

ANÁLISIS NUMÉRICO DE SENSIBILIDAD EN VARIABLES DE OPTIMIZACIÓN DE ESTRUCTURAS SISMORRESISTENTES

Oscar Möller^a, Ricardo O. Foschi^b, Juan P. Ascheri^a, Mauro Poliotti^a,
Sergio Grossman^c

^a*Instituto de Mecánica Aplicada y Estructuras (IMAE), Facultad Cs.Ex., Ingeniería y Agrimensura, 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, rowfal@civil.ubc.ca*

^c*Escuela de Ingeniería Civil, Facultad Cs.Ex., Ingeniería y Agrimensura, Universidad Nacional de Rosario, Riobamba y Berutti, 2000 Rosario, Argentina, sergiogrossman@fibertel.com.ar*

Palabras clave: Diseño sísmico basado en el desempeño, Optimización, Confiabilidad, Dinámica no lineal, Sensibilidad.

Resumen. El diseño sísmico basado en el desempeño tiene objetivos múltiples que significa satisfacer diferentes requerimientos de desempeño para cada nivel de terremoto de diseño. Se consideran las importantes incertidumbres tanto en la demanda sísmica como en la capacidad de la estructura, siendo entonces el diseño un problema de optimización con variables aleatorias que consiste en encontrar valores para ciertos parámetros de diseño (valores medios de algunas de las variables aleatorias) tal que se minimice una función objetivo como el costo total. Se imponen como restricciones probabilidades de excedencia anual admisibles o índices de confiabilidad mínimos para cada nivel de desempeño. El análisis numérico se organiza en tres bloques independientes: (i) análisis estructural; (ii) confiabilidad; (iii) optimización. Se presenta una aplicación numérica a un edificio de 4 pisos para oficinas ubicado en Mendoza, donde se analiza la sensibilidad de algunas variables del problema y su incidencia en los resultados finales de la optimización.

1 INTRODUCCIÓN

La optimización de estructuras solicitadas por acciones dinámicas consiste en encontrar valores a ciertos parámetros de diseño que minimicen una función objetivo, por ejemplo el costo total de la obra durante el ciclo de vida útil, y que cumplan con las restricciones impuestas al problema.

Prácticamente todas las variables que intervienen en un problema de ingeniería presentan incertidumbres, y en particular aquellas que representan a la acción dinámica, como así también las variables que representan a la capacidad estructural. Luego, todo el proceso de optimización y las restricciones se deben plantear en términos probabilísticos especificando niveles mínimos de confiabilidad en cada estado límite analizado.

El problema estudiado en este trabajo es el diseño óptimo de la estructura de hormigón armado de un edificio para oficinas ubicado en zona sísmica. 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 estados límites, o funciones de falla, en tres niveles de desempeño: operacional, seguridad de vidas y límite de colapso.

En cada nivel de desempeño, la formulación de los estados límites requiere el cálculo de valores máximos de respuestas de la estructura en la duración del evento sísmico. En estos casos, el comportamiento estructural es dinámico y fuertemente no lineal, y su respuesta debe ser encontrada mediante análisis numérico, por ejemplo utilizando el método de elementos finitos para la duración del terremoto.

Las respuestas máximas se calculan 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.

El problema de optimización se encuadra dentro de la optimización de tamaño (sizing optimization), manteniendo fijo el lay out del sistema estructural. El procedimiento para resolver el problema considera la presencia de las restricciones formuladas en términos probabilísticos, la forma y número de funciones objetivo.

Los algoritmos de optimización pueden usar diferentes aproximaciones (Pérez López, 2005; Swisher et al., 2000; Gencturk and Elnashai, 2012). Una primera clasificación se refiere a si utilizan o no el cálculo de derivadas. Los que utilizan derivadas primeras, y en algunos casos también derivadas segundas, son los métodos con esquemas de búsqueda por la mayor pendiente (steepest descent), métodos tipo Newton o cuasi-Newton, métodos de direcciones conjugadas, métodos de paso restringido, etc. El otro grupo de métodos de optimización que no utilizan cálculo de gradientes son los denominados heurísticos, como búsqueda tabú, templado simulado, subida de pendientes, búsqueda aleatoria, y los algoritmos evolutivos como algoritmos genéticos, programación genética, entre muchos otros.

En este trabajo se utiliza un algoritmo de búsqueda aleatoria que ha sido desarrollado en trabajos previos (Möller et al., 2010, 2012, 2013, 2015). A partir de un diseño inicial, los parámetros a optimizar se perturban aleatoriamente dentro de una zona de búsqueda. El de

menor costo es el nuevo punto de anclaje para iniciar otro ciclo de búsqueda aleatoria, así en forma iterativa hasta lograr la convergencia.

La función objetivo a minimizar es el costo total durante la vida útil de la construcción (LCC: life cycle cost). Se incluye: (i) Costo inicial de la construcción de la estructura resistente, de los elementos no estructurales (mampostería, pisos, cielorrasos, cerramientos, aberturas, instalaciones, etc.), y contenido (mobiliario y equipamiento); (ii) Costos de reparación por daños debido a la ocurrencia de terremotos durante la vida útil; (iii) Costos sociales, incluyendo gastos médicos por tratamiento y recuperación de heridos, seguros e indemnizaciones por fallecidos, y alquiler temporario durante las reparaciones.

Como aplicación numérica se presenta la optimización de un edificio de cuatro pisos para oficinas ubicado en zona de alta sismicidad, con tres variantes de la estructura resistente: (i) Estructura de pórticos sismorresistentes; (ii) Pórticos con disipadores de energía en cada piso por fluencia de acero; (iii) Pórticos con aisladores de base del tipo goma con núcleo de plomo.

Específicamente, se analiza la sensibilidad de diferentes variables que intervienen en el costo total, y su incidencia en los resultados finales de la optimización

2 EJEMPLO: EDIFICIO DE OFICINAS

La estructura a optimizar es un edificio para oficinas de cuatro pisos ubicado en la ciudad de Mendoza, cuya planta se representa en la Figura 1. También se muestra la elevación de los pórticos con tres variantes en la dirección x , que es la dirección analizada para el movimiento sísmico.

3 PROCESO GENERAL DE OPTIMIZACIÓN

Si bien la metodología de optimización es general para estructuras con acciones dinámicas, los desarrollos se realizan sobre un ejemplo para mayor claridad en su aplicación práctica. El proceso de optimización se organiza por bloques como se muestra en la Figura 2. Tiene la ventaja que cada bloque puede ejecutarse en forma independiente, teniendo como dato los archivos de resultados del bloque anterior, y entonces se pueden hacer pruebas y evaluar variantes por bloque sin tener que resolver en cada caso todo el problema completo. Es una ventaja para realizar los análisis de sensibilidad sobre las variables de costos.

3.1 Bloque 1: Análisis estructural

Variables: se consideran las cargas permanentes, sobrecarga de oficinas con sus valores nominales según CIRSOC. La acción sísmica corresponde a movimientos de suelo especificados, que deben ser seleccionados para constituir un conjunto de registros posibles de ocurrir en el sitio. No es un trabajo sencillo, y varias técnicas se pueden utilizar para formar ese conjunto, incluyendo el uso de registros históricos cuando están disponibles. En este trabajo, el conjunto se representa mediante acelerogramas generados artificialmente (Shinozuka, 1967; Möller, 2001), donde las variables principales son la aceleración pico del suelo a_G y la frecuencia central del filtro del suelo f_g . Se introducen ángulos de fase aleatorios en cada frecuencia componente, y se aplica una función de modulación para introducir la no estacionariedad. Otras variables para la generación de los acelerogramas son funciones de a_G y f_g , ó se adoptan valores constantes.

