

Recibido: 2026-07-20

Aceptado: 2026-08-04

Publicado: 2026-08-11

Desarrollo de una herramienta computacional en Python para el análisis y predimensionamiento sísmico de pórticos especiales de acero con vigas tipo IPE y columnas tubulares rectangulares (HSS), conforme a la normativa NEC, aplicado a edificaciones en la ciudad de Riobamba

Development of a Python-based computational tool for the seismic analysis and preliminary design of special steel frames with IPE-type beams and rectangular tubular columns (HSS), in accordance with NEC standards, applied to buildings in the city of Riobamba

Pablo Geovanny Andrade Santillán¹

Ingeniero Civil

Maestría en Matemática Aplicada con mención en Matemática Computacional

geovanny.andrade@unach.edu.ec

<https://orcid.org/0009-0009-3669-4191>

Universidad Nacional de Chimborazo

Riobamba - Ecuador

Lorena Paulina Molina Valdiviezo²

Ph.D en Ingeniería de Sistemas e Informática

Magister en Docencia y Currículo para la Educación Superior

Ingeniería en Sistemas Informáticos

lmolina@unach.edu.ec

<https://orcid.org/0000-0001-9056-8262>

Universidad Nacional de Chimborazo

Riobamba - Ecuador

Resumen

El presente artículo desarrolla y valida una herramienta computacional en Python destinada al análisis estructural y al predimensionamiento sísmico de pórticos especiales de acero conformados por vigas tipo IPE y columnas tubulares rectangulares HSS, con base en los criterios establecidos por la Norma Ecuatoriana de la Construcción; la propuesta se plantea como una alternativa abierta, trazable y reproducible para apoyar la revisión técnica preliminar de proyectos estructurales en la ciudad de Riobamba, mediante la verificación de cargas, desplazamientos, fuerzas internas, combinaciones de carga y secciones mínimas; la herramienta implementa el método matricial de rigidez para pórticos planos y permite definir la geometría estructural, las propiedades mecánicas de los elementos, las cargas gravitacionales, la acción sísmica, los desplazamientos nodales, las reacciones y las fuerzas internas, además incorpora verificaciones preliminares de cumplimiento normativo conforme a los criterios aplicables en los procesos de revisión municipal; la validación se realizó mediante la comparación de los resultados obtenidos en Python con los valores registrados en las memorias de cálculo estructural de dos casos reales ubicados en Riobamba, denominados Caso A y Caso B; en el Caso A se obtuvo una diferencia de 0,0028 % en el cortante basal sísmico, mientras que en el Caso B el periodo fundamental presentó una diferencia aproximada de 3,1 %, el cortante basal de 8,89 % y el momento flector del elemento crítico de 0,018 %; los resultados evidencian que la herramienta reproduce de manera razonable el comportamiento global y local de los pórticos HSS-IPE y aporta trazabilidad para la revisión preliminar y la comparación con resultados documentales de referencia.

Palabras clave: Python; memorias de cálculo estructural; pórticos especiales de acero; vigas IPE; columnas HSS; Norma Ecuatoriana de la Construcción; predimensionamiento sísmico; método matricial de rigidez; Riobamba.

Abstract

This article presents the development and validation of a Python-based computational tool for the structural analysis and preliminary seismic design of special steel moment frames composed of IPE beams and rectangular Hollow Structural Section columns, following the criteria established in the Ecuadorian Construction Code; the proposal constitutes an open, traceable, and reproducible alternative intended to support the preliminary technical review of structural projects in the city of Riobamba through the verification of loads, displacements, internal forces, load combinations, and minimum member sections; the tool implements the matrix stiffness method for plane frames and allows the definition of structural geometry, mechanical properties, gravity loads, seismic action, nodal displacements, reactions, and internal forces, while also incorporating preliminary code-compliance checks consistent with the criteria applied in municipal review processes; validation was performed by comparing the results obtained with the Python tool against the values reported in the structural calculation documents of two real projects located in Riobamba, identified as Case A and Case B; in Case A, the difference in seismic base shear was 0.0028%, whereas in Case B the fundamental period differed by approximately 3.1%, the base shear by 8.89%, and the bending moment of the critical member by 0.018%; the results indicate that the proposed tool reasonably reproduces the global and local behavior of HSS–IPE frames and provides traceability for preliminary structural review and comparison with documented reference results.

