

Artículo original

Distribución de energía sísmica en plantas de estructuras reforzadas con disipadores histeréticos considerando el método de balance energético

Seismic energy distribution in floor plans of structures reinforced with hysteretic dampers considering the energy balance method

Wilber Percy Mendoza Ramirez¹

 <https://orcid.org/0000-0002-8960-1835>

Edwin Martin Pino Vargas²

 <https://orcid.org/0000-0001-7432-4364>

Recibido: 30/05/2025

Aceptado: 10/07/2025

Publicado: 24/07/2025

¹Doctorado en Ingeniería Civil, Escuela Universitaria de Posgrado, Universidad Nacional Federico Villareal, Lima, Perú

²Departamento académico de Ingeniería Civil - Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann, Tacna, Perú

E-mail: ¹2019322687@unfv.edu.pe, ²epinov@unjbgr.edu.pe



Esta obra está bajo licencia internacional Creative Commons Reconocimiento 4.0



Facultad de Ingeniería
Publicación Oficial

Resumen

En regiones altamente sísmicas, muchas edificaciones carecen de mecanismos modernos de disipación de energía, lo que incrementa su vulnerabilidad. Por tanto, la investigación tuvo el objetivo de analizar la distribución de energía sísmica en los diferentes niveles de estructuras prototipo de 3, 6 y 9 niveles, reforzadas con disipadores histeréticos del tipo CRP, utilizando el método de balance energético. Se determinaron inicialmente las curvas de capacidad de cada estructura aplicando análisis pushover no lineal; posteriormente, los modelos fueron reforzados y evaluados mediante dos tipos de análisis dinámico no lineal: el primero, con tres sismos escalados al nivel de diseño, evidenció una importante reducción de las distorsiones tras el refuerzo; el segundo, con 25 registros sísmicos escalados hasta el umbral de colapso, permitió evaluar la acumulación y distribución de la energía disipada en cada planta. El procesamiento de las historias de desplazamiento y fuerza cortante, junto con la integración numérica de las curvas histeréticas, permitió determinar los porcentajes de energía absorbida por planta. Los resultados muestran que la mayor proporción de la energía sísmica se disipa en los niveles inferiores: en la estructura de 3 niveles, la planta 1 absorbe el 69,88 % de la energía; en la de 6 niveles, la planta 1 absorbe el 40,04 %; y en la de 9 niveles, la planta 1 absorbe el 54,82 %. Estos hallazgos subrayan la necesidad de priorizar el refuerzo y la disipación en las plantas bajas para mejorar la resiliencia estructural ante sismos severos.

Palabras clave: curvas de resistencia; balance de energía; distribución de energía.

Abstract

In highly seismic regions, many buildings lack modern energy dissipation mechanisms, increasing their vulnerability. Therefore, this research aimed to analyze the distribution of seismic energy across the different levels of prototype structures with 3, 6, and 9 stories, retrofitted with CRP-type hysteretic dampers, using the energy balance method. The capacity curves of each structure were initially determined using nonlinear pushover analysis; subsequently, the retrofitted models were evaluated with two types of nonlinear dynamic analyses. The first, using three ground motions scaled to the design level, showed a significant reduction in distortions after retrofitting. The second, with 25 ground motion records scaled up to the collapse threshold, allowed an assessment of the accumulation and distribution of dissipated energy on each floor. The processing of displacement and shear force histories, together with the numerical integration of hysteretic curves, enabled the determination of the energy absorption percentages per floor. The results show that the greatest portion of seismic energy is dissipated in the lower stories: in the 3-story structure, the first story absorbs 69.88 % of the energy; in the 6-story structure, the first story absorbs 40.04 %; and in the 9-story structure, the first story absorbs 54.82 %. These findings highlight the need to prioritize retrofitting and energy dissipation on the lower stories to enhance structural resilience against severe earthquakes.

Keywords: capacity curves; energy balance; energy distribution.



1. Introducción

La distribución de la energía sísmica en estructuras reforzadas con disipadores histeréticos es un área crucial de estudio en la ingeniería sísmica, centrándose en la respuesta de los edificios a las fuerzas sísmicas durante un evento. Dado que los métodos tradicionales de diseño sísmico basados en la fuerza han demostrado generar una distribución desigual de los daños y un rendimiento inadecuado ante fuertes movimientos del terreno, ha cobrado importancia un enfoque basado en la energía. Este cambio resalta la importancia de los mecanismos de disipación de energía, como los amortiguadores histeréticos, que absorben energía mediante deformaciones inelásticas, mejorando así la resiliencia y la seguridad de una estructura durante los terremotos (Donaire-Ávila, 2023; Gholami y Askariani, 2023; Zeynep y Fatih, 2017).

Investigaciones recientes indican que la distribución óptima de la energía sísmica entre los componentes estructurales puede mejorar el rendimiento y minimizar los daños. Al analizar los componentes energéticos, como la deformación elástica, la energía cinética y la energía histéresis, los ingenieros pueden desarrollar metodologías de diseño más eficaces que prioricen la disipación uniforme de energía en los diferentes niveles del edificio (Shoki y Takewaki, 2020; Kim et al., 2025; Filiatrult y Tinawi, 1992). Cabe destacar que estudios han demostrado que la integración de amortiguadores histéresis no solo reduce los desplazamientos estructurales, sino que también facilita una distribución más uniforme de la energía, mitigando los riesgos asociados a eventos sísmicos (Abarkane et al., 2019; Fong et al., 2016; Katayama et al., 2016).

Estudios de caso destacados han ilustrado las implicaciones prácticas de esta investigación, utilizando prototipos de estructuras de diferentes alturas para evaluar la disipación de energía en diferentes configuraciones. Los hallazgos revelan que las estructuras diseñadas con una distribución óptima de la resistencia lateral experimentan menos daños y una disipación de energía más uniforme en comparación con las que emplean diseños tradicionales. Estos resultados subrayan la importancia de adaptar los códigos de construcción para incluir evaluaciones energéticas que mejoren la resiliencia sísmica y los estándares de seguridad en las prácticas de construcción (Leelataviwat et al., 2009).

No obstante, persisten desafíos técnicos, como la confiabilidad del desempeño de los disipadores bajo condiciones extremas (por ejemplo, altas temperaturas), así como la falta de normativas específicas en varios países, incluido el Perú. La carencia o inadecuada aplicación de regulaciones quedó evidenciada en el terremoto de Turquía y Siria en febrero de 2023 (Mw 7.8), donde colapsaron edificaciones recientes que supuestamente cumplían con los estándares sismorresistentes.

En el contexto peruano, la región de Tacna se encuentra en una zona altamente sísmica, con antecedentes de eventos significativos como el terremoto del 23 de junio de 2001 (Mw 8.2) y el sismo del 13 de agosto de 1968 (Mw ~9.0), cuyo potencial de repetición genera una amenaza latente. A ello se suma que una gran proporción de edificaciones en Tacna fueron construidas sin supervisión técnica ni expedientes estructurales, lo que incrementa su vulnerabilidad frente a movimientos sísmicos intensos.

En este marco, se plantea la necesidad de implementar estrategias de refuerzo estructural mediante disipadores histeréticos. En particular, la presente investigación aplica el enfoque de balance de energía propuesto por Housner (1956) y desarrollado por Akiyama (1985), para evaluar la distribución de energía sísmica en edificaciones prototipo reforzadas. El

objetivo de la investigación fue determinar cómo se distribuye dicha energía entre los distintos niveles de estructuras reforzadas con disipadores del tipo CRP, considerando escenarios sísmicos representativos de la región Tacna en Perú.