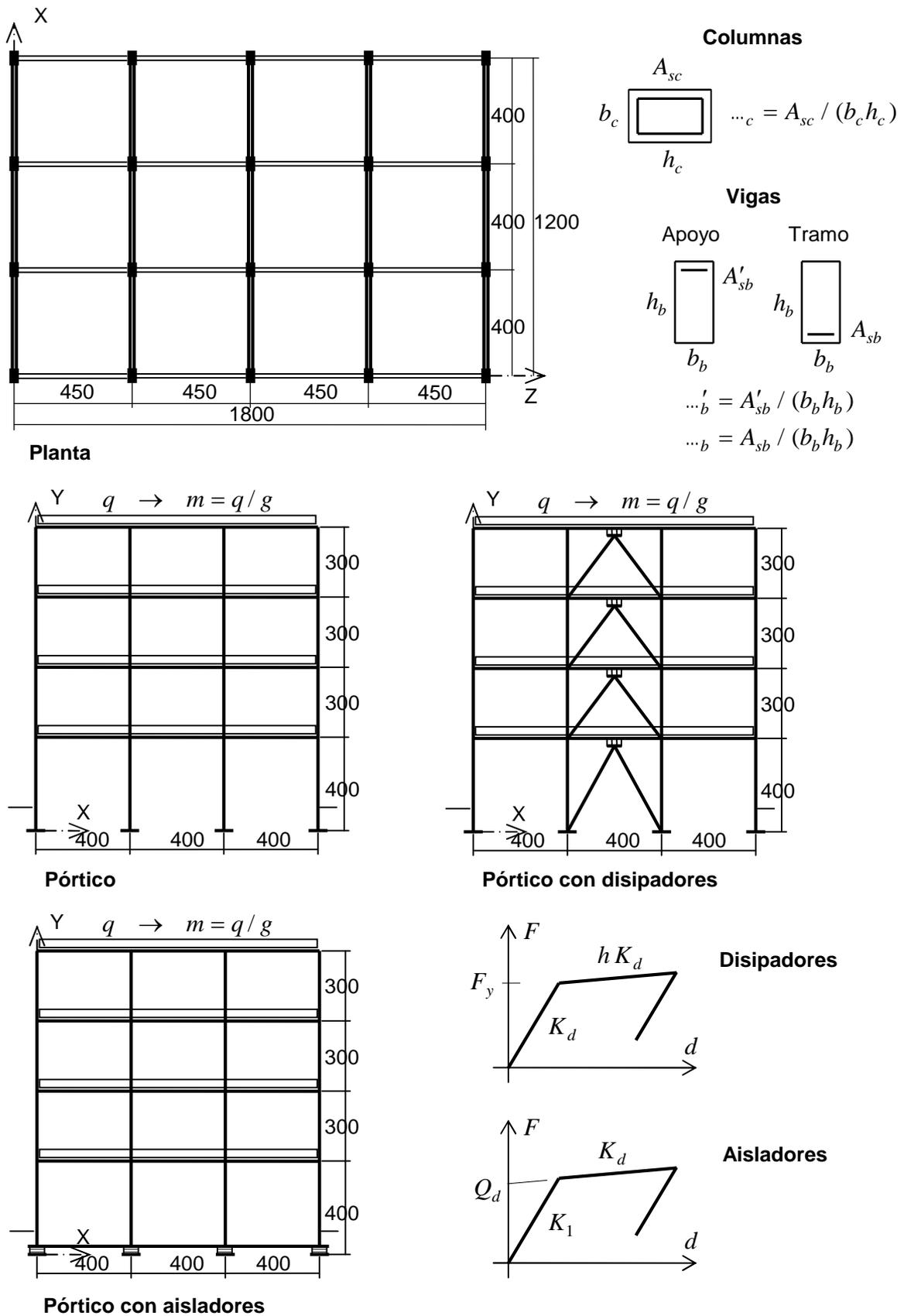


Figura 1: Estructura a optimizar

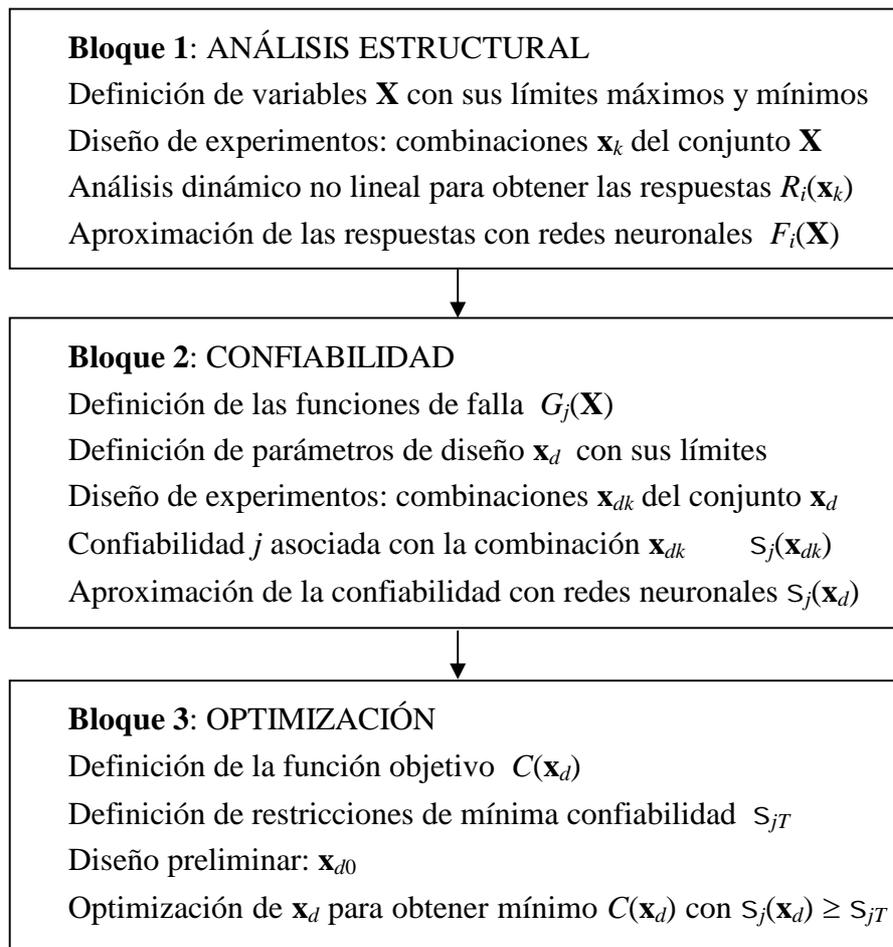


Figura 2: Proceso de optimización

Las variables consideradas para calcular las respuestas discretas, con sus límites mínimo y máximo, se presentan en la Tabla 1. Los límites de las cuantías de armadura responden a requisitos reglamentarios. Además, se establecen restricciones entre algunas de las variables.

Dentro de los límites de las variables y aplicando la técnica de diseño de experimentos, se generan aleatoriamente $NP = 450$ combinaciones de las variables. 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, 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.

Análisis dinámico no lineal: Para cada subcombinación de cada combinación de las variables, se realiza el análisis dinámico no lineal utilizando un modelo de elementos de barra (Möller, 2001; Möller and Foschi, 2003) que alcanza un buen balance entre precisión y simplicidad.

Del análisis dinámico no lineal se obtienen las máximas respuestas que luego intervienen en las funciones de estado límite o desempeño, y que en este ejemplo son: $UMAX$: desplazamiento horizontal máximo en el piso superior o cima del edificio; $AMAX(i)$, $i=1,4$: aceleración máxima en el i -ésimo piso; $DISTM$: distorsión máxima de piso; $DIES$: índice de daño global de la estructura, calculado con la formulación de Park y Ang; $DILOM$: índice de daño local máximo. Para la estructura con disipadores de energía se evalúa la máxima

ductilidad en los dispositivos en cada piso $DUCDM (i)$, $i=1,4$. Para la estructura con aisladores de base se evalúa la máxima deformación por corte horizontal de los aisladores en cada columna del pórtico $DISAM (i)$, $i=1,4$.

Variable	Límite inferior	Límite superior	Definición
$X(1) = m \text{ (KN s}^2 / \text{cm}^2)$	2.00×10^{-4}	4.00×10^{-4}	Masa por unidad de longitud en vigas
$X(2) = b_b \text{ (cm)}$	15	30	Ancho de la sección de vigas
$X(3) = h_b \text{ (cm)}$	35	70	Altura de la sección de vigas
$X(4) = b_c \text{ (cm)}$	20	40	Ancho de la sección de columnas
$X(5) = h_c \text{ (cm)}$	40	100	Altura de la sección de columnas
$X(6) = \dots_b$	0.00298	0.01389	Cuantía de armadura de tramo en vigas
$X(7) = \dots'_b$	0.00298	0.01389	Cuantía de armadura de apoyo en vigas
$X(8) = \dots_c$	0.008	0.04286	Cuantía de armadura en columnas
$X(9) = f_r / f'_{c0}$	0	0.15	Presión de confinamiento
$X(10) = F_y \text{ or } Q_d \text{ (KN)}$	25 / 15	2300 / 480	Fuerza de fluencia en dissipador / aislador
$X(11) = K_d \text{ (KN / cm)}$	45 / 225	37000 / 1900	Rigidez del dissipador / aislador
$X(12) = a_G \text{ (cm / s}^2)$	10	1200	Aceleración pico del suelo
$X(13) = f_g \text{ (Hz)}$	1.00	4.00	Frecuencia central del suelo

Tabla 1: Límites de las variables.

Si R es una respuesta genérica de las mencionadas en el párrafo anterior, se obtienen los correspondientes valores R_{jk} para cada combinación $j = 1, NP$ y cada sub-combinación $k = 1, NS$. Para cada una de las NP combinaciones se calcula el valor medio y el desvío estándar sobre el conjunto de las NS sub-combinaciones

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

Aproximación con redes neuronales: con los resultados discretos (1) se ensamblan dos bases de datos para cada respuesta $R(\mathbf{X})$, que son usadas para entrenar dos redes neuronales: una para los valores medios $Y_m(\mathbf{X})$ y otra para los desvíos estándar $\sigma_Y(\mathbf{X})$ de la respuesta sobre las sub-combinaciones. La expresión matemática para cada resultado Y_k es

$$Y_k = h \left(\sum_{j=1}^J W_{kj} h \left(\sum_{i=1}^N W_{ji} X_i + W_{j0} \right) + W_{k0} \right) \quad (2)$$

donde W_{kj} y W_{ji} son factores de peso a calcular, y $h(t)$ es la función no lineal de transferencia. El proceso de entrenamiento permite encontrar los pesos W que minimicen el error total entre las predicciones de la red y los resultados del análisis dinámico no lineal.

La aproximación de la red neuronal a los resultados del análisis dinámico no lineal 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:

$$\dagger_{v_r} = \sqrt{\frac{1}{NP-1} \sum_{k=1}^{NP} \left(\frac{Y_k - T_k}{Y_k}\right)^2} \tag{3}$$

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 aproximada $F(\mathbf{X})$ se puede escribir con

$$\bar{F}(\mathbf{X}) = \bar{Y}(\mathbf{X}) (1. + \dagger_{v_m} X_{N_1}) \quad \dagger_F(\mathbf{X}) = \dagger_Y(\mathbf{X}) (1. + \dagger_{v_t} X_{N_2}) \tag{4}$$

donde $\bar{Y}(\mathbf{X}), \dagger_Y(\mathbf{X})$ son el valor medio y desvío estándar de la respuesta calculados con las redes neuronales correspondientes (2), $\dagger_{v_m}, \dagger_{v_t}$ son los desvíos estándar del error relativo calculados con (3) y X_{N_1}, X_{N_2} son variables normales estándar.

Finalmente cada respuesta $R(\mathbf{X})$, considerando una distribución lognormal, resulta

$$R(\mathbf{X}) \cong F(\mathbf{X}) = \frac{\bar{F}(\mathbf{X})}{\sqrt{1. + \left(\frac{\dagger_F(\mathbf{X})}{\bar{F}(\mathbf{X})}\right)^2}} \exp\left[R_{N_1} \sqrt{\ln\left(1. + \left(\frac{\dagger_F(\mathbf{X})}{\bar{F}(\mathbf{X})}\right)^2\right)}\right] \tag{5}$$

3.2 Bloque 2: Confiabilidad

Variables aleatorias y parámetros de diseño: la distribución y estadística de todas las variables consideradas se presentan en la Tabla 2, que incluye a las variables de la Tabla 1, 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, y las características de los disipadores / aisladores para las estructuras con control.