Keywords: Python; structural calculation reports; special steel moment frames; IPE beams; HSS columns; Ecuadorian Construction Code; preliminary seismic design; matrix stiffness method; Riobamba.

Introducción

En el Ecuador, las edificaciones metálicas ubicadas en zonas de amenaza sísmica requieren incorporar criterios de resistencia, rigidez, ductilidad, estabilidad y control de desplazamientos laterales, debido a que estos parámetros determinan su comportamiento frente a las acciones gravitacionales y sísmicas; tales condiciones se encuentran reguladas por la Norma Ecuatoriana de la Construcción, particularmente en los capítulos relacionados con peligro sísmico, diseño sismorresistente y estructuras de acero, mientras que las disposiciones internacionales complementarias establecen criterios técnicos para verificar la resistencia, estabilidad y capacidad sísmica de los elementos estructurales (NEC, 2015a, 2015b; AISC, 2016a, 2016b).

La revisión de proyectos de construcción metálica comprende el análisis de memorias de cálculo, planos estructurales, modelos computacionales y documentación técnica; en la ciudad de Riobamba, este procedimiento incluye la comprobación de cargas gravitacionales, combinaciones de carga, cortante basal, derivas de entrepiso, desplazamientos, fuerzas internas, capacidad resistente y jerarquía estructural, puesto que las inconsistencias entre los documentos presentados pueden generar observaciones, prolongar los tiempos de aprobación y disminuir la confiabilidad del diseño.

Los programas especializados permiten desarrollar modelos estructurales detallados, aunque su utilización exige definir correctamente las unidades, fuentes de masa, diafragmas, propiedades de las secciones, restricciones y combinaciones de carga; su acceso también puede encontrarse limitado por los costos de licenciamiento, mientras que la presentación de resultados numéricos no garantiza por sí sola la validez del análisis, debido a que su precisión depende de la configuración adoptada, la calidad de los datos ingresados y la posibilidad de verificar el procedimiento de cálculo.

Frente a esta necesidad, el presente estudio desarrolla una herramienta computacional abierta en Python para el análisis estructural y el predimensionamiento sísmico de pórticos especiales de acero conformados por vigas IPE y columnas tubulares rectangulares HSS; la propuesta se fundamenta en el método matricial de rigidez para pórticos planos, incorpora cargas gravitacionales y acciones sísmicas conforme a la Norma Ecuatoriana de la Construcción y permite calcular desplazamientos nodales, reacciones, fuerzas internas, derivas y relaciones preliminares de demanda y capacidad; su validación se efectúa mediante la comparación con los resultados registrados en las memorias de cálculo estructural de dos edificaciones reales ubicadas en Riobamba, denominadas Caso A y Caso B, empleadas respectivamente como configuración diagnóstica y configuración mejorada.

Desde la perspectiva de la Matemática Aplicada y Computacional, la investigación formula el comportamiento del pórtico como un sistema algebraico de ecuaciones lineales obtenido mediante la discretización de la estructura en elementos finitos tipo barra; el procedimiento comprende la construcción de matrices locales de rigidez, la transformación de coordenadas, el ensamblaje de la matriz global, la imposición de condiciones de frontera, la resolución numérica del sistema y la recuperación

de las fuerzas internas; esta formulación se implementa mediante algoritmos desarrollados en Python y se verifica a través del análisis de errores entre los resultados calculados y los valores documentales de referencia.

Material y métodos

2.1 Enfoque metodológico y diseño de investigación

La investigación se desarrolló bajo un enfoque cuantitativo, con alcance descriptivo y comparativo, carácter aplicado y tecnológico, y diseño documental de validación computacional; su naturaleza aplicada se relaciona con la necesidad de fortalecer la revisión preliminar de proyectos estructurales en la ciudad de Riobamba, mientras que el componente descriptivo permitió organizar e interpretar la información técnica consolidada de la encuesta municipal y de los casos seleccionados; el carácter tecnológico se evidencia en el desarrollo de una herramienta computacional en Python, en tanto que el componente comparativo permitió contrastar sus resultados con los valores registrados en las memorias de cálculo estructural de proyectos previamente aprobados por el Municipio de Riobamba.