2. Metodología

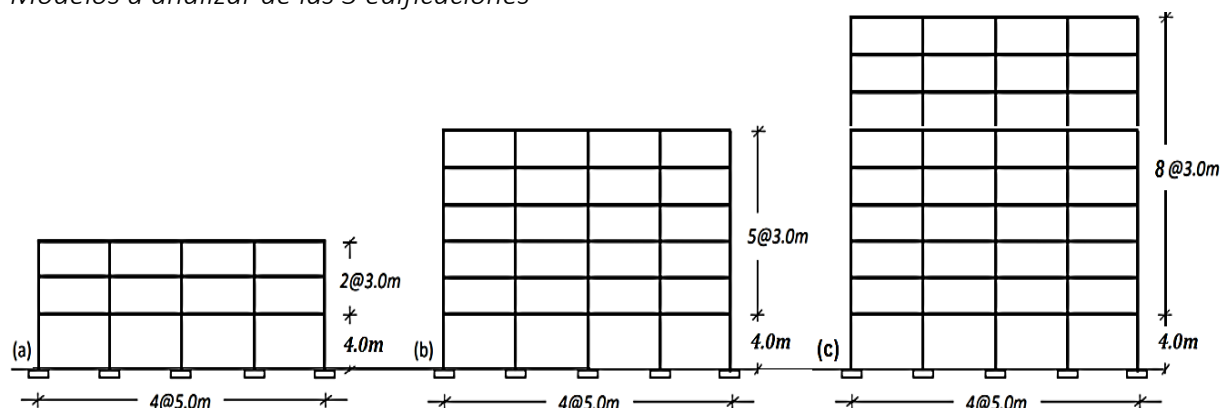
2.1. Modelos analizados

Se analizaron tres edificaciones de concreto armado de 3, 6 y 9 niveles, con sistemas estructurales aporticados, representativos de construcciones comunes en la ciudad de Tacna en Perú previas al año 2000. Las edificaciones fueron seleccionadas por su similitud con estructuras existentes como la galería Quijote o los primeros pabellones de la Universidad Privada de Tacna. Se asumió un comportamiento estructural típico de pórticos, sin cumplir necesariamente con el principio de columna fuerte-viga débil.

Para cada estructura se modeló un marco bidimensional correspondiente al eje más crítico en dirección horizontal, utilizando el software OpenSeesPy. Los elementos estructurales fueron idealizados con secciones divididas en fibras, asignando propiedades mecánicas del concreto y del acero tanto en régimen elástico como inelástico. Los modelos analizados se muestran en Figura 1.

Figura 1

Modelos a analizar de las 3 edificaciones



Nota. Cada uno de los modelos a analizar mostrados en la figura son ejes centrales de las vistas en planta de las estructuras.

Las secciones empleadas para estos pórticos de 3, 6 y 9 niveles se muestran en la siguiente Tabla 1.

Las principales propiedades mecánicas asumidas de los materiales de concreto armado de los elementos estructurales de las edificaciones son los siguientes:

- Resistencia del concreto a la compresión (f'_c): 20,60 MPa
- Peso específico del concreto (γ_c)= 23.54E-6 N/mm³



- Módulo elástico para concreto de peso normal: $E_c = 20,60$ GPa
- Resistencia del acero en el límite elástico (f_y): Grado 60 $f_y = 412$ MPa
- Módulo de elasticidad del acero (E_{ac}): 196,20 GPa
- Coeficiente de Poisson $\nu = 0,2$

Tabla 1

Secciones de elementos para modelos de 3, 6 y 9 niveles

Modelos	Elementos		Planta								
			1	2	3	4	5	6	7	8	9
3 niveles	Columnas	(mm ²)	350 x 350	350 x 350	300 x 300	-	-	-	-	-	-
	Vigas	(mm ²)	300 x 600	300 x 600	250 x 500	-	-	-	-	-	-
6 niveles	Columnas	(mm ²)	500 x 500	500 x 500	500 x 500	400 x 400	400 x 400	400 x 400	-	-	-
	Vigas	(mm ²)	300 x 600	300 x 600	300 x 600	300 x 600	300 x 600	250 x 500	-	-	-
9 niveles	Columnas	(mm ²)	600 x 600	600 x 600	600 x 600	500 x 500	500 x 500	500 x 500	400 x 400	400 x 400	400 x 400
	Vigas	(mm ²)	300 x 600	300 x 600	300 x 600	300 x 600	300 x 600	300 x 600	300 x 600	300 x 600	250 x 500

Nota. Los pórticos se refieren a edificaciones muy antiguas, donde no se respetaban el criterio de columna fuerte viga débil, tal como se ve en las secciones de la tabla.

2.2. Análisis no lineal estático o pushover

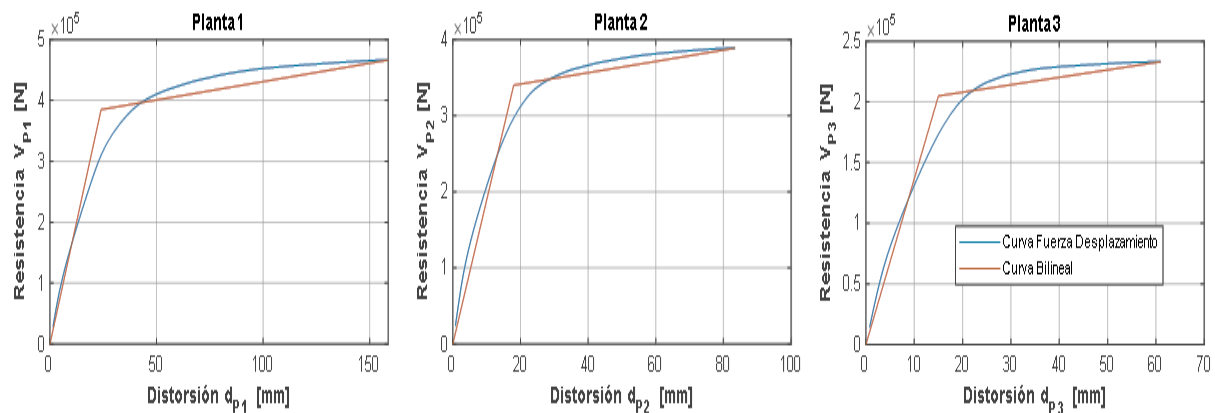
Las curvas de resistencia o de capacidad de cada estructura (fuerza de corte de la base versus desplazamiento de techo) se obtuvieron realizando un análisis No Lineal Estático o Pushover por control de desplazamientos, empleando OpenSeesPy, que es una librería de Python que ofrece una interfaz para el software de simulación estructural OpenSees (Open System for Earthquake Engineering Simulation), por Zhang (2022). Las estructuras fueron deformadas hasta considerar el desplazamiento máximo que genere el colapso de cada estructura, de forma conservadora es 0.015 de la altura total de cada edificación, según SEAOC (1995) Visión 2000.

Se aplicó un análisis estático no lineal tipo pushover mediante control de desplazamientos empleando OpenSeesPy (Zhang, 2022). La curva de capacidad (fuerza cortante de base vs. desplazamiento de techo) fue obtenida hasta alcanzar un desplazamiento objetivo correspondiente al 1,5 % de la altura total de cada edificación, de acuerdo con SEAOC (1995).

Las curvas fueron idealizadas mediante un modelo bilineal que iguala el área (energía) bajo la curva real, conforme a los lineamientos de FEMA 273 y FEMA 356 (ver figura 2).

