^2}} \exp \left[R_{N_1} \sqrt{\ln \left(1. + \left(\frac{\sigma_F(\mathbf{X})}{\bar{F}(\mathbf{X})} \right)^2 \right)} \right] \quad (10)$$

3.3 Estimación de la confiabilidad

Las funciones de falla o estados límites, ec.(5), considerados para los niveles de desempeño operacional y seguridad de vidas, se describen en las ecs.(11) y (12). Se considera un coeficiente de variación $COV = 0.10$ en la distorsión de piso $DIST(\mathbf{X})$ con distribución normal, introduciendo otra variable Normal estándar X_{N3} para tener en cuenta la incertidumbre de modelo.

$$\text{- Operacional} \quad G_1(\mathbf{X}) = 0.005 - DIST(\mathbf{X}) \left[1 + COV X_{N3} \right] \quad (11)$$

$$\text{- Seguridad de vidas} \quad G_2(\mathbf{X}) = 0.020 - DIST(\mathbf{X}) \left[1 + COV X_{N3} \right] \quad (12)$$

Los tipos de distribución y estadística de todas las variables consideradas se presentan en la Tabla 2, donde el signo ? corresponde a los parámetros de diseño a optimizar, que son los valores medios de la altura de las secciones de vigas y columnas, y las cuantías de armadura longitudinal. La variable $X(1)$, masa por unidad de longitud, tiene unidades: $KN s^2 / cm^2$.

Se utilizan distribuciones normales para aquellas variables con iguales probabilidades de obtener valores por arriba y por debajo de la media. Para las armaduras se elige distribución lognormal, que tiene más probabilidad acumulada para valores mayores a la media, por la tendencia habitual de redondear hacia arriba la sección de acero necesaria cuando se eligen cantidad de barras y diámetros comerciales. Para la aceleración pico del suelo la distribución lognormal ajusta los datos derivados de la sismicidad de la ciudad de Mendoza.

Variable	\bar{X}	σ_X	Tipo	Variable	\bar{X}	σ_X	Tipo
$X(1) = m$	4.0×10^{-4}	4.0×10^{-5}	Normal	$X(10) = \bar{a}_G$	94 cm/s^2	130 cm/s^2	Lognormal
$X(2) = b_v$	20 cm	1 cm	Normal	$X(11) = f_g$	2.50 Hz	0.375 Hz	Normal
$X(3) = h_v$? cm	$0.05 \bar{X}$	Normal	$X(12) = \sigma_{\bar{a}_G}$	0	0.25	Normal
$X(4) = b_c$	30 cm	1.5 cm	Normal	$X(13) = a_G$	$X(13) = X(10) [1.0 + X(12)]$		
$X(5) = h_c$? cm	$0.05 \bar{X}$	Normal	$X(14) = R_{N1}$	0	1	Normal
$X(6) = \rho_{tr}$?	$0.10 \bar{X}$	Lognormal	$X(15) = X_{N1}$	0	1	Normal
$X(7) = \rho_{ap}$?	$0.10 \bar{X}$	Lognormal	$X(16) = X_{N2}$	0	1	Normal
$X(8) = \rho_{col}$?	$0.10 \bar{X}$	Lognormal	$X(17) = X_{N3}$	0	1	Normal
$X(9) = f_r / f'_{c0}$	0.10	0.01	Normal				

Tabla 2: Estadística de las variables aleatorias

Dentro del dominio donde se desarrolla el proceso de optimización y aplicando nuevamente la técnica de diseño de experimentos, se seleccionan MC combinaciones de los parámetros de diseño. La cantidad de combinaciones se establece de manera que las redes neuronales que aproximan los índices de confiabilidad puedan tener un máximo de 20 neuronas en la capa intermedia que asegura buena precisión, resultando $MC = 180$. Este número máximo de neuronas es menor que el utilizado para las redes que aproximan la respuesta estructural, 25, porque la cantidad de datos de entrada son los 5 parámetros de diseño, menor que las 11 variables para las redes de respuesta estructural.

Para cada combinación se calculan las probabilidades de falla, o índice de confiabilidad en cada nivel de desempeño, con ec.(6), utilizando el método de Monte Carlo. El tamaño de la simulación es variable, depende del valor de la Pf en cada caso y de la confianza que se requiera, medida con el coeficiente de variación de Pf . Se adopta $COV Pf = 0.05$. La gran cantidad de simulaciones en cada combinación, del orden de 800000, se realizan con tiempos de cómputos razonables debido a la utilización de las redes neuronales que aproximan la respuesta no lineal del pórtico.

Así, se obtienen las bases de datos y resultados de los índices de confiabilidad $\beta_1(\mathbf{x}_d)$, $\beta_2(\mathbf{x}_d)$, con las cuales se entrenan otras dos redes neuronales. Estas redes neuronales se utilizan en el proceso de optimización descrito en la sección 2.6 para verificar si se cumplen las restricciones de confiabilidad.