Variable	\bar{X}	\dagger_x	Tipo	Variable	\bar{X}	\dagger_x	Tipo
$X(1) = m$	$3.09 \cdot 10^{-4}$	$3.09 \cdot 10^{-5}$	Normal	$X(11) = K_d$?	$0.10 \bar{X}$	Lognormal
$X(2) = b_b$	20 cm	1 cm	Normal	$X(12) = \bar{a}_G$	$\bar{X}(12)$	$\dagger_{X(12)}$	Lognormal
$X(3) = h_b$? cm	$0.05 \bar{X}$	Normal	$X(13) = f_g$	2.50 Hz	0.375 Hz	Normal
$X(4) = b_c$	30 cm	1.5 cm	Normal	$X(14) = \dagger_{\bar{a}_G}$	0	0.25	Normal
$X(5) = h_c$? cm	$0.05 \bar{X}$	Normal	$X(15) = a_G$	$X(15) = X(12) [1.0+X(14)]$		
$X(6) = \dots_b$?	$0.10 \bar{X}$	Lognormal	$X(16) = R_{N_1}$	0	1	Normal
$X(7) = \dots'_b$?	$0.10 \bar{X}$	Lognormal	$X(17) = X_{N_1}$	0	1	Normal
$X(8) = \dots_c$?	$0.10 \bar{X}$	Lognormal	$X(18) = X_{N_2}$	0	1	Normal
$X(9) = f_r / f'_{c0}$	0.10	0.01	Normal	$X(19) = X_{N_3}$	0	1	Normal
$X(10) = F_y - Q_d$?	$0.10 \bar{X}$	Lognormal				

Tabla 2: Estadística de las variables aleatorias

Para la estadística de la aceleración pico del suelo, $X(12)$ de la Tabla 2 se supone que la aceleración efectiva a_s del INPRES-CIRSOC 103 Parte I (2013), tiene una probabilidad de excedencia de 10% en 50 años, para la zona sísmica que abarca la ciudad de Mendoza, resulta $\bar{a}_G = 0.35 g$. Siguiendo el procedimiento de FEMA 356, ver Méndez (2012), se evalúan las aceleraciones para otras probabilidades de excedencia, representándolas luego con una distribución lognormal que resulta $LN(48, 78) cm/s^2$.

Funciones de falla: las funciones de falla o estados límites, para los niveles de desempeño operacional, seguridad de vidas y límite de colapso, se describen en las ecs.(6) a (17). Para tener en cuenta la incertidumbre de modelo, se considera un coeficiente de variación $COV = 0.10$, con distribución normal, introduciendo otra variable Normal estándar X_{N3} .

Operacional

$$G_{11}(\mathbf{X}) = 0.005 - DISTM(\mathbf{X}) \left[1 + COV X_{N3} \right] \quad \text{modo 1} \quad (6)$$

$$G_{12}(\mathbf{X}) = 0.10 - DILOM(\mathbf{X}) \left[1 + COV X_{N3} \right] \quad \text{modo 2} \quad (7)$$

$$G_{13}(\mathbf{X}) = 1.00 - DUCDM(\mathbf{X}) \left[1 + COV X_{N3} \right] \quad \text{sólo para disipadores} \quad \text{modo 3} \quad (8)$$

$$G_{13}(\mathbf{X}) = 1.00 - DISAM(\mathbf{X}) \left[1 + COV X_{N3} \right] \quad \text{sólo para aisladores} \quad \text{modo 3} \quad (9)$$

Seguridad de vidas o control de daños

$$G_{21}(\mathbf{X}) = 0.015 - DISTM(\mathbf{X}) \left[1 + COV X_{N3} \right] \quad \text{modo 4} \quad (10)$$

$$G_{22}(\mathbf{X}) = 0.40 - DIES(\mathbf{X}) \left[1 + COV X_{N3} \right] \quad \left. \vphantom{G_{22}(\mathbf{X})} \right\} \text{modo 5} \quad (11)$$

$$G_{23}(\mathbf{X}) = 0.60 - DILOM(\mathbf{X}) \left[1 + COV X_{N3} \right] \quad \left. \vphantom{G_{23}(\mathbf{X})} \right\} \text{modo 5} \quad (12)$$

$$G_{24}(\mathbf{X}) = 1.50 - DISAM(\mathbf{X}) \left[1 + COV X_{N3} \right] \quad \text{sólo para aisladores} \quad \text{modo 6} \quad (13)$$

Límite de colapso

$$G_{31}(\mathbf{X}) = 0.025 - DISTM(\mathbf{X}) \left[1 + COV X_{N3} \right] \quad \text{modo 7} \quad (14)$$

$$G_{32}(\mathbf{X}) = 0.80 - DIES(\mathbf{X}) \left[1 + COV X_{N3} \right] \quad \left. \vphantom{G_{32}(\mathbf{X})} \right\} \text{modo 8} \quad (15)$$

$$G_{33}(\mathbf{X}) = 1.00 - DILOM(\mathbf{X}) \left[1 + COV X_{N3} \right] \quad \left. \vphantom{G_{33}(\mathbf{X})} \right\} \text{modo 8} \quad (16)$$

$$G_{34}(\mathbf{X}) = 2.50 - DISAM(\mathbf{X}) \left[1 + COV X_{N3} \right] \quad \text{sólo para aisladores} \quad \text{modo 9} \quad (17)$$

La cantidad de modos de falla es diferente para cada variante de estructura analizada. Para la estructura sin control se analizan 6 modos de falla (1,2,4,5,7,8), para la estructura con disipadores de energía en cada piso se analizan 7 modos de falla (1,2,3,4,5,7,8), y para la estructura con aisladores de base se consideran los 9 modos de falla.

Estimación de la confiabilidad: dentro de los límites de los parámetros de diseño y aplicando nuevamente la técnica de diseño de experimentos, se seleccionan aleatoriamente MC combinaciones de valores de los parámetros de diseño \mathbf{x}_d . La cantidad de combinaciones se establece de manera que las redes neuronales puedan tener un máximo de al menos 20 neuronas en la capa intermedia que asegura buena precisión. Finalmente se adopta $MC = 250$ para estructura sin control y 285 para estructuras con control.

Para cada combinación se calculan las probabilidades de falla, o índice de confiabilidad en cada modo de falla, utilizando el método de Monte Carlo. El tamaño de la simulación es variable, depende del valor de la P_f en cada caso y de la confianza que se requiera, medida con el coeficiente de variación de P_f . Se adopta $COV P_f = 0.04$. La gran cantidad de simulaciones en cada combinación, del orden de 10^6 , se realizan con tiempos de cómputos

razonables debido a la utilización de las redes neuronales que aproximan la respuesta no lineal del pórtico mediante funciones analíticas (5).

Aproximación con redes neuronales: con los resultados discretos de los índices de confiabilidad obtenidos con el método de simulación de Monte Carlo se organizan las bases de datos y resultados $S_j(\mathbf{x}_d)$, $j = 1, 9$, con las cuales se entrenan otras tantas redes neuronales. Estas redes neuronales se utilizan luego en el proceso de optimización que se describe en la sección 3.3.5 para verificar si se cumplen las restricciones de confiabilidad.

3.3 Bloque 3: Optimización

Función objetivo: la función objetivo a minimizar es el costo total que incluye el costo inicial de construcción $C_0(\mathbf{x}_d)$, el costo de reparación por daños $C_d(\mathbf{x}_d)$ y el costo social $C_s(\mathbf{x}_d)$ debido a la ocurrencia de terremotos durante la vida útil de la estructura, es decir

$$C(\mathbf{x}_d) = C_0(\mathbf{x}_d) + C_d(\mathbf{x}_d) + C_s(\mathbf{x}_d) \quad (18)$$

3.3.1 Costo inicial

a) Estructura resistente: en este ejemplo se compone de las vigas y columnas del edificio. El precio del hormigón, que incluye materiales, encofrado y mano de obra para la colocación, incidencia de gastos generales, beneficios e IVA (1.45), se estima en $CUH = 845 \text{ USD}/m^3$. Para el acero de la armadura de refuerzo, incluyendo material y mano de obra para la colocación, se estima en $CUA = 3.38 \text{ USD}/Kg$. El volumen de hormigón y el peso de la armadura son función de los parámetros de diseño, resultando

$$C_{01}(\mathbf{x}_d) = [V_{viga}(\mathbf{x}_d) + V_{col}(\mathbf{x}_d)]CUH + [P_{s,viga}(\mathbf{x}_d) + P_{s,col}(\mathbf{x}_d)]CUA \quad (19)$$

b) Elementos de control de vibraciones

- Disipadores de energía: se estima un costo unitario $CUD = 650 \text{ USD}/Kg$ y para sus brazos de instalación $CUB = 2.60 \text{ USD}/Kg$. Los parámetros de diseño se relacionan con el peso mediante la siguiente expresión aproximada obtenida por regresión numérica

$$P_{dis}(\mathbf{x}_d) = x_s \left[(3 F_y^2) / (20000 K_d 0.00114^2) \right] \quad (20)$$

Luego el costo de los 20 dispositivos se calcula con

$$C_{02}(\mathbf{x}_d) = [P_{dis}(\mathbf{x}_d) CUD + P_{bra}(\mathbf{x}_d) CUB] 20 \quad (21)$$

- Aisladores de base: se estima un costo del sistema entre 39 y $65 \text{ USD}/m^2$ dependiendo del tamaño del aislador. Con los valores de los parámetros de diseño Q_d y K_d se busca el aislador más cercano en el catálogo comercial y su correspondiente peso P_{ais} . Para el edificio del ejemplo con $864m^2$ se obtiene la siguiente expresión simplificada

$$C_{02}(\mathbf{x}_d) = [P_{ais}(\mathbf{x}_d)]^{0.25} 26000 \quad (22)$$

c) Otros elementos estructurales: losas de pisos y fundación. En función del costo por m^2 del edificio ($681 \text{ USD}/m^2$), de los porcentajes habituales de incidencia de estos componentes (28% la estructura y dentro de ella el 40% las losas y el 30% la fundación), de los porcentajes de gastos generales, beneficios e IVA (1.45), se obtiene el siguiente precio global

$$C_{03} = 0.28 (0.40 + 0.305) 681 \text{ USD}/m^2 1.45 864m^2 = 168462 \text{ USD} \quad (23)$$

d) Elementos no estructurales: incluye el costo de contrapisos, pisos, mampostería, aberturas, instalaciones, etc. El porcentaje de incidencia es de 1 – 28% de la estructura, resultando el siguiente precio global

$$C_{04} = (1 - 0.28) 681 \text{USD} / m^2 \cdot 1.45 \cdot 864 m^2 = 614185 \text{USD} \quad (24)$$

e) Contenido: incluye mobiliario y equipamiento. Se considera 2558 USD/puesto de trabajo, y que en este edificio de oficinas trabajan 60 personas, luego el precio global es

$$C_{05} = 2558 \text{USD} / \text{per} \cdot 1.45 \cdot 60 \text{per} = 222546 \text{USD} \quad (25)$$

Finalmente el precio inicial se obtiene sumando las cinco componentes

$$C_0(\mathbf{x}_d) = C_{01}(\mathbf{x}_d) + C_{02}(\mathbf{x}_d) + C_{03} + C_{04} + C_{05} \quad (26)$$

3.3.2 Costo de reparación 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, 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.