Figura 2

Curvas fuerza desplazamiento e idealización bilineal estructura de 3 niveles



Nota. La idealización de la curva bilineal fue que ambas curvas tengan la misma energía.

Donde V_{pk} es la resistencia o fuerza cortante de cada planta, δ_{pk} es el desplazamiento relativo o distorsión de cada planta, k indica en número de planta.

2.3. Dimensionado de disipadores CRP

Los disipadores histeréticos tipo CRP fueron dimensionados siguiendo los criterios de Benavent (2024), basados en la metodología de Housner (1956)-Akiyama (1985). Se asumió un comportamiento elastoplástico perfecto para los disipadores, y se establecieron las siguientes condiciones:

- El desplazamiento de fluencia del disipador debe ser $\leq 40\%$ del desplazamiento de fluencia de la estructura principal (EP).
- La resistencia máxima del disipador en cada planta debe ser inferior a la de la estructura principal.
- La rigidez inicial del disipador debe ser mayor que la rigidez de la EP.

Con estos criterios se elabora la Tabla 2 y se pueden obtener la curva de resistencia de la estructura mixta EM, EP y ED, también la resistencia máxima y rigidez elástica de la estructura principal EP se pueden visualizar en las curvas de resistencia de la Figura 3.



Tabla 2

Dimensionado de resistencia de ED para modelo 3 niveles

Planta	m_k (N s ² /mm)	M	h_k (mm)	d_{rk} (mm)	$V_{pyk, MPC}$ (N)	d_{pyk} (mm)	V_{pyk} (N)	K_{pk}
1	85,79	247,46	4000,00	159,00	466320	24,00	385000	16041,67
2	85,05		3000,00	83,00	388600	18,00	340000	18888,89
3	76,62		3000,00	61,00	233160	15,00	205000	13666,67

Planta	$d_{dyk} \leq 0,4 d_{pyk}$	$V_{dyk} \leq V_{pyk, MPC}$	K_{dk}
1	9,60 OK	360000 OK	37500,00
2	7,20 OK	260000 OK	36111,11
3	6,00 OK	162000 OK	27000,00

Planta	θ°	$K_{dk}/(\cos\theta^\circ)^2$	$V_{dyk}/\cos\theta^\circ$	N° disp,	K_{Dk} (N/mm)	V_{Dk} (N)	K_k (N/mm)
1	38,66	61500,33	461026	2,00	30750	230513	53541,67
2	30,96	49107,25	303198	2,00	24554	151599	55000,00
3	30,96	36717,11	188915	2,00	18359	94458	40666,67

$T_1 =$	0,487	s
---------	--------------	---

Nota. El periodo fundamental es 0,487 s.

Se consideró que la EM tenga una distribución de resistencia optima y este criterio se realiza empleando las siguientes ecuaciones.

El coeficiente de distribución resistencia lateral optima $\bar{\alpha}_{k,opt}$ de cada planta se determina con las ecuaciones:

$$\bar{m}_k = \sum_{j=k}^N \frac{m_j}{M} \quad (1)$$

$$\bar{\alpha}_{k,opt} = 1 + \left[\frac{1}{\sqrt{\bar{m}_k}} - \bar{m}_k \right] \cdot \frac{2T_1}{1+3T_1} \quad (2)$$

Donde m_j es la masa de cada planta, M la masa total de la estructura, el $\bar{m}_k$ es un coeficiente de la relación del sumatorio de masas por encima de la planta k.

El coeficiente de distribución resistencia lateral de la estructura $\bar{\alpha}_k$ de cada planta se determina con las ecuaciones:

$$\alpha_k = \frac{(V_{pyk} + V_{dyk})}{\bar{m}_k \cdot M \cdot g} \quad (3)$$

$$\bar{\alpha}_k = \frac{\alpha_k}{\alpha_1} \quad (4)$$

Donde α_k es el coeficiente de resistencia lateral de cada planta, g es la aceleración de la gravedad. La distribución de resistencia óptima para EM de 3 niveles, se presenta en Tabla 3.

Tabla 3

Distribución de resistencia optima estructura 3 niveles

Coeficiente de resistencia optima			Coeficiente de resistencia de 3N		
Planta	$\bar{m}_k$	$\bar{\alpha}_{k,opt}$	α_k	$\bar{\alpha}_k$	
1	1,00	1,00	0,31	1,00	100%
2	0,65	1,23	0,38	1,23	100%
3	0,31	1,59	0,49	1,59	100%

Nota. En la tabla se verifica que la distribución de resistencia de la estructura $\bar{\alpha}_k$ es 100% equivalente a la distribución de resistencia optima $\bar{\alpha}_{k,opt}$.

Según Velasco (2021), se dimensiona las secciones de los disipadores CRP, realizando una aproximación a la rigidez del disipador de cada nivel K_{Dk} , para esto se emplean las ecuaciones y parámetros ya definidos en acápite 2.8.1, los cálculos se insertan en la Tabla 4.

$$K_{CRP} = f_k \frac{A_c E}{L_w} \quad (5)$$

$$f_k = \frac{1}{\gamma + \eta (1 - \gamma)} \quad (6)$$

Tabla 4

Dimensionado de los disipadores CRP para 3 niveles

Planta	K_{Dk} (N/mm)	γ	A_c (mm ²)	A (mm ²)	η	f_k	L_w (mm)	E (Mpa)	K_{CRP} (N/mm ²)
1	30750	0,60	875	1750	0,500	1,25	6400	180000	30762
2	24554	0,60	625	1375	0,455	1,28	5830	180000	24682
3	18359	0,60	500	900	0,556	1,22	5830	180000	18775

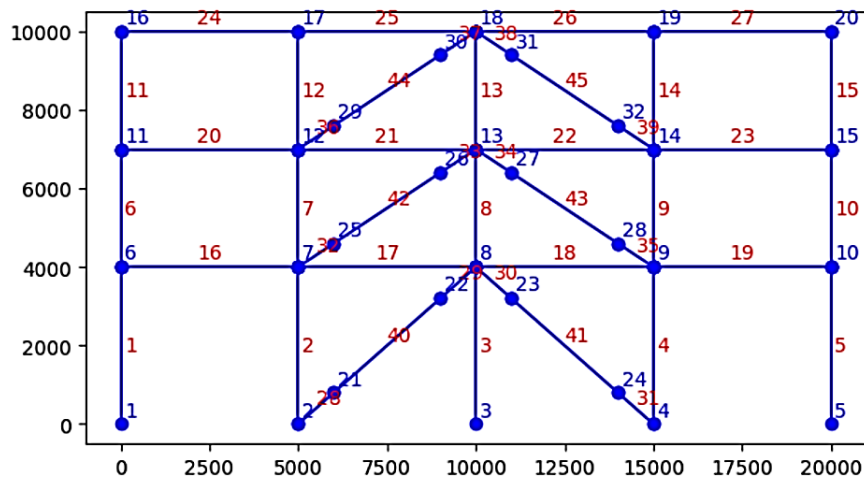
Nota. En la tabla la rigidez del disipador CRP, K_{CRP} es aproximadamente lo mismo que la rigidez requerida para los disipadores K_{Dk} , para una distribución optima de resistencia.

Dimensionado los disipadores CRP y verificado que la estructura EM tiene una distribución de resistencia optima en cada una de sus plantas, se idealiza la nueva estructura mixta, el cual se observa en la Figura 4.



Figura 3

Modelo de EM de 3 niveles definida en OpenSeesPy



Nota. Las secciones de los disipadores CRP tienen diferente sección para cada nivel.