Los valores mínimos de los índices de confiabilidad, restricciones del proceso de optimización, se presentan en la Tabla 3. Considerando la ocurrencia de terremotos como un proceso de Poisson, con frecuencia media $\nu = 0.20$ para la ciudad de Mendoza, para magnitudes de interés $M \geq 5$, se calcula la probabilidad de falla anual como

$$Pf_{anual} = 1. - \exp[-\nu t_L Pf_E] \rightarrow \beta_{anual} \cong -\Phi^{-1}(Pf_{anual}) \quad (13)$$

donde Pf_E es la probabilidad de falla si ocurre un evento sísmico y $t_L = 1$ año. Pf_E y Pf_{anual} pueden ser expresados en términos de sus correspondientes índices de confiabilidad β .

Nivel de desempeño	Pf_{anual}	$\beta_{j_{anual}}$	Pf_E	β_{j_T}
Operacional	1×10^{-2}	2.33	0.5025×10^{-1}	1.65
Seguridad de vidas	1×10^{-3}	3.09	0.5003×10^{-2}	2.60

Tabla 3: Índices de confiabilidad mínimos

3.4 Función objetivo a minimizar

Como se expresó en la ec.(1), el costo total a minimizar $C(\mathbf{x}_d)$ es la suma del costo inicial de construcción $C_0(\mathbf{x}_d)$ más el costo de reparación por daños $C_d(\mathbf{x}_d)$ debido a la ocurrencia de terremotos durante la vida útil de la estructura.

▪ Costo inicial

El precio del hormigón incluye materiales, encofrado y mano de obra para la colocación, se estima en $CUH = 2200$ $\$/m^3$. Para el acero, incluyendo material y mano de obra para la colocación, se estima en $CUA = 8$ $\$/Kg$. El volumen de hormigón y el peso de la armadura son función de los parámetros de diseño, resultando el costo inicial del pórtico

$$C_0(\mathbf{x}_d) = [V_{viga}(\mathbf{x}_d) + V_{col}(\mathbf{x}_d)] CUH + [P_{s,viga}(\mathbf{x}_d) + P_{s,col}(\mathbf{x}_d)] CUA \quad (14)$$

▪ Costo por daños

El costo futuro de reparación, a valores actuales, depende del nivel de daño causado por los terremotos, la incertidumbre del tiempo en el cual ocurre y la cantidad de terremotos dentro de la vida útil de la estructura T_D , y del interés acumulado desde el momento de la construcción hasta la ocurrencia de los daños.

Se utiliza la distorsión máxima de piso $DIST$ como un indicador del perjuicio causado en la estructura. Siendo $C_f(DIST)$ el costo función de ese daño que ocurre en el tiempo t , $C_{f0}(DIST)$

el costo llevado al tiempo de construcción, r la tasa de interés, resulta

$$C_{f0}(DIST) = C_f(DIST) \exp(-rt) \quad (15)$$

El valor esperado de $C_{f0}(DIST)$ puede ser calculado luego que la función de densidad de probabilidades es conocida para el tiempo t , para lo cual se adopta un proceso de Poisson para el arribo de terremotos con frecuencia media v . Luego de desarrollos algebraicos (Möller et al., 2010), se obtiene

$$C_d|_{DIST} = \sum_{n=1}^{\infty} C_f(DIST) v \sum_{i=0}^{n-1} \left[\frac{v^i}{i!} \int_0^{T_D} t^i \exp(-(r+v)t) dt \right] \frac{(vT_D)^n}{n!} \exp(-vT_D) \quad (16)$$

siendo n el número de eventos en T_D . En general, el costo aumenta cuando n aumenta, pero la probabilidad de ocurrencia de n eventos en T_D disminuye más rápidamente, resultando que en la ec.(16) tiende a un valor finito. En este trabajo se trunca la sumatoria cuando la contribución relativa del término n es menor que 0.001.

La relación entre la distorsión de piso y el costo de reparación se supone como

$$\begin{aligned} C_f(DIST) &= 0 && \text{para } DIST \leq 0.003 \\ C_f(DIST) &= \alpha C_0 \left(\frac{DIST - 0.003}{0.025 - 0.003} \right)^b && \text{para } 0.003 < DIST \leq 0.025 \\ C_f(DIST) &= \alpha C_0 && \text{para } DIST > 0.025 \end{aligned} \quad (17)$$

en la cual C_0 es el costo de reemplazo completo de la estructura, con un porcentaje adicional $\alpha = 1.20$ por demolición y limpieza. En la ec.(17) se asume que no hay daño para $DIST$ menor a 0.003 y reemplazo completo cuando $DIST$ excede 0.025. Para valores intermedios, el costo es función del daño a través del exponente b , que en este trabajo se adoptó $b = 1$. Otros costos como seguros, interrupción de servicio, etc., deberían ser tenidos en cuenta pero no fueron considerados en este ejemplo.