El diseño fue no experimental debido a que no se modificaron físicamente las estructuras ni se realizaron ensayos de laboratorio; el componente institucional fue de corte transversal porque utilizó información recopilada durante un periodo determinado, mientras que el componente estructural correspondió a una validación computacional basada en dos casos de estudio seleccionados de manera intencional; ambos proyectos cuentan con documentación técnica y respaldo de aprobación municipal, lo que permitió emplear sus planos, memorias de cálculo y resultados estructurales como fuentes documentales para la aplicación y comprobación de la herramienta desarrollada.

La validación comparativa se efectuó mediante el análisis de los resultados obtenidos con el algoritmo programado en Python y los valores consignados en las memorias de cálculo estructural de los proyectos aprobados; las variables consideradas comprendieron cargas gravitacionales, periodo fundamental, cortante basal, desplazamientos, derivas, reacciones y fuerzas internas, manteniendo las condiciones geométricas, mecánicas y de carga establecidas en la documentación técnica disponible; debido a que la encuesta municipal contiene resultados consolidados y no registros individuales por funcionario, el tratamiento de esta información se limitó a un diagnóstico descriptivo, sin aplicar procedimientos de inferencia estadística.

Tabla 1. Caracterización del enfoque metodológico.

Componente	Caracterización metodológica	Aplicación en el estudio
Aplicado	Resuelve una necesidad práctica	Apoyo a la revisión preliminar de pórticos HSS-IPE en Riobamba
Descriptivo	Caracteriza datos consolidados y casos reales	Volumen de proyectos, tiempos, controles y resultados estructurales
Tecnológico	Desarrolla una solución computacional	Programa Python para análisis matricial y chequeos preliminares
Comparativo	Contrasta dos fuentes de resultados	Validación Python frente a MEMORIAS DE CALCULO
Documental	Usa normativa, informes y archivos técnicos	NEC, AISC, reportes, modelos y encuesta

Fuente: elaboración propia con resultados de Python y MEMORIAS DE CALCULO.

Figura 1. Diseño metodológico general de la investigación.



Fuente: elaboración propia con resultados de Python y MEMORIAS DE CALCULO.

2.2 Población, unidades de análisis y selección de casos.

La investigación consideró dos componentes de análisis claramente diferenciados; el componente institucional estuvo integrado por los proyectos estructurales sometidos a revisión en el Municipio de Riobamba y por el personal técnico vinculado con los procesos de evaluación y aprobación, mientras que el componente técnico-computacional estuvo conformado por pórticos especiales de acero con vigas IPE y columnas HSS, junto con los modelos numéricos utilizados para evaluar su comportamiento estructural; esta diferenciación permite reservar el término población para el contexto institucional y emplear la expresión unidades de análisis para las estructuras y modelos computacionales.

La selección fue no probabilística debido a la disponibilidad de información institucional y al carácter específico de los casos estudiados; para el componente institucional se utilizaron resultados consolidados de una encuesta técnica municipal, debido a que no se dispuso de una base individual de respuestas por funcionario, mientras que para el componente estructural se seleccionaron intencionalmente dos proyectos reales previamente aprobados por el Municipio de Riobamba, identificados como Caso A y Caso B, cuya documentación técnica incluía planos, memorias de cálculo y resultados estructurales.

El Caso A fue empleado como configuración diagnóstica para identificar inconsistencias y posibles incumplimientos relacionados con resistencia, rigidez y jerarquía estructural, mientras que el Caso B correspondió a una configuración mejorada destinada a evaluar la capacidad de la herramienta para reproducir variables globales y locales; la comparación se efectuó entre los resultados generados por el algoritmo desarrollado en Python y los valores registrados en las memorias de cálculo estructural de ambos proyectos, manteniendo las condiciones geométricas, mecánicas y de carga disponibles en la documentación aprobada

Tabla 2. Población y muestra del estudio.