El procedimiento para el dimensionado de los disipadores CRP y verificación que la estructura EM tiene una distribución de resistencia optima en cada una de sus plantas, para las estructuras de 6 y 9 niveles, fue el mismo que se realizó en párrafos anteriores.

2.4. Selección de registros sísmicos

Se seleccionaron 25 registros sísmicos con magnitud superior a 6.0 Mw, provenientes del repositorio del CISMID. Ante la limitación de registros locales en Tacna, se incluyeron registros nacionales representativos. Los sismos fueron escalados iterativamente hasta inducir deformaciones cercanas al colapso (distorsión interpisos del 1,5 %). Los sismos seleccionados se describen en la Tabla 5.

2.5 Análisis dinámico no lineal

Se realizaron dos tipos de análisis tiempo-historia no lineales:

- Con tres sismos representativos escalados al nivel de diseño (DBE), seleccionados conforme a la norma E.030 (2018) y ASCE/SEI 7-22 (2022), considerando factores de escala entre 0,4 y 2,5
- Con los 25 registros seleccionados, escalados progresivamente hasta alcanzar el umbral de colapso estructural

Las respuestas estructurales (desplazamientos, fuerzas cortantes y curvas histeréticas planta por planta) fueron registradas para calcular la energía disipada mediante integración numérica (regla del trapecio).

Este aspecto permitió comparar la energía acumulada en cada planta bajo diferentes condiciones sísmicas, y verificar la distribución de energía frente a las predicciones teóricas propuestas por Akiyama (1985).

Tabla 5

Registros sísmicos escalados al colapso de estructuras

Item	Estación	Fecha	Magnitud (Mw)	Componente	dt (s)	T pred, (s)	Profundidad (km)	Dist, Epicentral (km)	PGA (mm/s ²)	PGA (g)
1	Lima PRQ	31-Ene-51	6,2	E-O	0,020	0,064	50,00	19,63	603,50	0,062
2	Lima PRQ	17-Oct-66	8,1	N-S	0,020	0,329	24,00	236,53	2682,40	0,273
3	Lima PRQ	31-May-70	7,9	E-O	0,020	0,293	64,00	361,60	1050,50	0,107
4	Lima PRQ	3-Oct-74	7,9	E-O	0,020	0,302	13,00	112,77	1942,10	0,198
5	Moquegua MOQ001	23-Jun-01	8,2	E-O	0,010	0,961	33,00	327,12	2951,50	0,301
6	Tacna TAC001	7-Jul-01	7,6	N-S	0,010	2,308	33,00	165,90	404,20	0,041
7	Tacna TAC001	13-Jun-05	7,8	N-S	0,005	0,053	146,00	178,96	941,80	0,096
8	Tacna TAC002	13-Jun-05	7,8	E-O	0,005	0,347	146,00	180,66	1191,10	0,121
9	Lima LIM001	15-Ago-07	7,9	E-O	0,005	0,274	40,00	187,09	738,90	0,075
10	Tacna TAC001	5-May-10	6,6	N-S	0,005	0,170	36,00	133,55	1900,00	0,194
11	Tacna TAC002	5-May-10	6,6	N-S	0,005	0,314	36,00	106,56	1040,00	0,106
12	Tacna TAC002	2-Abr-11	6,1	E-O	0,005	0,271	83,00	211,64	64,10	0,007
13	Tacna TAC002	7-Jun-12	6,2	E-O	0,005	0,260	110,00	350,67	72,40	0,007
14	Lima LIM002	25-Set-13	6,9	E-O	0,005	0,251	37,00	521,86	35,60	0,004
15	Tacna TAC001	23-Mar-14	6,4	E-O	0,005	0,167	45,00	204,50	93,20	0,010
16	Tacna TAC002	23-Mar-14	6,4	E-O	0,005	0,373	45,00	207,37	65,60	0,007
17	Tacna TAC001	1-Abr-14	8,2	E-O	0,005	0,493	38,90	185,63	724,90	0,074
18	Tacna TAC002	1-Abr-14	8,2	E-O	0,005	0,376	38,90	188,51	712,90	0,073
19	Tacna TAC002	11-Feb-15	6,7	N-S	0,005	0,630	190,00	683,77	18,10	0,002
20	Tacna TAC004	24-Jun-17	6,2	E-O	0,005	0,296	100,00	433,46	28,10	0,003
21	Lima UNFV	29-Nov-17	5,8	N-S	0,005	0,295	12,00	287,06	8,00	0,001
22	Tacna TAC004	14-Ene-18	6,8	N-S	0,005	0,529	48,00	539,10	63,60	0,006
23	Tacna TAC001	26-May-22	6,9	N-S	0,005	0,015	240,00	359,09	166,80	0,017
24	Ica UNICA	28-Jun-24	7,0	N-S	0,005	0,745	42,00	249,85	523,60	0,053
25	Ica SCICA	5-Nov-24	6,0	N-S	0,005	0,638	139,00	101,22	366,30	0,037

Nota. Las magnitudes sombreadas están en magnitud M_L, las demás magnitudes en Mw.

3. Resultados

3.1. Análisis dinámico tiempo - historia

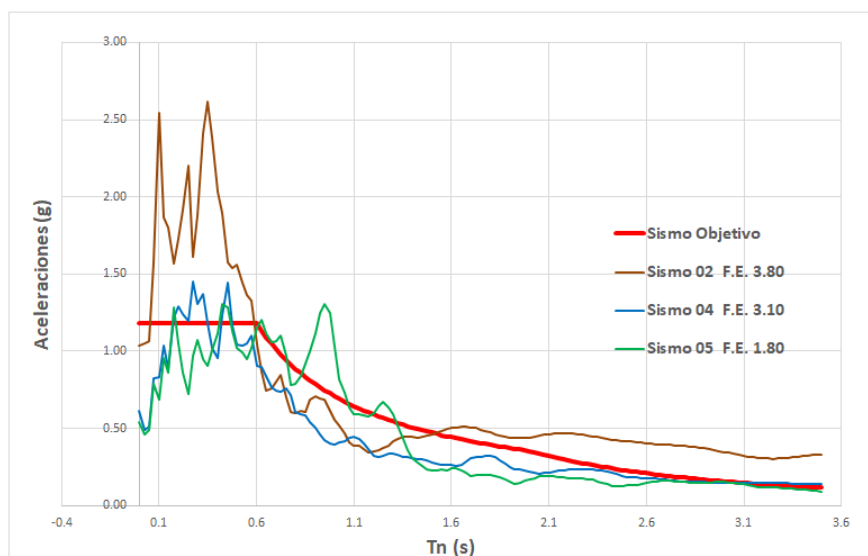
En este análisis, los registros sísmicos fueron escalados tomando en cuenta las consideraciones normativas de la E.030 (2018) y ASCE/SEI 7-22 (2022). Conforme a Wang et al. (2015) y Huang et al. (2017), el factor de escala (F.E.) se mantuvo entre 0.4 y 2.5. Para cumplir con la normativa, se seleccionaron los 3 sismos escalados cuyo F.E. se aproximaba a este rango recomendado.



El primer análisis permitió corroborar que, tras la incorporación de disipadores histeréticos tipo CRP, las estructuras reforzadas experimentaron una reducción muy significativa de las distorsiones inter-piso. Este comportamiento refleja el aumento de la capacidad de disipación y control de desplazamientos frente a solicitaciones sísmicas de diseño. Los 3 sismos válidos y escalados para llevar a cabo el análisis dinámico tipo Tiempo-Historia, y representados en sus espectros se ven en la Figura 5.