Finalmente el costo de reparación por daños resulta

$$C_d(\mathbf{x}_d) = \int_0^{\infty} C_d|_{DIST} f_{DIST}(DIST) d(DIST) \quad (18)$$

utilizando la función de densidad de probabilidades de la distorsión de piso f_{DIST} . Se utiliza una distribución lognormal con valor medio y desvío estándar calculados utilizando 1000 simulaciones para cada \mathbf{x}_d , con las redes neuronales ya entrenadas para $DIST$.

3.5 Resultados y discusión

Los resultados del proceso de optimización se presentan en la Tabla 4. Se indican los valores de los parámetros de diseño, los índices de confiabilidad y los costos, para el diseño inicial y dos procesos de optimización con diferente selección aleatoria inicial de las combinaciones de las variables.

El diseño preliminar, o inicial, tiene índices de confiabilidad $\beta_1 = 1.85$ y $\beta_2 = 3.15$, bastante cercano a los valores objetivos $\beta_{1T} = 1.65$ y $\beta_{2T} = 2.65$. Luego, el costo mínimo solo resulta aproximadamente un 20% menor que el valor del diseño inicial.

La comparación entre los dos resultados obtenidos muestra un costo mínimo final igual, significando que diferentes semillas para realizar las simulaciones conducen al mismo

mínimo, es decir, el procedimiento es consistente.

Sin embargo, los valores óptimos de los parámetros de diseño son diferentes. En la primera simulación las secciones de hormigón son mayores y las cuantías de armadura menores que en la segunda simulación. Este resultado es esperable, ya que la cantidad de parámetros a optimizar es mayor que las restricciones a cumplir, pero tiene la ventaja de brindar al proyectista la posibilidad de elegir la solución más conveniente.

Parámetro de diseño	INICIAL	OPT 01	OPT 02
$x_d(1) = \bar{X}(3) = h_v$ [cm]	60.0	60.9	57.0
$x_d(2) = \bar{X}(5) = h_c$ [cm]	65.0	63.1	57.7
$x_d(3) = \bar{X}(6) = \rho_{tr}$	0.0070	0.00900	0.00734
$x_d(4) = \bar{X}(7) = \rho_{ap}$	0.0110	0.00632	0.01280
$x_d(5) = \bar{X}(8) = \rho_{col}$	0.0220	0.00902	0.01530
$\beta_1(\mathbf{x}_d)$	1.848	1.651	1.667
$\beta_2(\mathbf{x}_d)$	3.148	2.614	2.782
$C_0(\mathbf{x}_d)$ [\$]	15475	12986	13071
$C_d(\mathbf{x}_d)$ [\$]	362	687	612
$C(\mathbf{x}_d)$ [\$]	15837	13673	13683

Tabla 4: Resultados de la optimización del pórtico sin control de vibraciones

El procesamiento completo, es decir todos los pasos indicados en la Figura 1, se realizó en un tiempo de 10hs 22min en una PC con procesador Intel core i7.

4 APLICACIÓN 2: ESTRUCTURA CON CONTROL DE VIBRACIONES

4.1 Datos de la estructura y variables aleatorias

Se analiza ahora la optimización de un pórtico de un vano y dos pisos solicitado por cargas permanentes y acción sísmica, que incluye dispositivos de disipación de energía por fluencia de metal y los correspondientes brazos de instalación, como se muestra en la Figura 4. El disipador está formado por un conjunto de chapas paralelas de pequeña dimensión y dispuestas perpendiculares al plano del pórtico. La forma triangular de las chapas es adecuada para lograr una prematura e integral entrada en fluencia. Se logra así que el sistema de los disipadores y brazos de instalación, inicialmente más rígido que el pórtico, disipe energía mientras éste responde en el campo elástico. El daño se concentra en los disipadores, que son dispositivos reemplazables.

Las variables consideradas para calcular las respuestas discretas, con sus límites mínimo y máximo, se presentan en la Tabla 5. Con relación al ejemplo de la estructura sin control, se agregan las variables 12 y 13 que corresponden al número de chapas y altura de las chapas en cada disipador. La acción sísmica actuante sobre esta estructura con control es la misma que en la Aplicación 1.