Nivel de análisis	Población o unidad de análisis	Información utilizada	Tipo de selección
Institucional: proyectos	Proyectos estructurales sometidos a revisión en el Municipio de Riobamba	Datos consolidados sobre volumen, tipologías y tiempos de aprobación	No probabilística por disponibilidad
Institucional: personal técnico	Funcionarios vinculados con la revisión y aprobación estructural	Resultados agregados de la encuesta técnica municipal	Intencional y descriptiva
Técnico-estructural	Pórticos especiales de acero conformados por columnas HSS y vigas IPE	Proyectos aprobados Caso A y Caso B	Intencional por pertinencia técnica
Computacional	Modelos numéricos de los dos pórticos seleccionados	Resultados globales y locales generados en Python y valores registrados en las memorias de cálculo	Casos de estudio

Fuente: elaboración propia con base en los resultados consolidados de la encuesta municipal, la documentación técnica de los proyectos aprobados y los resultados obtenidos mediante la herramienta desarrollada en Python.

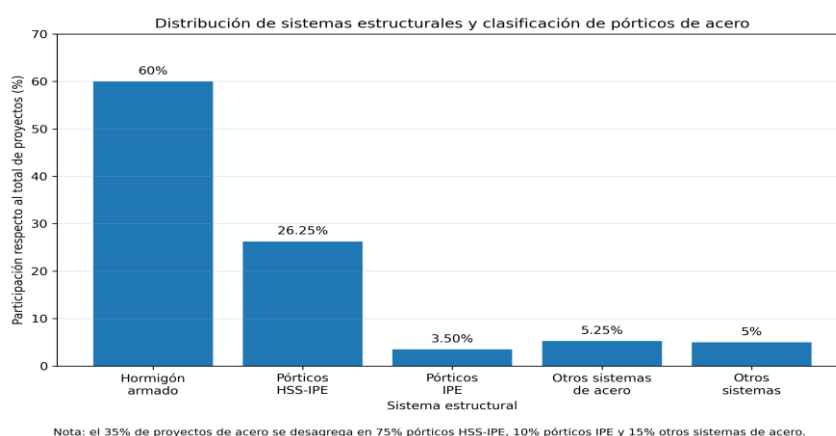
Tabla 3. Indicadores descriptivos de pertinencia del estudio.

Indicador	Resultado consolidado	Base de cálculo	Interpretación metodológica
Proyectos estructurales por año	250	Total anual	Evidencia un flujo constante de expedientes que requiere procedimientos estandarizados de revisión

Promedio mensual estimado	20,8 proyectos por mes	250 ÷ 12 meses	Representa aproximadamente 21 proyectos mensuales y demuestra la frecuencia de las tareas de revisión
Tiempo promedio de aprobación	30 a 60 días	Proceso municipal	Muestra la duración del procedimiento y la necesidad de fortalecer las verificaciones preliminares
Hormigón armado	60 %	Total de proyectos	Corresponde al sistema estructural predominante dentro de la revisión municipal
Estructuras metálicas	35 %	Total de proyectos	Evidencia una participación relevante de los sistemas de acero
Otros sistemas	5 %	Total de proyectos	Agrupar sistemas estructurales menos frecuentes o configuraciones mixtas
Pórticos HSS-IPE	75 %	Dentro del 35 % de estructuras metálicas	Equivalen aproximadamente al 26,25 % del total de proyectos y justifica el desarrollo de un módulo específico
Pórticos con perfiles IPE	10 %	Dentro del 35 % de estructuras metálicas	Equivalen aproximadamente al 3,50 % del total de proyectos
Otros sistemas de acero	15 %	Dentro del 35 % de estructuras metálicas	Equivalen aproximadamente al 5,25 % del total de proyectos

Fuente: elaboración propia con resultados de encuesta a técnicos de revisión de proyectos GADMR

Figura 2. Distribución de sistemas estructurales y clasificación de pórticos de acero.