Figura 4

Espectros de sismos escalados al DBE



Nota. Los factores de escala aproximan los sismos al sismo objetivo (sismo de diseño con $R=1$).

La respuesta de las edificaciones de 3, 6 y 9 niveles, ante los sismos filtrados, se presenta en las Figura 6.

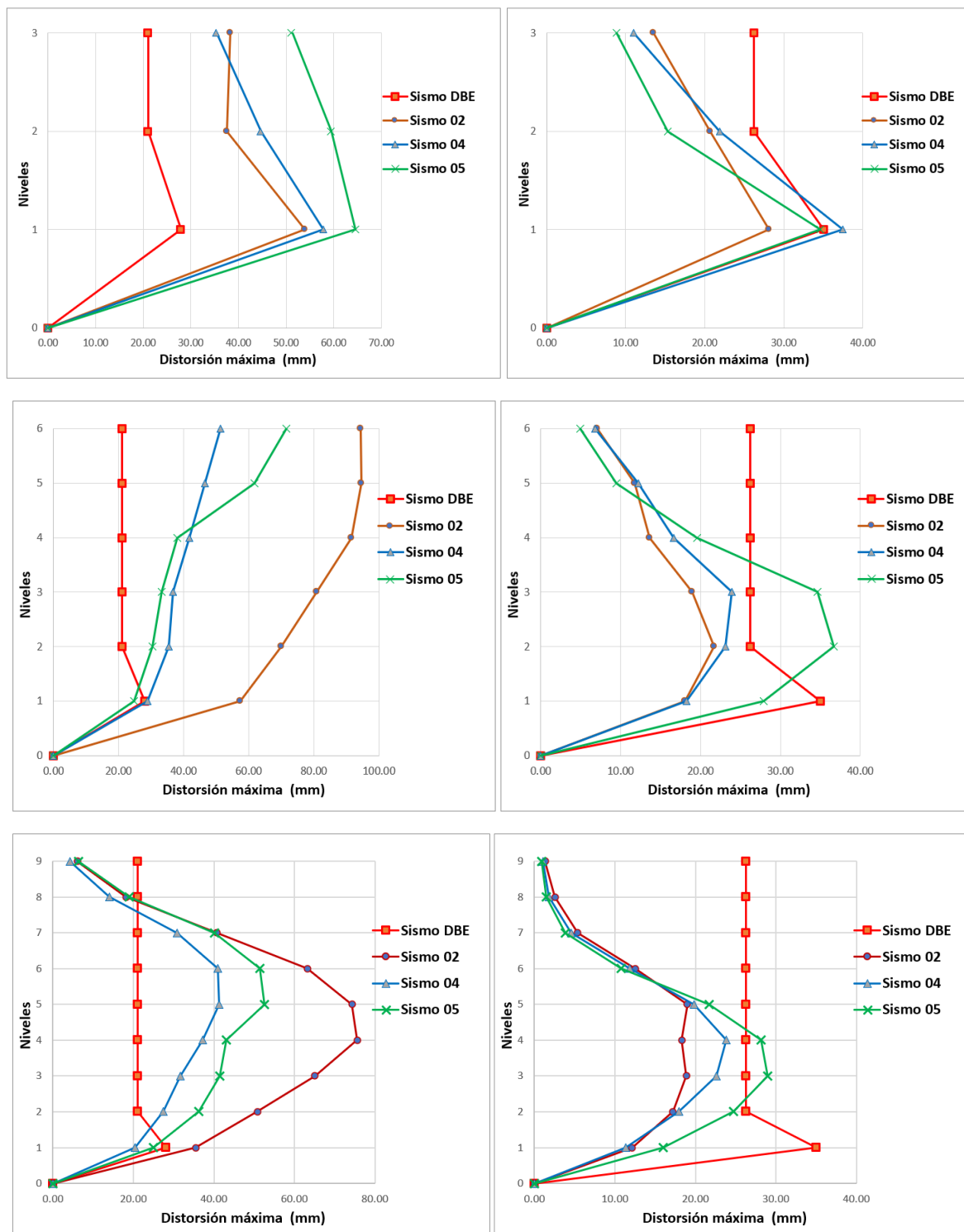
3.2. Análisis no lineal dinámico antes del colapso

En el segundo análisis, se emplearon los 25 registros sísmicos seleccionados, escalados progresivamente hasta inducir en las estructuras deformaciones cercanas al umbral de colapso (distorsión máxima de 1.5%). Para cada acelerograma, se obtuvieron las historias de desplazamiento y fuerzas de corte de cada planta, así como las curvas histeréticas, permitiendo cuantificar la energía absorbida y disipada durante la respuesta sísmica.

Un ejemplo de este análisis para la estructura EM de 3 niveles sometido al sismo 04, los resultados se visualizan en las Figura 7.

Figura 5

Distorsiones para estructuras EP y EM de 3, 6 y 9 niveles

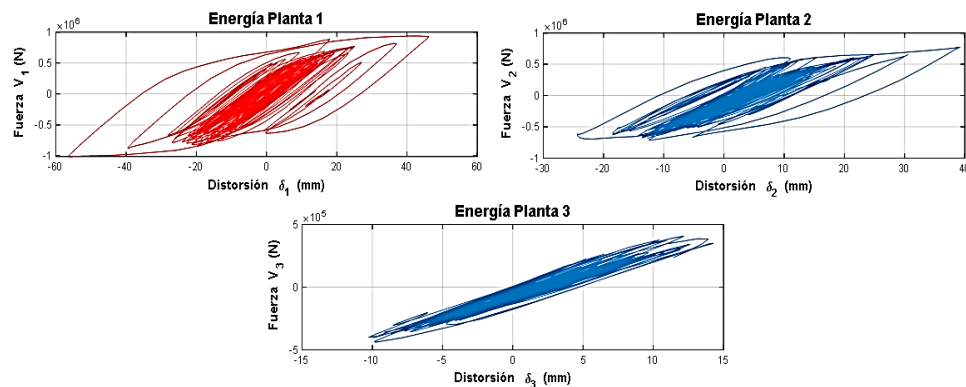


Nota. Algún sismo produce distorsiones mayores a las del sismo de diseño, pero no producirán colapso a dichas estructuras.



Figura 6

Respuesta histerética de EM de 3 niveles llevado al colapso por sismo 04



Nota. La distorsión máxima sucede en la planta 1 aproximadamente 60 mm, distorsión cerca al colapso.