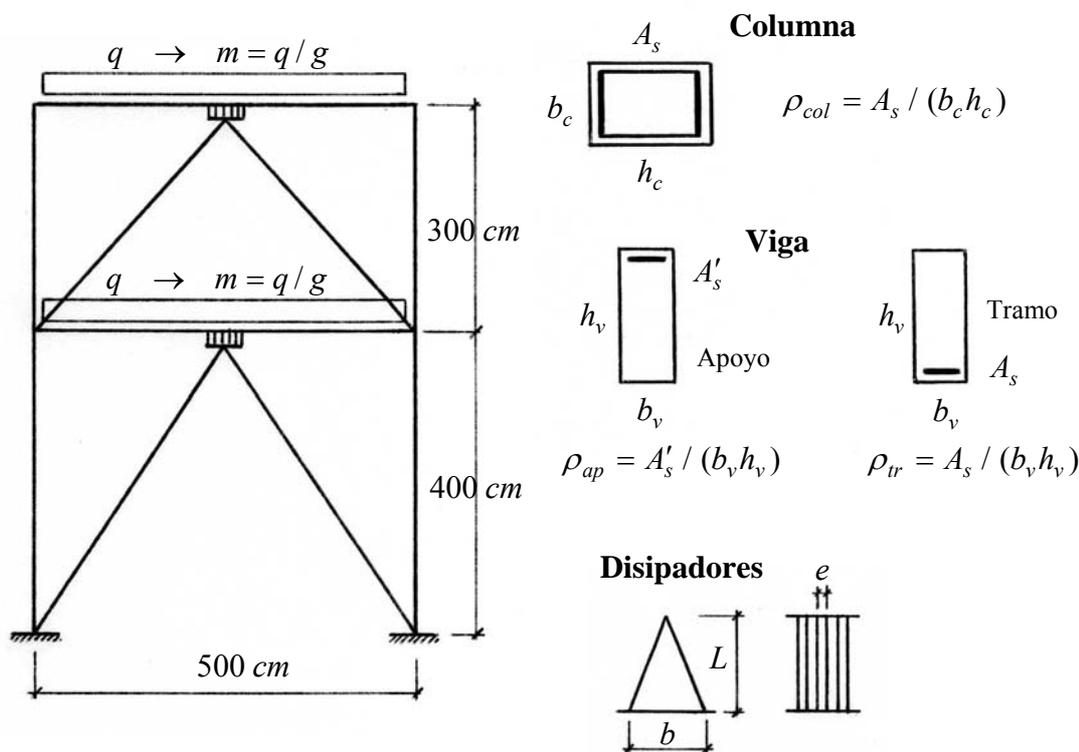


Figura 4: Geometría del pórtico con los dispositivos de disipación de energía

Variable	Límite inferior	Límite superior	Definición
$X(1) = m \text{ (KN s}^2 / \text{cm}^2\text{)}$	2.04×10^{-4}	6.12×10^{-4}	Masa por unidad de longitud en vigas
$X(2) = b_v \text{ (cm)}$	15	30	Ancho de la sección de vigas
$X(3) = h_v \text{ (cm)}$	30	70	Altura de la sección de vigas
$X(4) = b_c \text{ (cm)}$	20	40	Ancho de la sección de columnas
$X(5) = h_c \text{ (cm)}$	30	100	Altura de la sección de columnas
$X(6) = \rho_{tr}$	0.00298	0.01389	Cuantía de armadura de tramo en vigas
$X(7) = \rho_{ap}$	0.00298	0.01389	Cuantía de armadura de apoyo en vigas
$X(8) = \rho_{col}$	0.008	0.04286	Cuantía de armadura en columnas
$X(9) = f_r / f_{c0}$	0	0.15	Presión de confinamiento normalizada
$X(10) = a_G \text{ (cm / s}^2\text{)}$	25	1200	Aceleración pico del suelo
$X(11) = f_g \text{ (Hz)}$	2	3	Frecuencia central del suelo
$X(12) = NCH$	1	10	Número de chapas en cada disipador
$X(13) = L \text{ (cm)}$	15	40	Altura de las chapas del disipador

Tabla 5: Límites de las variables.

4.2 Respuesta estructural y aproximación

Dado que la cantidad de variables es un poco mayor que en la aplicación 1, ahora se utilizan $NP = 480$ combinaciones de las variables, para poder tener un máximo de 25 neuronas en la capa intermedia de las redes neuronales que aproximan la respuesta estructural. También en este caso las variables cumplen con restricciones de cuantía máxima y mínima, relación entre armadura superior e inferior en las secciones de vigas, además de proveer una resistencia adecuada para las cargas gravitacionales sobre la viga.

En forma similar a la aplicación 1 se generan $NS = 10$ sub-combinaciones para considerar las variables aleatorias secundarias. Se realizan los análisis dinámicos no lineales con el modelo de elementos de barra descrito en la sección 2.3, obteniéndose como respuestas la distorsión máxima de piso $DIST$ y el desplazamiento relativo máximo del dissipador $DERD$. Así, para cada combinación y sus sub-combinaciones, se obtiene $R_{kj}, j = 1, NP, k = 1, NS$ y se calculan los valores medios y desvíos estándar con ec(7).

Luego se entrenan las redes neuronales para aproximar el valor medio y el desvío estándar, y se aplican las ec.(8), (9) y (10) para representar la distribución de $DIST(\mathbf{X})$ y $DERD(\mathbf{X})$.