Nota: el 35% de proyectos de acero se desglosa en 75% pórticos HSS-IPE, 10% pórticos IPE y 15% otros sistemas de acero.

Fuente: Elaboración propia con base en resultados consolidados de encuesta a técnicos de revisión de proyectos del GAD Municipal de Riobamba.

Los indicadores consolidados nos permiten diferenciar dos bases de cálculo. En primer lugar, respecto al total de proyectos revisados, el 60 % corresponde a hormigón armado, el 35 % a estructuras metálicas y el 5 % a otros sistemas. En segundo lugar, dentro del subconjunto de proyectos de acero, los pórticos HSS-IPE representan el 75 %, los pórticos IPE el 10 % y otros sistemas de acero el 15 %. Por tanto, el sistema HSS-IPE equivale aproximadamente al 26.25 % del total de proyectos analizados, lo que justifica la pertinencia de desarrollar una herramienta computacional orientada al análisis y predimensionamiento preliminar de pórticos de acero con columnas HSS y vigas IPE.

2.3 Materiales, insumos y herramientas utilizadas

La investigación empleó insumos normativos, técnicos, documentales y computacionales que permitieron formular el modelo matemático del pórtico, desarrollar la herramienta en Python, definir las propiedades geométricas y mecánicas de los perfiles HSS-IPE y aplicar los criterios establecidos en la Norma Ecuatoriana de la Construcción; estos recursos también facilitaron la comparación entre los resultados generados por el algoritmo y los valores consignados en las memorias de cálculo estructural de los proyectos aprobados seleccionados como casos de estudio; la Tabla 4 presenta los principales materiales, insumos y herramientas utilizados, junto con su función dentro del procedimiento metodológico.

Tabla 4. Materiales e insumos empleados.

Material, insumo o herramienta	Descripción	Uso metodológico
Python	Lenguaje de programación de código abierto empleado para desarrollar la herramienta computacional	Implementación del método matricial de rigidez, cálculo de cargas, acción sísmica, desplazamientos, reacciones, fuerzas internas, derivas y verificaciones preliminares
Memorias de cálculo estructural	Documentación técnica correspondiente a los proyectos aprobados seleccionados como casos de estudio	Obtención de valores de referencia para la comparación de periodos, cortante basal, derivas, reacciones y fuerzas internas
NEC-SE-DS	Capítulo de la Norma Ecuatoriana de la Construcción relacionado con peligro sísmico y diseño sismorresistente	Determinación de parámetros sísmicos, cortante basal, distribución de fuerzas laterales y control de derivas
NEC-SE-AC	Capítulo de la Norma Ecuatoriana de la Construcción aplicable a estructuras de acero	Verificación preliminar de elementos de acero, relaciones demanda/capacidad y criterios de diseño sismorresistente
AISC 360 y AISC 341	Especificaciones internacionales para el diseño de estructuras de acero y disposiciones sísmicas	Referencia complementaria para resistencia, estabilidad, verificación de miembros y criterio columna fuerte-viga débil
Catálogos de perfiles HSS e IPE	Información geométrica y mecánica correspondiente a secciones tubulares HSS y perfiles laminados IPE	Definición de áreas, inercias, módulos resistentes, radios de giro y demás propiedades utilizadas en el modelo
Encuesta municipal	Instrumento técnico que contiene resultados consolidados del proceso de revisión estructural	Diagnóstico de pertinencia, volumen de proyectos, tiempos de aprobación y presencia de sistemas estructurales metálicos
Casos reales de estudio	Proyectos Caso A y Caso B, previamente aprobados y ubicados en la ciudad de Riobamba	Aplicación de la herramienta en configuraciones estructurales reales y comparación de resultados
Reportes comparativos	Tablas de periodos, cortantes, derivas, reacciones, fuerzas internas y diferencias porcentuales	Comparación cuantitativa, análisis de concordancia e interpretación de diferencias
Hojas de cálculo y gráficos	Archivos auxiliares utilizados para organizar y representar los resultados	Sistematización de datos, cálculo de diferencias, elaboración de tablas y generación de diagramas comparativos

Fuente: elaboración propia con base en normativa NEC/AISC, encuesta municipal, modelos Python-Memoria de cálculo y casos de estudio.