3.2. Análisis de energía sísmica por planta

De acuerdo con la integración numérica de las curvas histeréticas y considerando el método de balance energético, se obtuvo la siguiente distribución promedio de energía disipada por pisos, mostrando una clara tendencia de concentración en los niveles inferiores:

Estructura de 3 niveles:

- Planta 1: 69,88 %
- Planta 2: 26,69 %

Estructura de 6 niveles:

- Planta 1: 40,04 %
- Planta 2: 28,94 %
- Planta 3: 19,94 %

Estructura de 9 niveles:

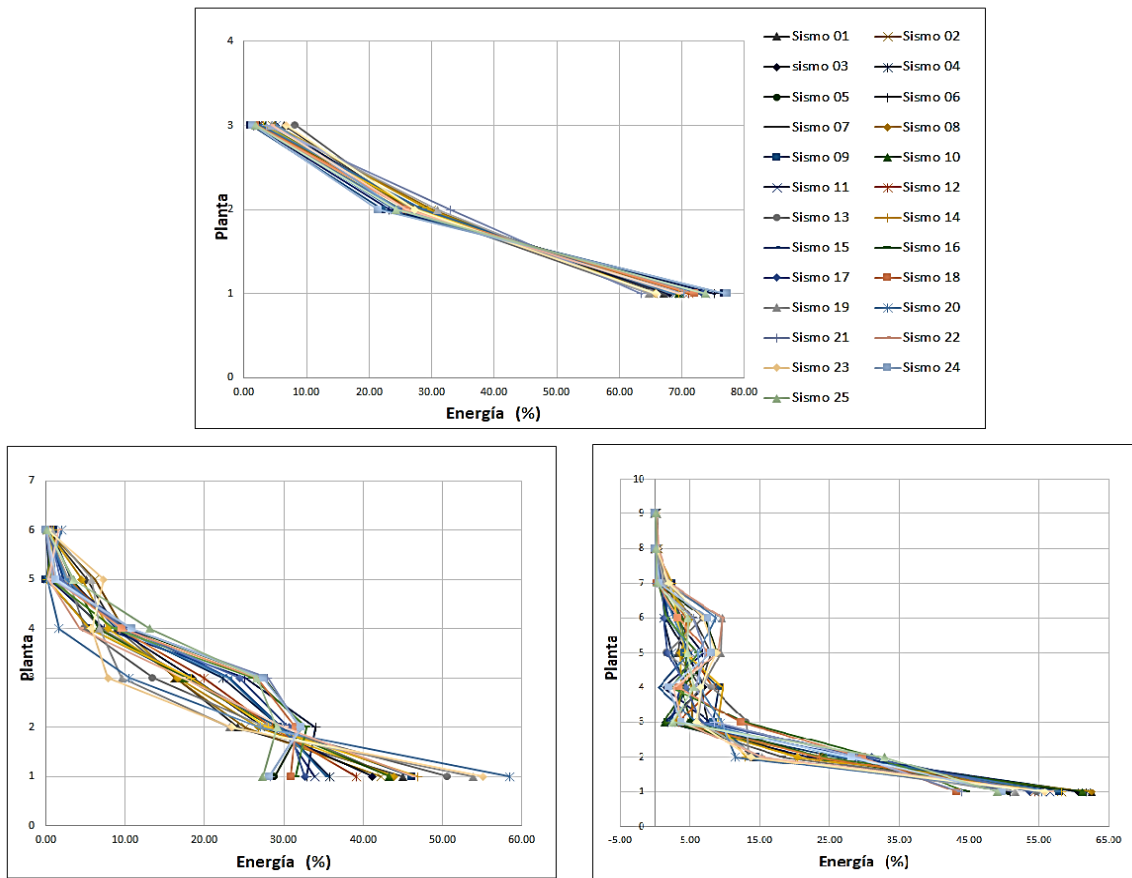
- Planta 1: 54,82 %
- Planta 2: 22,39 %

Estos resultados confirman que, independientemente de la altura del edificio, la mayor proporción de la energía sísmica es absorbida por las plantas inferiores. Este patrón se observa tanto para análisis bajo sismos de diseño como en las simulaciones con demandas extremas, y se alinea con las predicciones teóricas de Akiyama (1985) y estudios recientes sobre disipadores histeréticos.

La energía que produce cada sismo en cada planta en valores de kJ y porcentajes se muestran en la Figura 8, en estas figuras claramente se observa que las líneas de distribución de energía tienen una tendencia, el cual será corroborado si siguen las fórmulas de predicción de Akiyama.

Figura 7

Distribución de energía para estructuras EM de 3, 6 y 9 niveles



Nota. Se ve una mayor dispersión de energía en las plantas 1 y 2.

3.4. Verificación con propuesta de fórmula de Akiyama

Las fórmulas de Akiyama para la predicción de distribución de energía son las siguientes:

$$s_k = (\bar{\alpha}_{k,opt} \cdot \bar{m}_k)^2 \frac{K_1}{K_k} \quad (7)$$

$$p_k = \frac{\alpha_k}{\alpha_{k,opt}} \quad (8)$$

$$p_{t,k} = 1 \quad (\text{análisis plano}) \quad (9)$$

$$\frac{E_{H,k}}{E_H} = \frac{s_k (p_k p_{t,k})^{-n}}{\sum_{l=1}^N s_l (p_l p_{t,l})^{-n}} \quad (10)$$

La distribución de energía propuesta por Akiyama y los resultados de distribución de energía (promedios por planta) obtenidos de los 25 sismos se ven en Tabla 6 (como ejemplo para la estructura de 3 niveles) y la distribución de energía para las 3 estructuras se ven en la Figura 9.



Tabla 6

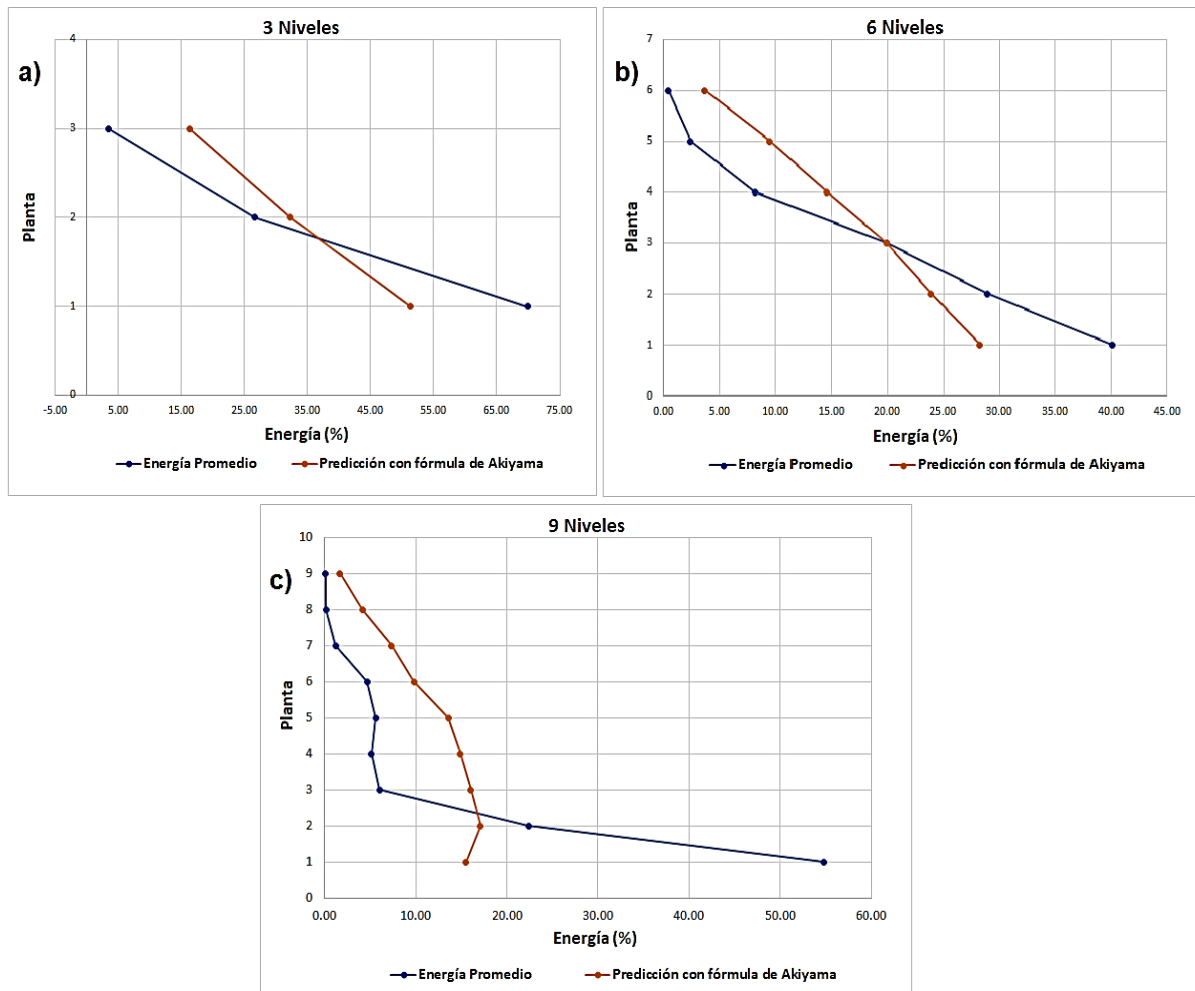
Comparación de distribución de energía según Akiyama en tres niveles