4.3 Estimación de la confiabilidad

Las funciones de falla para la estructura con control son

$$\text{- Completamente Operacional } G_1(\mathbf{X}) = [\Delta_{flu}(\mathbf{X}) - DERD(\mathbf{X})] [1 + COV X_{N_3}] \quad (19)$$

$$\text{- Operacional } G_2(\mathbf{X}) = 0.005 - DIST(\mathbf{X}) [1 + COV X_{N_3}] \quad (20)$$

$$\text{- Seguridad de vidas } G_3(\mathbf{X}) = 0.020 - DIST(\mathbf{X}) [1 + COV X_{N_3}] \quad (21)$$

La función de estado límite, o función de falla G_1 , indica que el desplazamiento relativo máximo del dissipador no exceda el desplazamiento de fluencia Δ_{flu} , para que el dissipador no deba ser reemplazado después de un terremoto, en el nivel de desempeño denominado “completamente operacional”, que significa que luego del terremoto la construcción permanece en operaciones sin necesidad de realizar intervenciones. El desplazamiento de fluencia se calcula con

$$\Delta_{flu} = \frac{\varepsilon_y}{e} (X(13))^2 \quad (22)$$

donde $\varepsilon_y = 0.00114$ es la deformación de fluencia del acero de la chapa, $e = 2.54 \text{ cm}$ el espesor de la chapa, ambas consideradas variables determinísticas.

Los tipos de distribución y estadística de todas las variables consideradas se presentan en la Tabla 6, donde el signo ? corresponde a los parámetros de diseño a optimizar, que son los valores medios de la altura de las secciones de vigas y columnas, las cuantías de armadura longitudinal, el número de chapas y la altura de los dissipadores.

Para diferentes combinaciones de los valores de los parámetros de diseño, $MC = 230$ en esta aplicación, se calculan las probabilidades de falla, o índice de confiabilidad en cada nivel de desempeño, con ec.(6), utilizando el método de Monte Carlo. Así, se obtienen las bases de datos y resultados de los índices de confiabilidad $\beta_1(\mathbf{x}_d)$, $\beta_2(\mathbf{x}_d)$ y $\beta_3(\mathbf{x}_d)$, con las cuales se entrenan otras tres redes neuronales. Estas redes neuronales se utilizan en el proceso de optimización descrito en la sección 2.6 para verificar si se cumplen las restricciones de confiabilidad.

Variable	\bar{X}	σ_X	Tipo	Variable	\bar{X}	σ_X	Tipo
$X(1) = m$	4.0×10^{-4}	4.0×10^{-5}	Normal	$X(11) = f_g$	2.50 Hz	0.375 Hz	Normal
$X(2) = b_v$	20 cm	1 cm	Normal	$X(12) = NCH$?	0	Normal
$X(3) = h_v$? cm	$0.05 \bar{X}$	Normal	$X(13) = L$? cm	$0.10 \bar{X}$	Normal
$X(4) = b_c$	30 cm	1.5 cm	Normal	$X(14) = \sigma_{\bar{a}_G}$	0	0.25	Normal
$X(5) = h_c$? cm	$0.05 \bar{X}$	Normal	$X(15) = a_G$	$X(15) = X(10) [1.0 + X(14)]$		
$X(6) = \rho_{tr}$?	$0.10 \bar{X}$	Lognormal	$X(16) = R_{N1}$	0	1	Normal
$X(7) = \rho_{ap}$?	$0.10 \bar{X}$	Lognormal	$X(17) = X_{N1}$	0	1	Normal
$X(8) = \rho_{col}$?	$0.10 \bar{X}$	Lognormal	$X(18) = X_{N2}$	0	1	Normal
$X(9) = f_r / f'_{c0}$	0.10	0.01	Normal	$X(19) = X_{N3}$	0	1	Normal
$X(10) = \bar{a}_G$	94 cm/s^2	130 cm/s^2	Lognormal				

Tabla 6: Estadística de las variables aleatorias

Los valores mínimos de los índices de confiabilidad se presentan en la Tabla 7. Se analizan varias alternativas para el índice de confiabilidad requerido a los disipadores, desde el mismo valor objetivo que para el nivel de desempeño “operacional” del pórtico, hasta $Pf_E = 1.00$, es decir cada vez que hay un evento sísmico hay que cambiar los disipadores.

Nivel de desempeño	Pf_{anual}	$\beta_{j_{anual}}$	Pf_E	β_{j_T}
Completamente operacional	1×10^{-2}	2.33	0.5025×10^{-1}	1.65
	2×10^{-2}	2.05	0.10101	1.28
	9.52×10^{-2}	1.31	0.50	0.00
	1.81×10^{-1}	0.91	1.00	$-\infty$
Operacional	1×10^{-2}	2.33	0.5025×10^{-1}	1.65
Seguridad de vidas	1×10^{-3}	3.09	0.5003×10^{-2}	2.60

Tabla 7: Índices de confiabilidad mínimos

4.4 Función objetivo a minimizar

En este ejemplo, el costo total a minimizar $C(\mathbf{x}_d)$ es la suma del costo inicial de construcción $C_0(\mathbf{x}_d)$, que incluye el costo del pórtico y los disipadores con sus brazos de instalación, más el costo de reparación por daños $C_d(\mathbf{x}_d)$, que incluye la reparación del pórtico y el reemplazo de los disipadores cuando se supere el desplazamiento de fluencia, debido a la ocurrencia de terremotos durante la vida útil de la estructura.