En función de parámetros de respuesta estructural PR que cuantifiquen el daño en la estructura, en los elementos no estructurales y en el contenido, se calcula $C_f(PR)$ que es el costo en función de ese daño que ocurre en el tiempo t , y $C_{f0}(PR)$ que es el costo llevado al tiempo de construcción $t = 0$, con r la tasa de interés, resulta

$$C_{f0}(PR) = C_f(PR) \exp(-rt) \quad (27)$$

El valor esperado de $C_{f0}(PR)$ 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 ϵ . Luego de desarrollos algebraicos (Möller y otros, 2010), se obtiene

$$C_d|_{PR} = \sum_{n=1}^{\infty} C_f(PR) \epsilon \sum_{i=0}^{n-1} \left[\frac{\epsilon^i}{i!} \int_0^{T_D} t^i \exp(-(r+\epsilon)t) dt \right] \frac{(\epsilon T_D)^n}{n!} \exp(-\epsilon T_D) \quad (28)$$

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.(28) se tiende a un valor finito. En este trabajo se trunca la sumatoria cuando la contribución relativa del término n es menor que 0.001.

Finalmente el costo de reparación por daños resulta

$$C_d(\mathbf{x}_d) = \int_0^{\infty} C_d|_{PR} f_{PR}(PR) d(PR) \quad (29)$$

donde $f_{PR}(PR)$ es la función de densidad de probabilidades para el parámetro de respuesta. Para los valores de \mathbf{x}_d que se está evaluando la función objetivo, y mediante una simulación tipo Monte Carlo, se calculan valores de PR con la ayuda de las redes neuronales entrenadas. Se evalúa el valor medio y desvío estándar de los resultados con los que se ajusta una distribución lognormal y se resuelve la integral (29).

a) Daños en la estructura: la función $C_f(PR)$, que interviene en el cálculo de (28), se

calcula en función del parámetro de respuesta índice de daño $PR = DIES$ como se muestra en la Figura 3. Para $DIES = 0.05$ no hay daños para reparar. Hasta $DIES = 0.40$ sólo hay daños en vigas y columnas, pero no en losas y fundaciones. El factor $r_2 = 0.80$ es una fracción del costo inicial de vigas y columnas que se debe invertir en su reparación. Se asume un reemplazo completo cuando $DIES$ excede 0.80. Se utiliza el factor $r_1 = 1.20$ para tener en cuenta el retiro de restos y limpieza. Se asume variaciones lineales entre los puntos mencionados.

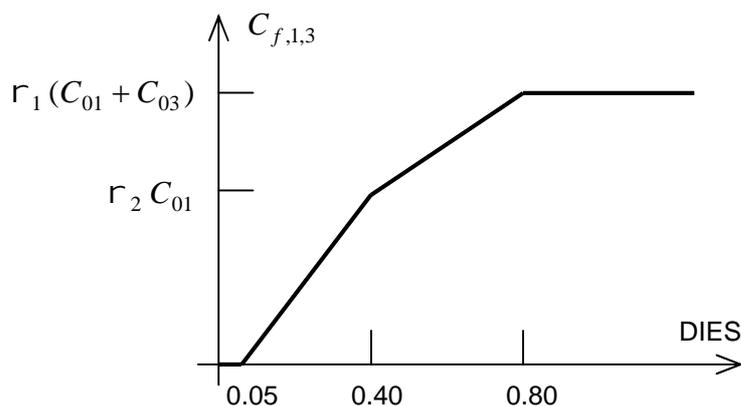


Figura 3: Función de costo para daños estructurales

b) Daños en elementos de control de vibraciones:

- Disipadores de energía: la función $C_f(PR)$ se calcula en función del parámetro de respuesta ductilidad máxima en cada disipador $PR_i = DUCDM_i$, $i = 1,4$ pisos, como se muestra en la Figura 4. Se considera que el disipador debe ser reemplazado cuando la demanda de ductilidad excede el valor 2.00, debido a las deformaciones permanentes luego del terremoto. Se considera un factor $r_3 = 1.10$ para retiro y acondicionamiento.

- Aisladores de base: la función $C_f(PR)$ se evalúa en función del parámetro de respuesta distorsión máxima en cada aislador $PR_i = DISAM_i$, $i = 1,4$ columnas, como se muestra en la Figura 4. Se considera que el aislador debe ser reemplazado cuando la demanda de distorsión excede el valor 2.50, debido a las deformaciones permanentes luego del terremoto. Se considera un factor $r_3 = 1.10$ para retiro y acondicionamiento, y un factor $r_4 = 0.20$ para demanda de distorsión de 1.50.

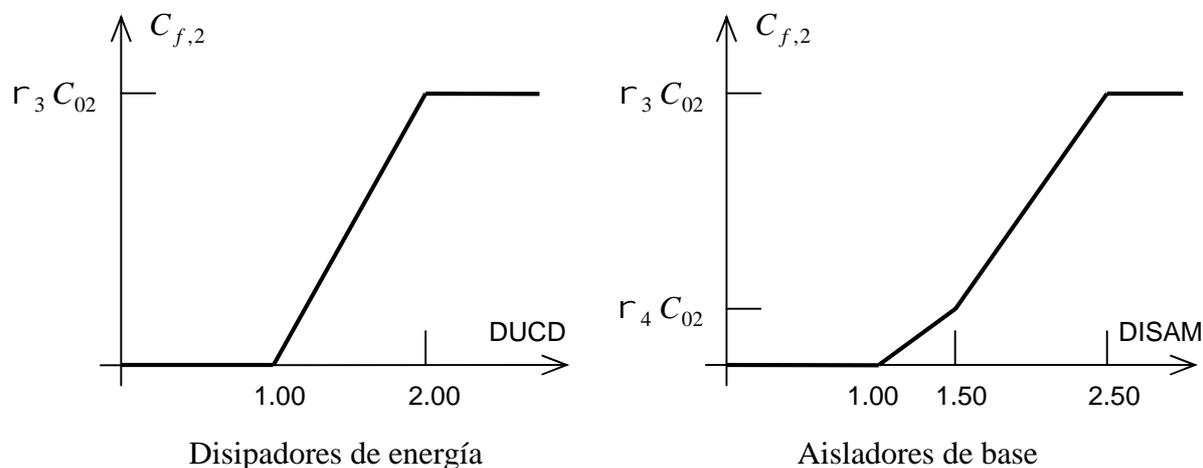


Figura 4: Función de costo para daños en elementos de control

Simultáneamente, cuando $DIES = 0.80$ la estructura colapsa y hay que reponer todos los elementos de control. Luego, la expresión general (29) resulta

$$C_{d2}(\mathbf{x}_d) = \sum_{i=1}^4 \left[\int_0^{\infty} C_d|_{PR_i} f_{PR_i}(PR_i) d(PR_i) \right] [1 - \Pr(DIES \geq 0.8)] + r_3 C_{02} \Pr(DIES \geq 0.8) \quad (30)$$

c) Daños en elementos no estructurales: la función $C_f(PR)$ se calcula en función del parámetro de respuesta distorsión máxima de piso $PR = DISTM$ como se muestra en la Figura 5. El valor de $r_6 = 0.40$ considera el porcentaje de elementos dañados para distorsión de piso usualmente asociado a nivel de desempeño seguridad de vidas o control de daños. Se utiliza el factor $r_5 = 1.20$ para tener en cuenta el retiro de restos y limpieza. Se asume variaciones lineales entre los puntos mencionados

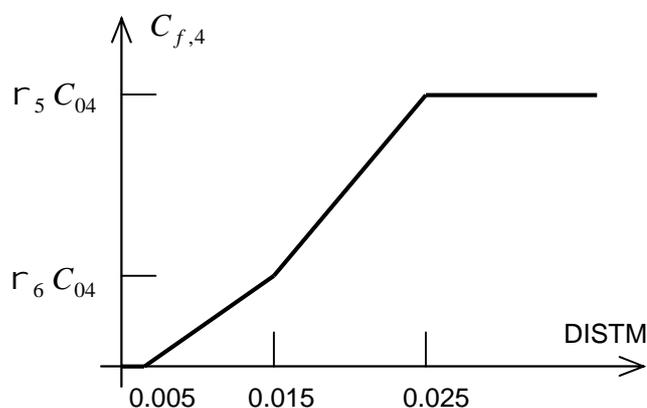


Figura 5: Función de costo para daños en elementos no estructurales

Simultáneamente, cuando $DIES = 0.80$ la estructura colapsa y hay que reponer todos los elementos no estructurales. Luego, la expresión general (29) resulta

$$C_{d4}(\mathbf{x}_d) = \int_0^{\infty} C_d|_{PR_i} f_{PR_i}(PR_i) d(PR_i) [1 - \Pr(DIES \geq 0.8)] + r_5 C_{04} \Pr(DIES \geq 0.8) \quad (31)$$

d) Daños en contenido: la función $C_f(PR)$ se calcula en función de la aceleración máxima en cada piso $PR_i = ACELM_i$, $i = 1, 3$ pisos con oficinas, como se muestra en la Figura 6. El valor de $r_7 = 0.33$ considera el porcentaje de elementos dañados, como por ejemplo computadoras que se caen de los escritorios, o armarios que se vuelcan.