Planta	K_k (N/mm)	$\bar{m}_k$	$\bar{\alpha}_{k\text{opt}}$	S_k	α_k	$\alpha_{k\text{opt}}$	p_k	p_{tk}	n	$S_k (p_k, p_{tk})^{-n}$	E_{HK}/E_H (%)	E prom (%)
1	53541,67	1,00	1,00	1,00	0,31	0,31	1,00	1,00	2	1,00	51,33	69,88
2	55000,00	0,65	1,23	0,63	0,38	0,38	1,00	1,00	2	0,63	32,32	26,69
3	40666,67	0,31	1,59	0,32	0,49	0,49	1,00	1,00	2	0,32	16,35	3,43
1,95												

Nota. E promedio sombreado es la energía promedio de cada planta calculada para los 25 sismos.

Figura 8

Ratios de distribución de energía para estructuras EM de 3, 6 y 9 niveles



4. Discusión

Los resultados obtenidos en este estudio confirman la eficacia del refuerzo con disipadores histeréticos tipo CRP para mejorar la respuesta sísmica de estructuras de concreto armado,

especialmente en edificaciones ubicadas en zonas sísmicas críticas como Tacna. Al analizar la distribución de la energía sísmica absorbida y disipada por piso, se observó que la implementación de disipadores produjo una reducción significativa de las distorsiones inter-piso y un control eficiente del daño, resultados que coinciden con lo reportado en la literatura (Donaire-Ávila, 2023; Gholami y Askariani, 2023).

Los hallazgos muestran que la mayor concentración de energía disipada ocurre en los niveles inferiores de los edificios, incluso después del refuerzo. Esta tendencia es consistente para prototipos de 3, 6 y 9 niveles, aunque la proporción exacta varía con la altura del edificio. Por ejemplo, para la estructura de 3 niveles, la planta baja absorbió cerca del 70 % de la energía total generada por la acción sísmica, guarismo que disminuye, aunque persiste en el primer nivel en edificios más altos. Estudios previos como los de Abarkane et al. (2019) y Fong et al. (2016) reportan fenómenos similares, justificando la importancia de considerar la distribución no uniforme de la demanda energética al diseñar e instalar disipadores.

El enfoque de balance de energía, aplicado en este trabajo siguiendo los fundamentos propuestos por Housner (1956) y desarrollados por Akiyama (1985), demuestra ser una herramienta robusta, ya que permite evaluar no solo la resistencia máxima sino la acumulación y disipación de energía a lo largo del tiempo y en cada nivel del edificio. Esto representa una mejora sustancial frente a los métodos de diseño puramente basados en fuerza, que, como destacan Zeynep y Fatih (2017) y Leelataviwat et al. (2009), suelen subestimar la demanda real de energía en sismos severos y generan una distribución desigual del daño.

Comparando los resultados con otros referentes internacionales, por ejemplo, en el estudio de Katayama et al. (2016) sobre disipadores de baja fluencia bajo cargas dinámicas, se observa una tendencia similar tales como una mejoría en el control de desplazamientos y daños, pero con marcada concentración de la disipación energética en los pisos inferiores. De manera semejante, Shoki y Takewaki (2020) y Kim et al. (2025), al analizar el comportamiento energético de estructuras reforzadas, enfatizan que la uniformidad en la disipación de energía depende no solo de la cantidad y rigidez de los disipadores, sino de su correcta ubicación y dimensionamiento respetando la demanda específica de cada nivel.

Cabe resaltar que, aunque el refuerzo con disipadores contribuye a reducir consistentemente la demanda estructural y el potencial de daños (Filiatrult y Tinawi, 1992; Gholami y Askariani, 2023), persisten algunos desafíos técnicos relevantes: la confiabilidad de los dispositivos bajo condiciones severas, como altas temperaturas producto de incendios post-sismo (Donaire-Ávila, 2023), y la inexistencia o insuficiencia de normativas específicas en muchos países de alta sismicidad, incluido el Perú. Estas limitaciones han sido evidenciadas en eventos recientes como el sismo de Turquía y Siria en 2023, donde colapsaron edificaciones relativamente nuevas supuestamente adaptadas a estándares actuales.

En términos prácticos, los presentes resultados reafirman la prioridad de dimensionar y ubicar los disipadores de forma óptima en los niveles inferiores, donde la concentración de energía es máxima, tal como proponen Benavent (2024) y Velasco (2021). Contrastar estos hallazgos con los de Fong et al. (2016) y Katayama et al. (2016) permite observar que, si bien la inclusión de disipadores mejora la resiliencia global del edificio, la optimización del diseño se traduce directamente en la reducción de daños localizados y la maximización de la seguridad estructural.



Adicionalmente, el seguimiento a lineamientos normativos como FEMA 273, FEMA 356 y las recomendaciones de ASCE/SEI 7-22 queda validado por la correspondencia entre los resultados numéricos, el enfoque teórico de Akiyama (1985) y los datos experimentales de la bibliografía reciente. Si bien la modelación empleada reproduce adecuadamente el comportamiento sísmico bajo hipótesis ideales y la selección de acelerogramas es representativa, las condiciones reales como irregularidades geométricas, deterioro de materiales o interacción suelo-estructura pueden alterar la distribución de la energía. Se recomienda, en estudios futuros, avanzar hacia modelos tridimensionales y analizar la influencia de fuentes de incertidumbre no exploradas.

Finamente, la investigación da sustento cuantitativo a la necesidad de refuerzos energéticos estratégicos, proporcionando evidencia para que los códigos constructivos evolucionen hacia un enfoque no solo resistente, sino realmente resiliente ante sismos, como plantean Leelataviwat et al. (2009) y Abarkane et al. (2019).

5. Conclusiones

Las curvas de capacidad determinadas mediante modelación no lineal y análisis pushover evidenciaron que la resistencia máxima en el primer nivel aumenta con la altura de la estructura, alcanzando 466 kN para tres niveles, 757 kN para seis niveles y 783 kN para nueve niveles. Esto confirma la tendencia prevista y proporciona una base sólida para el posterior dimensionamiento de disipadores.

El uso del método de balance energético de Housner-Akiyama fue fundamental para el dimensionamiento racional de disipadores histeréticos tipo CRP. Se obtuvieron rigideces específicas para cada nivel (por ejemplo, para la ED de 3 plantas: $K_{CRP1} = 30,662 \text{ N/mm}^2$, $K_{CRP2} = 24,682 \text{ N/mm}^2$, y $K_{CRP3} = 18,775 \text{ N/mm}^2$), así como las secciones correspondientes. Esto resalta la necesidad de un diseño adaptativo, acorde al comportamiento esperado de la estructura en cada piso.