▪ Costo inicial

Para evaluar el costo inicial del pórtico $C_{0por}(\mathbf{x}_d)$ el precio del hormigón, que incluye materiales, encofrado y mano de obra para la colocación, se estima en $CUH = 2200 \text{ \$/m}^3$. El volumen de hormigón y el peso de la armadura son función de los parámetros de diseño. Para

la armadura, con material y mano de obra para la colocación, se estima en $CUA = 8 \text{ \$/Kg}$.

El costo de los brazos de instalación se estima en $C_{0brins} = 30000 \text{ \$}$ independiente de las dimensiones de las secciones del pórtico y disipadores. El costo de los disipadores $C_{0dis}(\mathbf{x}_d)$ se calcula en función del peso, que depende del número de chapas y altura, a $150 \text{ \$/Kg}$ que incluye el material, la fabricación y el montaje.

Luego resulta

$$C_0(\mathbf{x}_d) = C_{0por}(\mathbf{x}_d) + C_{0brins} + C_{0dis}(\mathbf{x}_d) \quad (23)$$

▪ Costo por daños

El costo esperado por daños tiene ahora dos componentes: el daño en el pórtico de hormigón armado función de la distorsión máxima de piso $DIST(\mathbf{X})$, y el daño en los disipadores función del desplazamiento relativo máximo en los disipadores $DERD(\mathbf{X})$.

Para el costo por daños en el pórtico son válidas las ecuaciones (15), (16) y (17). Para el costo por reemplazo de los disipadores se aplican las expresiones (15) y (16) pero ahora en función de $DERD$, mientras que la relación entre el desplazamiento relativo del disipador y el costo de reparación se supone como

$$\begin{aligned} C_f(DERD) &= 0 && \text{para } DERD \leq \Delta_{flu} \\ C_f(DERD) &= C_{0dis} && \text{para } DERD > \Delta_{flu} \end{aligned} \quad (24)$$

en la cual C_{0dis} es el costo de reemplazo completo de los disipadores supuesto igual al costo inicial. Si el desplazamiento relativo máximo de los disipadores es menor que el desplazamiento de fluencia, entonces el costo es nulo porque no hay daño.

Finalmente el costo esperado de reparación por daños resulta

$$C_d(\mathbf{x}_d) = \int_0^{\infty} C_d|_{DIST} f_{DIST}(DIST) d(DIST) + \int_0^{\infty} C_d|_{DERD} f_{DERD}(DERD) d(DERD) \quad (25)$$

En la ec.(25) se utilizan las funciones de densidad de probabilidades de la distorsión de piso f_{DIST} y del desplazamiento relativo de los disipadores f_{DERD} . En ambos casos se adopta una distribución lognormal con valor medio y desvío estándar calculado utilizando 1000 simulaciones para el correspondiente \mathbf{x}_d , con las redes neuronales ya entrenadas para $DIST(\mathbf{X})$ y $DERD(\mathbf{X})$.

4.5 Resultados y discusión

Los resultados de los procesos de optimización se presentan en la Tabla 8. El procesamiento completo, es decir todos los pasos indicados en la Figura 1, se realizó en un tiempo de 23hs 55min en una PC con procesador Intel core i7.

OPT 11: La confiabilidad requerida de exceder la fluencia de los disipadores es la misma que para la distorsión de piso del pórtico en el nivel de desempeño "Operacional", resultando 8 chapas de 15.2 cm altura, muy cerca de la altura mínima de 15 cm. El resultado es coherente porque menor altura implica menor desplazamiento de fluencia, mayor cantidad de chapas mayor resistencia, con lo cual se logra mayor rigidez y control sobre la distorsión de piso. Se combina con dimensiones de secciones de hormigón y cuantías de armadura menores al caso sin control presentado en la sección 3. Comparando los índices de confiabilidad de la solución óptima con los objetivos, $\beta_1(\mathbf{x}_d)$ es el que gobierna el proceso, llegando a 1.70 muy próximo al 1.65 exigido como mínimo. Los resultados para $\beta_2(\mathbf{x}_d)$ y $\beta_3(\mathbf{x}_d)$ están bastante por encima de

los mínimos requeridos, y en consecuencia el costo de reparación del pórtico es nulo, satisfaciendo el fundamento del uso de disipadores.