Simultáneamente, cuando $DIES = 0.80$ la estructura colapsa y hay que reponer todos los elementos del contenido (mobiliario y equipamiento). Luego, la expresión general (29) resulta

$$C_{d5}(\mathbf{x}_d) = \sum_{i=1}^3 \left[\int_0^{\infty} C_d|_{PR_i} f_{PR_i}(PR_i) d(PR_i) \right] [1 - \Pr(DIES \geq 0.8)] + C_{05} \Pr(DIES \geq 0.8) \quad (32)$$

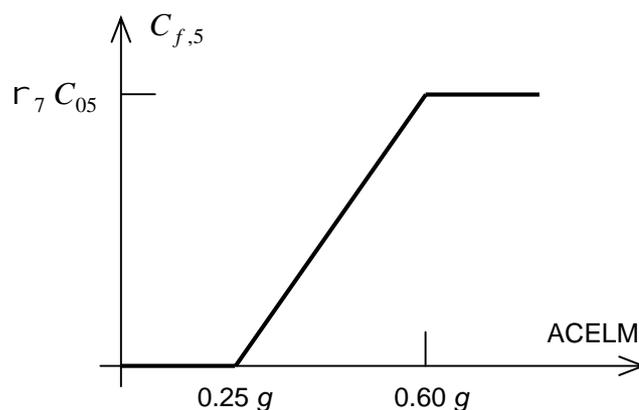


Figura 6: Función de costo para daños en contenido

Finalmente el costo de reparación por daños se obtiene sumando las componentes

$$C_d(\mathbf{x}_d) = C_{d1,3}(\mathbf{x}_d) + C_{d2}(\mathbf{x}_d) + C_{d4}(\mathbf{x}_d) + C_{d5}(\mathbf{x}_d) \quad (33)$$

Se hace notar que si bien el costo inicial de elementos no estructurales y contenido no es función de los parámetros de diseño \mathbf{x}_d , el costo por daños sí, a través de los parámetros de respuesta que cuantifican el daño en dichos elementos.

3.3.3 Costos sociales

A los fines del presente estudio, sólo se tendrán en cuenta los costos directos que debe afrontar el sector social sobre el cual el sismo impactó de manera directa, despreciando en este caso los costos indirectos. Se consideran 3 escenarios para el análisis de costos

a) **Escenario 1. Índice de destrucción bajo:** cuantificado con $DIES = 0.10$. La acción sísmica es lo suficientemente intensa para provocar algunos daños materiales pero sin afectación física a las personas. Se incluye:

Costo de reinserción laboral (CRL): Se considera que el 70% de las personas requiere un tratamiento profesional psicológico por un período de 3 meses con un mínimo de una sesión semanal, mientras que el 30% restante lo requerirá por 5 meses con igual frecuencia. Resulta $C_{RL} = 28390 USD$.

Costo de evaluación de daños (CED): Se considera que la evaluación de daños del edificio la realizan 2 profesionales durante 5 días hábiles. Resulta $C_{ED} = 8660 USD$.

Costo de alquiler temporario (CAT): Durante el periodo de evaluación y rehabilitación edilicia las empresas no podrán utilizar sus instalaciones, luego será necesario disponer de oficinas en alquiler durante ese período. Teniendo en cuenta que de acuerdo a la magnitud del sismo se tratará de reparaciones menores, el tiempo estimado es de 1 mes. Resulta $C_{AT} = 13000 USD$.

Costo total para índice de daño bajo: **50050 USD**.

b) **Escenario 2. Índice de destrucción medio:** cuantificado con $DIES = 0.40$. La hipótesis de este escenario es que no se producirán muertes, pero se considera que un 70% de las personas tendrán lesiones importantes que requerirán un tratamiento psicológico más prolongado y además deberán ser tratados clínicamente. El 30% restante sufrirían daños leves. Se incluye:

Costo de reinserción laboral (CRL): Se considera que el 70% de las personas requiere un tratamiento profesional psicológico prolongado por un período de 9 meses con un mínimo de

una sesión semanal, mientras que el 30% restante lo requerirá por 6 meses con igual frecuencia. Resulta $C_{RL} = 63880 \text{ USD}$.

Costo de tratamiento médico (CTM): Bajo la misma hipótesis, un 70% de las víctimas graves requerirán tratamiento médico y medicamentos por un período de 9 meses, mientras que el 30% restante de víctimas tendrán lesiones leves requiriendo un tratamiento médico durante 6 meses. Resulta $C_{TM} = 123700 \text{ USD}$.

Costo de rehabilitación de víctimas (CRV): Se considera que el 70% de las víctimas graves deberán someterse a un programa de 36 sesiones de rehabilitación a lo largo de los 9 meses de convalecencia, mientras que el 30% correspondiente a las víctimas leves tendrán 24 sesiones de rehabilitación. Resulta $C_{RV} = 155140 \text{ USD}$.

Costo de evaluación de daños (CED): Se consideran 4 profesionales especialistas trabajando durante 7 días, utilizando equipamientos de medición y auscultación para finalmente realizar ensayos destructivos y no destructivos en un laboratorio especializado. Resulta $C_{ED} = 35530 \text{ USD}$.

Costo de alquiler temporario (CAT): Al igual que en el escenario 1 será necesario considerar el alquiler de las oficinas donde deberán mudarse las empresas durante el período de auscultación del edificio y las reparaciones del mismo, que se estima en 6 meses. Resulta $C_{AT} = 78000 \text{ USD}$.

Costo total para índice de daño medio: **456250 USD**.

c) **Escenario 3. Índice de destrucción alto:** cuantificado con $DIES = 0.80$. En un escenario con un alto índice de destrucción, donde los costos sociales se incrementan notablemente, tienen un gran peso las hipótesis que se consideren para el análisis. Para este ejemplo se considera que un 50% de las personas del edificio mueren en el siniestro, un 35% son víctimas de lesiones severas que requerirán un tratamiento prolongado por 12 meses en promedio, y el 15% restante sufrirían lesiones de menor gravedad que les demandarán, en promedio, 9 meses de cuidados médicos. Se incluye:

Costo de reinserción laboral (CRL): El hecho que el 50% de las personas que se encuentran en el edificio mueren, significa que el otro 50% deberá recibir asistencia para reinsertarse al trabajo. Bajo la hipótesis del 35% y 15% mencionada, resulta $C_{RL} = 43770 \text{ USD}$.

Costo de contención familiar (CCF): Los familiares de las personas fallecidas, y de aquellos que han sufrido lesiones de consideración deberán recibir un apoyo profesional que los ayude a entender la situación y a resignarse ante un hecho de tamaña significación. Para el caso de familiares de fallecidos, se consideran 3 familiares con 48 sesiones en promedio, mientras que para los gravemente heridos se considera solo un familiar por el mismo período en promedio. Resulta $C_{CF} = 175085 \text{ USD}$.

Costo de tratamiento médico (CTM): Corresponde a los gastos en medicamentos y honorarios profesionales de aquellas personas que quedaron con vida, conforme a los valores enunciados para el Escenario 2. Resulta $C_{TM} = 67640 \text{ USD}$.

Costo de rehabilitación de víctimas (CRV): Se considera que el 35% de las víctimas graves deberán someterse a un programa de 48 sesiones de rehabilitación a lo largo de los 12 meses de convalecencia, mientras que el 15% correspondiente a las víctimas leves tendrán 36 sesiones de rehabilitación. Resulta $C_{RV} = 106300 \text{ USD}$.

Costo de indemnización por muerte (CIM): Considerando que el edificio de este ejemplo está destinado a oficinas de empresas, se estima un salario medio mensual más un 25% correspondiente a premios, aguinaldo, vacaciones, cargas sociales, etc., y que la antigüedad promedio es de 15 años La indemnización corresponde a un 50% de la normal, debido a que la muerte se produce por causas fortuitas. Resulta $C_{IM} = 660150 \text{ USD}$.

Costo de seguros de vida individuales (CSV): Debido a que muchas entidades crediticias tales como bancos, tarjetas de créditos, etc., otorgan un seguro de vida obligatorio a sus asociados, se considera en este análisis que el 75% de las víctimas fatales cuentan con tal seguro. Resulta $C_{SV} = 422500 \text{ USD}$.

Costo de evaluación de daños (CED): Se consideran 6 profesionales especialistas trabajando durante 7 días, utilizando equipamientos de medición y auscultación para finalmente realizar ensayos destructivos y no destructivos en un laboratorio especializado. Resulta $C_{ED} = 49400 \text{ USD}$.

Costo de alquiler temporario (CAT): Al igual que en los escenarios 1 y 2 será necesario considerar el alquiler de las oficinas donde deberán mudarse las empresas durante el período de auscultación del edificio y las reparaciones del mismo, que se estima en 12 meses. Resulta $C_{AT} = 156000 \text{ USD}$.

Costo total para índice de daño alto: **1680845 USD**.