2.4 Formulación matemática del pórtico

El modelo matemático se formuló mediante el método matricial de rigidez para pórticos planos, complementado con el procedimiento estático equivalente establecido en la Norma Ecuatoriana de la Construcción y con verificaciones preliminares de resistencia para elementos de acero. Esta formulación permitió representar la estructura como un sistema algebraico de ecuaciones lineales, cuya solución proporciona los desplazamientos nodales y posibilita recuperar las reacciones, las fuerzas internas, las derivas y las relaciones de demanda y capacidad empleadas en el predimensionamiento.

2.4.1 Idealización estructural y grados de libertad

Cada pórtico fue discretizado mediante nodos y elementos lineales de viga-columna. Para cada nodo del modelo plano se consideraron tres grados de libertad: desplazamiento horizontal, desplazamiento vertical y rotación alrededor del eje perpendicular al plano del pórtico. En consecuencia, el vector de desplazamientos del nodo i y el vector elemental asociado a los nodos extremos i y j se expresan de la siguiente manera:

$$u_i = [u_i \quad v_i \quad \theta_i]^T$$

$$u_e = [u_i \quad v_i \quad \theta_i \quad u_j \quad v_j \quad \theta_j]^T$$

La formulación emplea las propiedades geométricas y mecánicas de cada elemento, representadas por el módulo de elasticidad E , el área transversal A , el momento de inercia I y la longitud L . Las condiciones de apoyo establecidas en la documentación técnica de cada caso se incorporaron como restricciones cinemáticas dentro del sistema global.

2.4.2 Matriz de rigidez del elemento

La relación entre las fuerzas nodales y los desplazamientos de un elemento de pórtico plano se definió en coordenadas locales mediante una matriz de rigidez de orden 6×6 . Esta matriz integra el comportamiento axial y flexional del elemento y constituye la base para el ensamblaje de la estructura completa (Kassimali, 2012).

Ecuación 1. Matriz local de rigidez para un elemento de pórtico plano.

$$k_e^\ell = \begin{bmatrix} \frac{EA}{L} & 0 & 0 & -\frac{EA}{L} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{12EI}{L^3} & \frac{6EI}{L^2} & 0 & -\frac{12EI}{L^3} & \frac{6EI}{L^2} \\ 0 & \frac{6EI}{L^2} & \frac{4EI}{L} & 0 & -\frac{6EI}{L^2} & \frac{2EI}{L} \\ -\frac{EA}{L} & 0 & 0 & \frac{EA}{L} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{12EI}{L^3} & -\frac{6EI}{L^2} & 0 & \frac{12EI}{L^3} & -\frac{6EI}{L^2} \\ 0 & \frac{6EI}{L^2} & \frac{2EI}{L} & 0 & -\frac{6EI}{L^2} & \frac{4EI}{L} \end{bmatrix}$$

La matriz anterior supone propiedades constantes a lo largo del elemento y permite relacionar los seis grados de libertad locales con las fuerzas nodales equivalentes. Los términos EA/L representan la contribución axial, mientras que los términos dependientes de EI describen la respuesta a flexión.

2.4.3 Transformación de coordenadas y ensamblaje global

Debido a que los elementos pueden presentar diferentes orientaciones, sus matrices locales se transformaron al sistema global mediante una matriz construida a partir de los cosenos directores del elemento. La transformación se expresa como:

$$K_e^g = T_e^T K_e^l T_e$$

$$T_e = \begin{bmatrix} c & s & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -s & c & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & c & s & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -s & c & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad c = \frac{x_j - x_i}{L}, \quad s = \frac{y_j - y_i}{L}$$

Ecuación 2. Matriz de transformación local-global del elemento.