Parámetro de diseño	INICIAL	OPT 11 $\beta_{1T} = 1.65$	OPT 12 $\beta_{1T} = 1.28$	OPT 13 $\beta_{1T} = 0$	OPT 14 $\beta_{1T} = -\infty$
$x_d(1) = \bar{X}(3) = h_v$ [cm]	60.0	51.8	38.2	38.2	38.2
$x_d(2) = \bar{X}(5) = h_c$ [cm]	80.0	42.3	35.9	35.7	35.7
$x_d(3) = \bar{X}(6) = \rho_{tr}$	0.0090	0.0043	0.0070	0.0108	0.0108
$x_d(4) = \bar{X}(7) = \rho_{ap}$	0.0120	0.0055	0.0123	0.0066	0.0066
$x_d(5) = \bar{X}(8) = \rho_{col}$	0.0200	0.0084	0.0098	0.0172	0.0172
$x_d(6) = \bar{X}(12) = NCH$	5	8	6	2	2
$x_d(7) = \bar{X}(13) = L$	25.0	15.2	15.3	15.3	15.3
$\beta_1(\mathbf{x}_d)$	1.461	1.704	1.293	0.399	0.399
$\beta_2(\mathbf{x}_d)$	3.029	3.343	2.917	2.33	2.33
$\beta_3(\mathbf{x}_d)$	4.534	4.903	4.409	3.50	3.50
$C_0(\mathbf{x}_d)$ pórtico [\$]	17862	9040	7770	8468	8468
C_0 brazos instalación [\$]	30000	30000	30000	30000	30000
$C_0(\mathbf{x}_d)$ disipadores [\$]	7500	7282	5494	1837	1837
$C_d(\mathbf{x}_d)$ pórtico [\$]	0	0	17	543	543
$C_d(\mathbf{x}_d)$ disipadores [\$]	1895	2148	3083	3420	3420
$C(\mathbf{x}_d)$ [\$]	57257	48470	46364	44268	44268

Tabla 8: Resultados de la optimización del pórtico con control de vibraciones

OPT 12: El proceso de optimización con $\beta_{1T} = 1.28$ resulta en dimensiones de hormigón menores al OPT 11 y mayores cuantías de armaduras, con un costo inicial del pórtico 16% menor. En la solución óptima los disipadores son de 6 chapas y 15.3 cm de altura, también muy próxima a la altura mínima de 15 cm. El índice de confiabilidad $\beta_1(\mathbf{x}_d) = 1.29$ está justo sobre el mínimo de 1.28, mientras que los que corresponden a las distorsiones de piso están bastante por arriba de los límites, indicando que los disipadores controlan la optimización. Como se requiere menor confiabilidad que en OPT 11, el costo inicial de los disipadores es menor, pero mayor el costo de reparación como se puede observar en la Tabla 8. El costo por daños en el pórtico es prácticamente nulo, y el costo esperado total 5% menor.

OPT 13 y OPT 14: Ahora se realiza la optimización con $\beta_{1T} = 0$, es decir $Pf_E = 0.5$ en OPT 13 y $\beta_{1T} = -\infty$, es decir $Pf_E = 1$ en OPT 14. La solución óptima es la misma para ambos casos con $\beta_1(\mathbf{x}_d) = 0.40$, indicando que la solución de mínimo costo no se encuentra en el límite del índice de confiabilidad requerido para los disipadores, ni tampoco para la distorsión de piso del pórtico. Las secciones de hormigón son pequeñas, muy similar a OPT12, con alguna diferencia en las cuantías de armadura, produciendo un costo inicial del pórtico 9% mayor. La diferencia significativa está en los disipadores, resultando en este caso 2 chapas de 15.3 cm de

altura, con costo inicial muy inferior a OPT 11 y OPT 12. Se obtiene ahora un costo de reparación del pórtico y un costo de reemplazo de los disipadores 10% mayor que en OPT 12. El costo total esperado es 5% menor a OPT 12 y 9% menor a OPT 11.

En este ejemplo, la alternativa OPT 13 = OPT 14 es la de menor costo total. Sin embargo la alternativa OPT 12, con solo 5% más de costo, conduce a costo de reparación casi nulo en el pórtico, y como el costo está asociado a la distorsión de piso, significa que el costo de reparación de elementos no estructurales será mínimo, ítem no tenido en cuenta en este trabajo.

Para comparar con la alternativa presentada en la aplicación 1, sección 3, pórtico sin control de vibraciones, habría que considerar todo el costo de la construcción, porque la distorsión de piso induce también daño en los elementos no estructurales cuyo costo inicial y de reparación no se han incluido en este trabajo, quedando como tema abierto para futuras aplicaciones.

De todas maneras, si no se considera el costo de los brazos de instalación, es decir se compara el costo del pórtico solo de la aplicación 1, con el pórtico más disipadores de la aplicación 2, resulta \$13673 sin control de vibraciones contra \$14268 con control, valores muy similares con sólo 4% de diferencia, pero con mejor comportamiento estructural para la solución con control de vibraciones.