Con los costos calculados para cada escenario de daños, e interpolando linealmente entre ellos, se construye la función $C_{f,S}(DIES)$ que se muestra en la Figura 7. Luego, esta función es utilizada en (28) para tener en cuenta la ocurrencia de terremotos durante la vida útil y la tasa de interés para llevar los costos al tiempo inicial, obteniéndose $C_S|_{DIES}$. Luego integrando con la densidad de probabilidades del índice de daño, resulta

$$C_S(\mathbf{x}_d) = \int_0^{\infty} C_S|_{DIES} f_{DIES}(DIES) d(DIES) \tag{34}$$

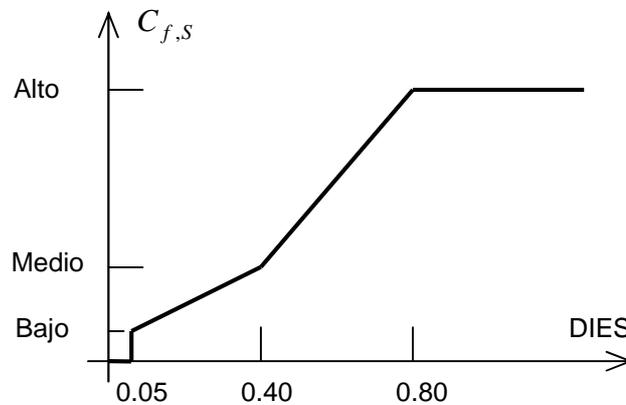


Figura 7: Función de costos sociales

3.3.4 Restricciones de confiabilidad

Las probabilidades de falla anual límites se establecen de acuerdo con las recomendaciones de Paulay y Priestley (1992): 2×10^{-2} para desempeño operacional; 2×10^{-3} para seguridad de vidas, y 2×10^{-4} para límite de colapso. Considerando la ocurrencia de terremotos como un proceso de Poisson, con frecuencia media $\epsilon = 0.20$ para la ciudad de Mendoza, para magnitudes de interés $M \geq 5$, los límites de probabilidad anual son equivalentes a los siguientes índices de confiabilidad cuando ocurre un evento sísmico: 1.276 (operacional), 2.326 (seguridad de vidas), 3.090 (colapso), que se utilizan como las NR restricciones de confiabilidad para los niveles de desempeño utilizados en el proceso de optimización

$$S_j(\mathbf{x}_d) \geq S_{jT} \quad , \quad j = 1, NR \tag{35}$$

3.3.5 Algoritmo de optimización

El procedimiento numérico propuesto (Möller et al., 2010), dentro de un dominio de \mathbf{x}_d , se resume en los siguientes pasos, los cuales se representan esquemáticamente en la Figura 8.

a) La búsqueda comienza desde un punto inicial, o primer “punto de anclaje” \mathbf{x}_{d0} , que es el resultado del diseño inicial de la estructura. Se evalúan los índices de confiabilidad utilizando las redes neuronales $S_f(\mathbf{x}_{d0})$ que deben satisfacer (35).

b) Se seleccionan $n = M1$ 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 una “zona de búsqueda” $X_{d0i} \pm R1$ (BUD(i)-BLD(i)). 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, esta combinación pasa a ser el nuevo punto de anclaje y el proceso se reinicia.

c) Si entre las $M1$ combinaciones no se encuentra alguna con costo menor al del punto de anclaje, se densifica al doble la búsqueda seleccionando más combinaciones dentro de la zona de búsqueda hasta que se obtenga la primera con costo menor al del anclaje. Esta densificación tiene un límite de $M2$ combinaciones.

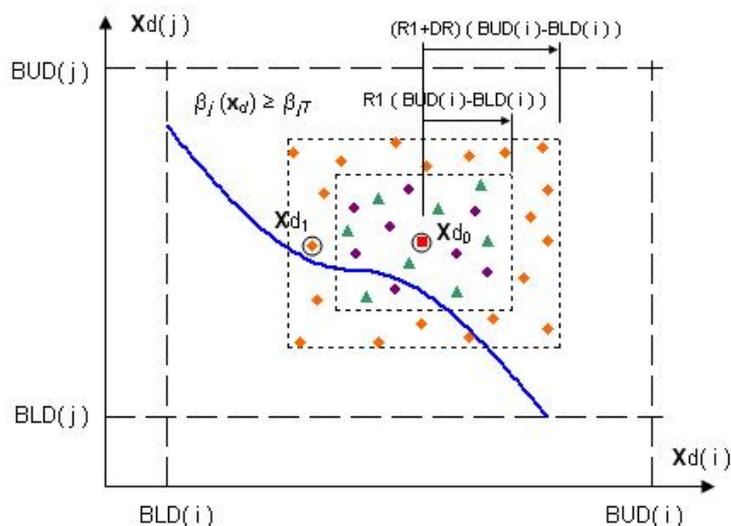


Figura 8: Esquema del algoritmo de optimización

d) Si todavía no se encuentra alguna combinación que tenga un costo menor al del anclaje, se amplía el radio de búsqueda a $R2 = R1 + DR$. Se seleccionan m combinaciones de \mathbf{x}_d en el volumen agregado, manteniendo la densidad inicial anterior, y que cumplan las restricciones de confiabilidad. La primera de las m combinaciones, con un máximo de $M2$, que tenga un costo menor al del anclaje es retenida y utilizada como el nuevo anclaje. Esta ampliación del límite de búsqueda se repite $NAMP$ veces y tiene por objetivo reducir la posibilidad de encontrar un mínimo local.

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

En esta aplicación numérica: $R1 = 0.15$, $DR = 0.05$, $M1 = 100$, $M2 = 400$, $NAMP = 3$

4 RESULTADOS NUMÉRICOS Y DISCUSIÓN

La Tabla 3 presenta los resultados numéricos para las tres variantes de estructura del edificio, considerando restricciones de confiabilidad (CRC) de acuerdo con la sección 3.3.4, y sin tener en cuenta dichas restricciones (SRC).

Resultados	Pórticos		Pórticos con disipadores		Pórticos con aisladores de base		
	CRC	SRC	CRC	SRC	CRC	SRC	
$x_d(1) = \bar{X}(3) = h_b$ [cm]	64.1	64.4	47.1	38.2	43.7	44.5	
$x_d(2) = \bar{X}(5) = h_c$ [cm]	85.4	90.2	44.0	42.6	46.0	50.5	
$x_d(3) = \bar{X}(6) = \dots_b$	0.0119	0.0111	0.0057	0.0076	0.0055	0.0072	
$x_d(4) = \bar{X}(7) = \dots'_b$	0.0104	0.0105	0.0071	0.0064	0.0110	0.0104	
$x_d(5) = \bar{X}(8) = \dots_c$	0.0184	0.0102	0.0185	0.0165	0.0255	0.0140	
$x_d(6) = \bar{X}(10) = F_y \cdot Q_d$ [KN]			1357	529	30.9	27.1	
$x_d(7) = \bar{X}(11) = K_d$ [KN/cm]			22701	8962	295	317	
Operacional ($T = 1.276$)	$1(\mathbf{x}_d)$	2.097	1.988	2.546	2.607	1.679	1.595
	$2(\mathbf{x}_d)$	2.087	2.101	2.316	1.803	2.477	2.453
	$3(\mathbf{x}_d)$			1.372	-0.432	2.679	2.170
Seguridad vidas ($T = 2.326$)	$4(\mathbf{x}_d)$	3.039	2.987	4.149	3.927	2.877	2.837
	$5(\mathbf{x}_d)$	2.538	2.528	2.951	3.004	2.545	2.681
	$6(\mathbf{x}_d)$					2.759	2.624
Colapso ($T = 3.09$)	$7(\mathbf{x}_d)$	3.847	3.764	9.903	6.600	3.263	3.397
	$S_8(\mathbf{x}_d)$	3.101	2.940	3.876	3.904	3.163	3.351
	$S_9(\mathbf{x}_d)$					4.309	2.842
Costo inicial estruc [USD]	186530	177500	106790	93944	147670	146560	
Costo inicial,control[USD]			113796	65770	26115	26115	
Total inicial $C_0(\mathbf{x}_d)$ [USD]	1191723	1182693	1225779	1164907	1178978	1177868	
Costo repar estruc [USD]	553	397	78	427	61	125	
Costo repar control [USD]			1642	24437	36	34	
Costo rep no estruct [USD]	62144	31970	125	223	6569	7336	
Costo rep contenido [USD]	16215	16007	10277	10533	5452	6169	
Costo social $C_S(\mathbf{x}_d)$ [USD]	4368	3578	1141	5361	679	1424	
Costo total $C(\mathbf{x}_d)$ [USD]	1275002	1234645	1239042	1205888	1191775	1192949	

Tabla 3: Resultados de la optimización [USD]

Estos resultados servirán de base de comparación para analizar la sensibilidad de los resultados frente a la influencia de variaciones en las variables que intervienen en la estructura de costos.

4.1 Sensibilidad frente a costos iniciales

Como es habitual todavía en los análisis de costos, sólo se tienen en cuenta los costos iniciales. Los resultados se presentan en la Tabla 4. Cuando se imponen restricciones de confiabilidad, es equivalente en forma aproximada a cumplir con los factores de seguridad de los reglamentos. Cuando no se consideran restricciones de confiabilidad, la optimización tendería a costo nulo con dimensiones nulas, pero se impone como límite que el sistema soporte las cargas permanentes y sobrecargas de uso, sin acción sísmica, con los factores de seguridad del reglamento.