La aplicación de registros sísmicos escalados en el análisis no lineal dinámico permitió obtener, mediante integración numérica de las curvas histeréticas, la energía total disipada por cada planta. La metodología empleada, basada en un análisis tiempo–historia con 25 registros y el uso del método del trapecio, proporcionó resultados robustos y detallados sobre el comportamiento energético a lo largo de la altura de las edificaciones.

La distribución promedio de energía muestra una fuerte concentración en los niveles inferiores, especialmente en la planta baja: 69,88 % para la estructura de 3 niveles; 40,04 % para la de 6 niveles; y 54,82 % para la de 9 niveles. Estas proporciones confirman que la mayor demanda de disipación de energía se concentra sistemáticamente en las plantas más bajas, ratificando tanto observaciones teóricas como investigaciones previas en la literatura.

Contribución de los autores

W. P. Mendoza: Conceptualización, curación de datos, análisis formal, adquisición de fondos, investigación, desarrollo de la metodología, administración del proyecto, provisión de recursos, desarrollo de software, supervisión, validación, visualización, redacción del borrador original y revisión y edición del manuscrito. **E. M. Pino:** Conceptualización, investigación, metodología, administración del proyecto, supervisión, validación, visualización y en la revisión y edición.

Conflictos de interés

Los autores informan que no poseen conflictos de interés que puedan influir en esta publicación.

6. Referencias Bibliográficas

- Akiyama, H. (1985). *Earthquake-resistant limit state design for buildings*. Segunda edición. University of Tokyo Press.
- ASCE/SEI 7-22. (2022). *Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures (ASCE/SEI 7-22)*. Reston, VA: ASCE.
- Benavent, A (2024). *Proyecto de Estructuras con Disipadores Dependientes del Desplazamiento según Nuevo EN 1998*. [Apuntes del curso Control Dinámico de Estructuras]. Master en Ingeniería Sísmica UPM: Dinámica de Suelos y Estructuras.
- CISMID. (23 febrero 2025). Universidad Nacional de Ingeniería FIC-UNI. Disponible en <http://www.cismid.uni.edu.pe/>
- Computers and Structures, Inc. (CSI). (2023). *SAP2000 (Version 23)* [Computer software]. <https://www.csiamerica.com/products/sap2000>
- Chihab Abarkane, David Galé-Lamuela, Amadeo Benavent-Climen, Francisco J. Rescalvo y Antolino Gallego (2019). Diagnosis of hysteretic dampers used for seismic protection of structures by means ultrasonic measurements. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 123. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2019.105456>
- Donaire-Ávila, J., Benavent-Climen, A., & Mollaioli, F. (2023). Influence of the constitutive model in the damage distribution of buildings designed with an energy-based method. *Frontiers in Built Environment*, 9, Article 1190923. <https://doi.org/10.3389/fbuil.2023.1190923>
- FEMA 273. (1996). *NEHRP guidelines for the seismic rehabilitation of buildings*. U.S. Department of Homeland Security. <https://www.scinc.co.jp/nanken/pdf/fema273.pdf>
- FEMA 356. (2000). *Prestandard and commentary for the seismic rehabilitation of buildings*. Reston, Virginia: American Society of Civil Engineers, ASCE.
- Filiatrult y R. Tinawi (1992). El uso del balance energético en el análisis sísmico no línea. En *Proceedings of the 10th World Conference on Earthquake Engineering*. IIT Kanpur. https://www.iitk.ac.in/nicee/wcee/article/10_vol7_4111.pdf
- Fong, J., Edge, J., Underwood, C., Tindale, A., Potter, S., & Du, H. (2016). Application of a New Dynamic Heating System Model Using a Range of Common Control Strategies. *Buildings*, 6(2), 23. <https://doi.org/10.3390/buildings6020023>
- Gholami, N., Garivani, S. & Askariani, S.S. State-of-the-Art Review of Energy-Based Seismic Design Methods. *Arch Computat Methods Eng* 29, 1965–1996 (2022). <https://doi.org/10.1007/s11831-021-09645-z>
- Housner, G. (1956). *Limit design of structures to resist earthquake*. *Proceeding of the first world conference on earthquake engineering*. California, Estados Unidos de América.



- Huang D, W Du, H Zhu (2017), "A procedure to select ground-motion time histories for deterministic seismic hazard analysis from the Next Generation Attenuation (NGA) database", *Natural Hazards and Earth System Sciences*, Vol. 17, pp. 1725–1739. <https://nhess.copernicus.org/articles/17/1725/2017/nhess-17-1725-2017.pdf>
- Jinkoo Kim, Yang Xiang, Iman Hajirasouliha, Stefano Silvestri, Diana Faiella (2025). Energy-dissipation and seismic isolation techniques: Advancements in seismic protection of structures for an earthquake resilient community Structures. Elsevier. <https://www.sciencedirect.com/journal/structures/special-issue/10V83KVF4W5>
- Katayama, T., Ito, S., Kamura, H., Ueki, T., & Okamoto, H. (2016). Experimental study on hysteretic damper with low yield strength steel under dynamic loading. [PDF]. Civil & Building Research Department, *Applied Technology Research Center*. <https://www.iitk.ac.in/nicee/wcee/article/1020.pdf>
- Leelataviwat, S., Saewon, W., & Goel, S. C. (2009). Application of energy balance concept in seismic evaluation of structures. *Journal of Structural Engineering*, 135(2), 113–121. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(2009\)135:2\(113\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2009)135:2(113))
- Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento. (2018). *Norma técnica E.030: Diseño sismorresistente*. <https://waltervillavicencio.com/wp-content/uploads/2019/01/E.030-2018.pdf>
- Mota Páez, S. (2017). *Reacondicionamiento Sísmico de Edificios de Hormigón Armado con el Primer Piso Blando Mediante Disipadores de Energía: aplicación a la República Dominicana*. [Tesis de doctorado, Universidad Politécnica de Madrid]. <https://oa.upm.es/47345/>
- Riascos, M. (2021). *Distribución de la energía de deformación plástica entre estructura principal y disipadores histeréticos y su aplicación en los métodos energéticos* [Tesis de fin de máster, Universidad Politécnica de Madrid].
- SEAOC (1995), *Vision 2000 Report on performance based seismic engineering of buildings*, *Structural Engineers Association of California*, Volume I, Sacramento.
- Shoki Hashizume y Izuru Takewaki (2020). Hysteretic–Viscous Hybrid Damper System for Long-Period Pulse-Type Earthquake Ground Motions of Large Amplitude. *Frontiers in Built Environment*. <https://doi.org/10.3389/fbuil.2020.00062>
- Velasco, L. (2021). *Diseño óptimo del refuerzo estructural, mediante disipadores CRP, para la adecuación del desempeño sísmico de estructuras aporticadas de hormigón armado* [Tesis de fin de máster, Universidad Politécnica de Valencia].
- Wang G, R Youngs, M Power y Z Li (2015), "Design ground motion library: an interactive tool for selecting earthquake ground motions", *Earthq. Spectra*, Vol. 31, pp. 617–635. https://gwang.people.ust.hk/Publications/Wang.et.al.DGML_EQSpectra2015.pdf
- Zeynep Tuna Değer y Fatih Sutcu (2017). Distribución de energía histéresis entre elementos estructurales [Tabla]. ResearchGate.
- Zhang, F., & McKenna, F. (2022). *OpenSeesPy: Python library for the OpenSees finite element framework* (Version 3.5.0) [Computer software]. University of California, Berkeley. <https://openseespydoc.readthedocs.io>