5 CONCLUSIONES

En este trabajo se presenta un análisis comparativo de dos soluciones de diseño sísmico, una sin control de vibraciones y la otra con control. Para ello se aplica una metodología de optimización de estructuras dentro del marco del diseño sísmico basado en el desempeño. La optimización consiste en encontrar valores a los parámetros de diseño que hagan mínima una función objetivo, en este caso el costo total, sujeta a restricciones expresadas en términos probabilísticos al reconocer la naturaleza aleatoria de las variables que intervienen en el problema. Se probaron diferentes alternativas en cada solución de diseño, llegándose a las siguientes conclusiones para la estructura analizada:

- En la estructura sin control de vibraciones, diferentes muestreos aleatorios conducen al mismo resultado de costo esperado total, indicando que el procedimiento de optimización es consistente.
- Los valores óptimos de los parámetros de diseño obtenidos con cada muestreo son diferentes, porque hay más incógnitas (parámetros) que ecuaciones (restricciones) y por la naturaleza aleatoria de la búsqueda, dejando al proyectista la elección de la alternativa más conveniente.
- Para la estructura con control de vibraciones se analizaron diferentes niveles de confiabilidad requerido para el estado límite de fluencia de los disipadores. A menor índice de confiabilidad se obtiene menor costo inicial y mayor costo de reemplazo, pero con menor costo total, indicando que conviene desde el punto de vista económico colocar disipadores de pocas chapas y con más probabilidad de reemplazo por exceder la fluencia ante un evento sísmico.
- La comparación entre los diseños con y sin control de vibraciones está indicando un costo total ligeramente inferior, 4%, en el caso sin control. Sin embargo el comportamiento estructural es mejor en el caso con control porque las probabilidades de exceder los estados límites de distorsión de piso son menores que significa menores costos de reparación, fundamento del uso de disipadores de energía, no solamente en el pórtico sino también en los elementos no estructurales, no tenidos en cuenta en este trabajo.

REFERENCIAS

- Ascheri, J.P., Möller, O., Rubinstein, M. Implementación de un elemento no lineal para la modelización del comportamiento de un disipador de energía por fluencia de acero. *Mecánica Computacional* Vol. XXVIII, 363-379, AMCA, 2009.
- FEMA 356, Prestandard and commentary for the seismic rehabilitation of buildings. *American Society of Civil Engineers (ASCE), Federal Emergency Management Agency*, 2000.
- Filippou, F.C., D'Ambrisi, A. and Issa, A., Nonlinear static and dynamic analysis of reinforced concrete subassemblages. *Earthquake Engineering Research Center, Report N° EERC 92-08*, University of California, Berkeley, 1992.
- Hurtado, J., *Structural Reliability – Statistical Learning Perspectives*, Lecture Notes in Applied and Computational Mechanics, Vol.17, Springer Verlag, 2004.
- Melchers, R.E. *Structural Reliability: Analysis and Prediction* – Ed. Ellis Horwood Limited – Halsted Press: a division of John Wiley & Sons, 1987.
- Möller, O., Metodología para evaluación de la probabilidad de falla de estructuras sismorresistentes y calibración de códigos, *Tesis de Doctorado en Ingeniería*, Universidad Nacional de Rosario, 2001.
- Möller, O. and Foschi, R. Reliability evaluation in seismic design: a response surface methodology. *Earthquake Spectra*. 19 (3): 579-603, 2003.
- Möller, O., Foschi, R., Rubinstein, M., Quiroz, L., Momento-curvatura de secciones de hormigón armado sismorresistentes utilizando redes neuronales. *Mecánica Computacional* Vol. XXV, 2145-2162, AMCA, 2006.
- Möller, O., Foschi, R., Rubinstein, M., Quiroz, L. Seismic structural reliability using different nonlinear dynamic response surface approximations. *Structural Safety*, 31(5), 432-442, 2009.
- Möller, O., Foschi, R., Rubinstein, M., Savino, F. “Optimización, con requisitos de confiabilidad, a partir del diseño preliminar de pórticos sismorresistentes”. *Mecánica Computacional* Vol. XXIX, 1403-1421, AMCA, 2010.
- Möller, O., Foschi, R., Rubinstein, M., Savino, F. Evolución del dominio de búsqueda aleatoria en optimización de estructuras sismorresistentes, con requisitos de confiabilidad. *Mecánica Computacional* Vol. XXX, 1257-1275, AMCA, 2011a.
- Möller, O., Rubinstein, M., Ascheri, J.P. Análisis del amortiguamiento proporcional a la rigidez tangente en sistemas dinámicos no lineales. *Mecánica Computacional* Vol. XXX, 1277-1293, AMCA, 2011b.
- Pérez López, Jesús R. Contribución a los métodos de optimización basados en procesos naturales y su aplicación a la medida de antenas en campo próximo. *URL <http://www.tesisenred.net/TDR-0305107-180847>*, 2005.
- SEAOC Vision 2000 Committee. Performance based seismic engineering of buildings. *Structural Engineers Association of California, Sacramento, California, U.S.A.*, 1995.
- Shinozuka M, Sato Y. Simulation of nonstationary random processes. *ASCE Journal of Engineering Mechanics*; 93(1): 11-40, 1967.
- Swisher, J.R., Hyden P.D, Jacobson, S.H. and Schruben, L.W. A Survey of Simulation Optimization Techniques and Procedures. *2000 Winter Simulation Conference*, J.A.Joines, R.R. Barton, K.Kang and P.A.Fishwick (eds), 2000.