Resultados	Pórticos		Pórticos con disipadores		Pórticos con aisladores de base		
	CRC	SRC	CRC	SRC	CRC	SRC	
$x_d(1) = \bar{X}(3) = h_b$ [cm]	53.9	38.2	52.2	41.3	48.5	37.9	
$x_d(2) = \bar{X}(5) = h_c$ [cm]	51.0	43.5	42.5	55.8	45.0	47.2	
$x_d(3) = \bar{X}(6) = \dots_b$	0.0107	0.0052	0.0077	0.0066	0.0049	0.0062	
$x_d(4) = \bar{X}(7) = \dots'_b$	0.0115	0.0095	0.0046	0.0094	0.0074	0.0103	
$x_d(5) = \bar{X}(8) = \dots_c$	0.0324	0.0099	0.0191	0.0177	0.0252	0.0092	
$x_d(6) = \bar{X}(10) = F_y - Q_d$ [KN]			625	73.5	41.2	99.2	
$x_d(7) = \bar{X}(11) = K_d$ [KN/cm]			5798	1173	297	428	
Operacional ($T = 1.276$)	$1(\mathbf{x}_d)$	1.737	1.426	2.501	1.933	1.806	1.346
	$2(\mathbf{x}_d)$	1.970	1.806	1.975	1.847	2.376	1.917
	$3(\mathbf{x}_d)$			1.338	-2.011	3.694	4.164
Seguridad vidas ($T = 2.326$)	$4(\mathbf{x}_d)$	2.601	2.145	3.652	3.004	2.794	2.106
	$5(\mathbf{x}_d)$	2.470	2.242	2.598	2.374	2.511	2.004
	$6(\mathbf{x}_d)$					2.494	3.553
Colapso ($T = 3.09$)	$7(\mathbf{x}_d)$	3.092	2.509	5.703	3.143	3.198	2.594
	$S_8(\mathbf{x}_d)$	3.101	2.684	3.590	2.885	3.186	2.758
	$S_9(\mathbf{x}_d)$					3.619	2.365
Costo inicial estruc [USD]	146620	89204	112510	113890	149400	126380	
Costo inicial,control[USD]			86105	28414	26115	30080	
Total inicial $C_0(\mathbf{x}_d)$ [USD]	1151813	1094397	1203802	1147501	1180708	1161653	

Tabla 4: Resultados de la optimización con costos iniciales solamente [USD]

Para la estructura de pórticos (sin control) se observa que las dimensiones, cuantías y costos iniciales son menores que cuando se consideran todos los costos (Tabla 3). Los costos de reparación y sociales crecen rápidamente, y entonces en la solución óptima las dimensiones y cuantías son mayores para tener menos daños. La tendencia es igual para las estructuras con control, pero con menores diferencias entre los resultados de Tablas 3 y 4.

Cuando se consideran todos los costos, Tabla 3, la solución más económica es con aisladores, luego con disipadores y la más costosa es la de pórticos sin control, con diferencias máximas cercanas a 6%. La situación es inversa cuando sólo se tienen en cuenta los costos

iniciales, siendo la de menor costo la solución con pórticos sin control, también con diferencias máximas de 6%. Resulta evidente la importancia de considerar todos los componentes de costo (LCC) en el análisis de optimización.

4.2 Sensibilidad frente a costos de los dispositivos de control

El costo de los dispositivos de control, disipadores y aisladores de base, presenta importantes incertidumbres debido al posible costo de patente, costo de importación, ó si se utilizan elementos libres de patentes y de fabricación local.

Se analizan los resultados de la optimización variando los costos de los dispositivos de control desde la mitad y hasta el doble de los valores originales utilizados para la Tabla 3. Se considera la situación sin restricciones de confiabilidad para evidenciar mejor la influencia en los resultados de la optimización.

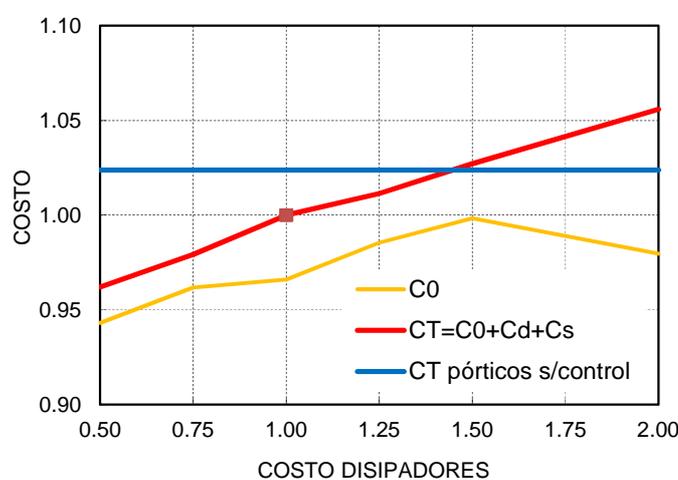


Figura 9: Influencia del costo de disipadores

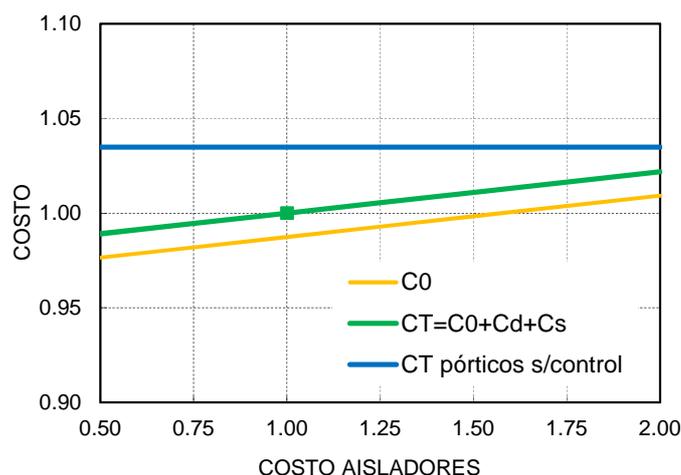


Figura 10: Influencia del costo de aisladores de base

La influencia del costo de los disipadores se presenta en la Figura 9. Las proporciones del costo inicial $C_0(\mathbf{x}_d)$ (26) frente al costo total $C_T(\mathbf{x}_d)$ (18) varían porque las soluciones óptimas en cada caso son diferentes. Para elevado costo de los disipadores, en la solución óptima resultan disipadores de menor capacidad pero admitiendo más daños y costos sociales. Se

representa también el costo total de la estructura de pórticos sin control que resulta 2.4% mayor que la solución con disipadores al costo de referencia, ver Tabla 3, que permite limitar el incremento del costo de los dispositivos manteniendo el costo total por debajo de la solución sin control.

La influencia del costo de los aisladores de base se presenta en la Figura 10. En todos los casos se obtienen los mismos valores de \mathbf{x}_d en la solución óptima, luego sólo se incrementa el costo de los aisladores. Debido a que el costo de reparación por daños y costo social es muy pequeño, ver Tabla 3, la diferencia entre $C_0(\mathbf{x}_d)$ y $C_T(\mathbf{x}_d)$ se mantiene casi constante. La solución sin control resulta $C_T(\mathbf{x}_d)$ 3.4% mayor, y en este ejemplo se debería aumentar todavía un poco más el costo de los aisladores para superar el costo total de la estructura sin control.

4.3 Sensibilidad frente a variables en costo por daños

Muchas variables intervienen en el costo por daños debido a la ocurrencia de terremotos, modelizada como un proceso de Poisson, que son adoptadas con “juicio ingenieril”. Es de interés analizar la influencia de sus posibles variaciones.

4.3.1 Influencia del tiempo de vida útil T_D

En el análisis inicial se consideró $T_D = 100$ años. Ahora se estudia la variación en los resultados para $T_D = 50$ y 75 años. En la Figura 11 se presentan la influencia sobre costos de reparación por daños $C_d(\mathbf{x}_d)$ (33) más costos sociales $C_S(\mathbf{x}_d)$ (34) en forma comparativa para las tres variantes de estructura, tomando como referencia la solución sin control.

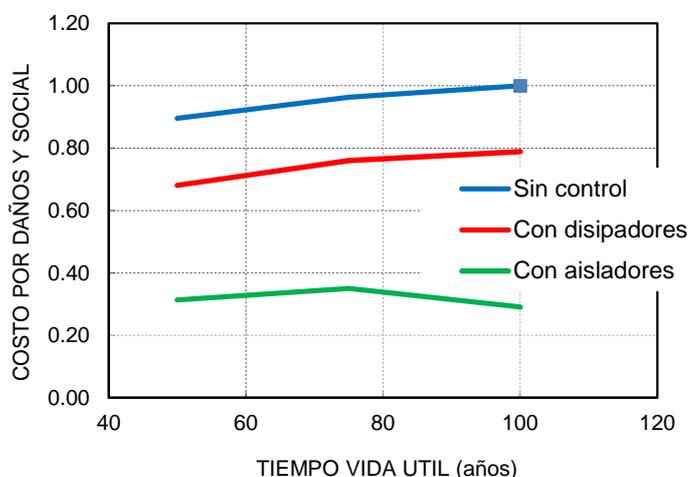


Figura 11: Influencia del tiempo de vida útil en costos por daños y sociales

La tendencia es que a menor cantidad de años, que significa menor probabilidad en la cantidad de terremotos, los costos de reparación y costos sociales disminuyen. En la estructura con aisladores, para $T_D = 100$ años la solución óptima se modifica ligeramente (valores de los parámetros de diseño) resultando diferentes proporciones entre costos iniciales y costos por daños y sociales. También se observa el mejor comportamiento estructural de las soluciones con control, especialmente con aisladores de base, porque presentan menores costos de reparación y sociales que la solución sin control.

La influencia en el costo total se muestra en la Figura 12. El porcentaje de variación es mínimo en cada solución estructural. También se observa gráficamente, ver valores en Tabla 3, que la solución más económica es la de pórticos con aisladores de base.

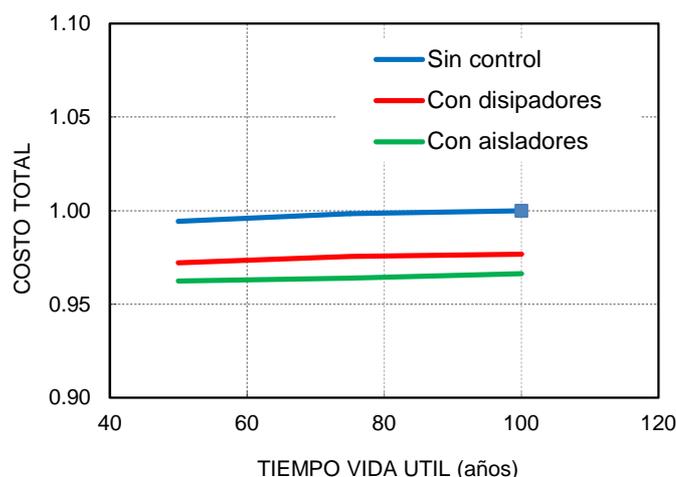


Figura 12: Influencia del tiempo de vida útil en costos totales

4.3.2 Influencia de parámetros en la función daños de elementos no estructurales

El costo de los elementos no estructurales es importante en el costo total, entonces es de interés analizar la influencia de los parámetros de la función $C_{f,4}$ (DISTM) mostrada en la Figura 5. El parámetro estudiado es γ_6 que representa el porcentaje de elementos dañados para distorsión de piso 0.015, aproximadamente nivel seguridad de vidas. El análisis inicial se consideró $\gamma_6 = 0.40$, y ahora se estudian los cambios en los resultados para 0.20 y 0.60. Los resultados se presentan en la Figura 13.

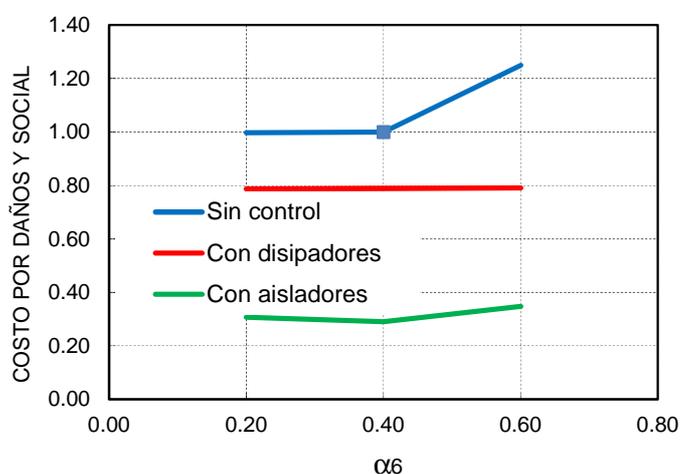


Figura 13: Influencia de γ_6 de elementos no estructurales en costos por daños y sociales

Se observa influencia significativa para la estructura sin control, mientras que las diferencias son casi imperceptibles para las soluciones con control. Se debe a que los costos por daños y sociales son pequeños en los casos con disipadores y aisladores, como se describió en Figura 11, y entonces variaciones sobre valores pequeños pasan casi inadvertidas.

La influencia sobre el costo total de muestra en la Figura 14, donde nuevamente se observa alguna influencia solo para la estructura sin control.

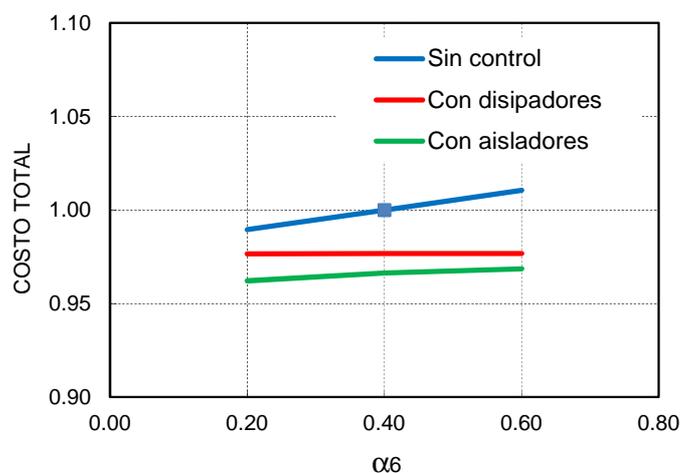


Figura 14: Influencia de r_6 de elementos no estructurales en costos totales

4.4 Sensibilidad frente a costos sociales

Las componentes de costos sociales $C_S(\mathbf{x}_d)$ (34) presentan fuertes incertidumbres en los costos de reinserción laboral, tratamiento médico, rehabilitación de víctimas, indemnización por muertes, etc., dependiendo de circunstancias y legislación vigente en el lugar. Se analiza la influencia debido a las variaciones de costos sociales hasta 300% de los valores considerados para los resultados iniciales presentados en Tabla 3.

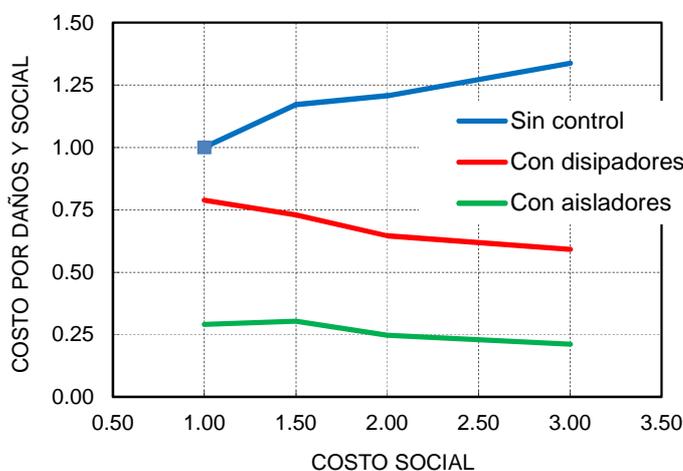


Figura 15: Influencia relativa de costos sociales

La Figura 15 muestra los resultados de costos de reparación por daños y costos sociales de la solución óptima para cada tipo de estructura, en función de los costos sociales. Son valores relativos referidos a la solución de estructura sin control. La Figura 16 presenta los resultados de costos totales de las soluciones óptimas en cada caso.

La solución óptima de costo total mínimo de la estructura sin control presenta incrementos importantes en los costos por daños y sociales, pero con aumento de solo 30% cuando los costos sociales aumentan 300%, incrementándose los costos iniciales para reducir daños. Ese intercambio entre costo inicial y costo por daños y sociales permite mantener el costo total con un pequeño incremento de apenas 1% como se observa en Figura 16.

Diferente comportamiento se observa en las estructura con control, donde el aumento de

costo social produce un incremento en el costo inicial de la estructura para disminuir el costo por daños y costo social en la solución óptima. Se logra así mantener el costo total en la solución con disipadores e incrementar en sólo 0.5% en la solución con aisladores de base.

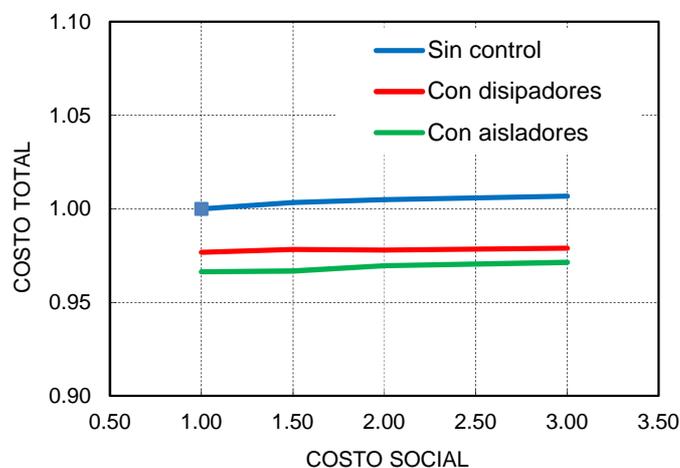


Figura 16: Influencia de costos sociales en costos totales

5 CONCLUSIONES

En este trabajo se presenta el proceso de optimización de una construcción, donde la función objetivo a minimizar es el costo total que incluye los costos iniciales de la estructura, de los elementos no estructurales y del contenido, los costos de reparación por daños en todos ellos y los costos sociales producidos por la ocurrencia de terremotos durante la vida útil.

La estrategia numérica de organizar el proceso por bloques resulta eficiente porque permite realizar en forma independiente los análisis numéricos de la estructura para diferentes combinaciones de las variables y su aproximación con redes neuronales, como así también los análisis de confiabilidad. Luego se pueden utilizar diferentes condiciones para realizar la optimización, procesando solamente el bloque final.

Se realizó el análisis numérico sobre un edificio de 4 pisos para oficinas, estudiándose la sensibilidad de algunas de las variables que intervienen en la función de costo a minimizar. Las principales conclusiones a destacar son:

- Es de gran importancia considerar todos los componentes de costo (LCC) en la optimización, es decir costos de reparación por daños y costos sociales y no solamente el costo inicial, para elegir la solución estructural más conveniente.
- Frente a la importante incertidumbre del costo de los dispositivos de control, con el esquema numérico presentado se puede obtener el límite de costo de los dispositivos hasta donde es conveniente utilizarlos.
- La sensibilidad de variables de las funciones de costo por daños y de costos sociales tienen impacto en la solución óptima, redistribuyendo valores entre costo inicial y costos por daños y sociales, pero con escasa influencia en el costo total.

REFERENCIAS

- FEMA 356, Prestandard and commentary for the seismic rehabilitation of buildings. *American Society of Civil Engineers (ASCE), Federal Emergency Management Agency*, 2000.
- Gencturk, B. and Elnashai, A.S. Life cycle cost considerations in seismic design optimization of structures. *Structural Seismic Design Optimization and Earthquake Engineering: Formulations and Applications*, Ed. Vagelis Plevris, Chapter 1, 1-22. IGI Global, 2012.
- Hurtado, J., *Structural Reliability – Statistical Learning Perspectives*, Lecture Notes in Applied and Computational Mechanics, Vol.17, Springer Verlag, 2004.
- INPRES-CIRSOC 103 Parte 1 Reglamento Argentino para construcciones sismorresistentes, *INTI*, 2013.
- Mendez, J. Evaluación de la vulnerabilidad sísmica de puentes existentes de hormigón armado, *Tesis de Maestría en Ingeniería Estructural*, Universidad Nacional de Tucumán, 2012.
- 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. 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*, XXIX: 1403-1421, AMCA, 2010.
- Möller, O., Foschi, R., Rubinstein, M., Savino, F. Performance-based seismic design: a search-based cost optimization with minimum reliability constraints, *Structural Seismic Design Optimization and Earthquake Engineering: Formulations and Applications*, Ed. Vagelis Plevris, Chapter 2: 23-50. IGI Global, 2012.
- Möller, O., Ascheri, J.P., Foschi, R., Rubinstein, M., Grossman, S. Métodos numéricos para optimización de estructuras sismorresistentes incluyendo costos sociales. *Mecánica Computacional*, XXXII: 829-849, 2013.
- Möller, O., Foschi, R.O., Ascheri, J.P., Rubinstein, M., Grossman, S. Optimization for performance-based design under seismic demands, including social costs, *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 14(2): 315-328, 2015.
- Paulay, T., Priestley, M.J.N. *Seismic design of reinforced concrete and masonry buildings*, John Wiley & Sons, Inc, 1992.
- 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.