Las matrices transformadas se incorporaron a la matriz global de rigidez de acuerdo con la conectividad nodal. El ensamblaje puede representarse mediante la suma de las contribuciones de todos los elementos:

$$K = \sum_{e=1}^{n_e} A_e^T K_e^g A_e$$

En esta expresión, A_e representa el operador de conectividad que ubica los grados de libertad del elemento dentro del sistema global. Una vez aplicadas las restricciones correspondientes a los apoyos, se obtuvo el sistema reducido de ecuaciones de equilibrio:

$$K_r U_r = F_r$$

El sistema se resolvió mediante una rutina numérica de solución lineal, evitando calcular explícitamente la inversa de la matriz de rigidez. Esta decisión mejora la estabilidad numérica y reduce el costo computacional frente al uso directo de la expresión $U = K^{-1}F$.

2.4.4 Recuperación de reacciones y fuerzas internas

Los desplazamientos libres obtenidos se reincorporaron al vector global para calcular las reacciones en los grados de libertad restringidos. Posteriormente, los desplazamientos globales de cada elemento se transformaron nuevamente al sistema local y se utilizaron para recuperar las fuerzas axiales, cortantes y momentos flectores. De forma general, las expresiones empleadas fueron:

$$R = K U - F$$

$$u_e^l = T_e u_e^g$$

$$f_e^l = K_e^l u_e^l - f_{e,eq}^l$$

El vector $f_{e,eq}$ representa las fuerzas nodales equivalentes asociadas a las cargas aplicadas sobre el elemento. Este procedimiento permitió obtener resultados comparables para cada miembro estructural y construir los diagramas de fuerza axial, cortante y momento flector.

2.4.5 Acción sísmica, derivas y verificaciones preliminares

La acción sísmica se determinó mediante el procedimiento estático equivalente de la NEC-SE-DS. El periodo aproximado, el cortante basal y la distribución de fuerzas laterales por nivel se expresaron mediante las ecuaciones siguientes:

$$T_a = C_t h_n^\alpha$$

$$V = C_s W$$

$$F_x = V (w_x h_x^k) / \sum_{i=1}^n (w_i h_i^k)$$

En estas expresiones, T_a corresponde al periodo aproximado, C_t y α son coeficientes asociados al sistema estructural, h_n es la altura total de la edificación, C_s representa el coeficiente sísmico, W corresponde al peso sísmico y F_x identifica la fuerza lateral aplicada en el nivel x . La deriva de entrepiso se calculó a partir del desplazamiento relativo entre niveles consecutivos:

$$\theta_i = |u_i - u_{i-1}| / h_i$$

Las verificaciones preliminares de las vigas y columnas se efectuaron mediante relaciones de demanda y capacidad, mientras que la jerarquía resistente se evaluó con el criterio columna fuerte-viga débil. Las ecuaciones específicas de interacción axial-flexión utilizadas para las columnas deben corresponder a la condición de carga implementada en el código y a las disposiciones de la NEC-SE-AC y AISC 360.

Tabla 5. Relación entre la etapa metodológica, la expresión matemática y la fuente de respaldo.

Etapla metodológica	Expresión o criterio	Fuente de respaldo	Uso dentro del algoritmo
Equilibrio matricial global	$K U = F$	Kassimali (2012)	Obtención de los desplazamientos nodales
Transformación local-global	$K_e^g = T_e^T K_e^l T_e$	Kassimali (2012)	Cambio de coordenadas y orientación de elementos
Ensamblaje estructural	$K = \sum A_e^T K_e^g A_e$	Kassimali (2012)	Construcción de la matriz global de rigidez
Periodo aproximado	$T_a = C_t h_n^\alpha$	NEC-SE-DS, MIDUVI (2015a)	Estimación inicial del periodo
Cortante basal	$V = C_s W$	NEC-SE-DS, MIDUVI (2015a)	Determinación de la acción sísmica global
Distribución lateral	$F_x = V(w_x h_x^k) / \sum (w_i h_i^k)$	NEC-SE-DS, MIDUVI (2015a)	Asignación de fuerzas sísmicas por nivel
Deriva de entrepiso	$\theta_i = u_i - u_{i-1} / h_i$	NEC-SE-DS, MIDUVI (2015a)	Control de desplazamientos relativos
Vigas de acero	$M_u / (\phi_b M_n) \leq 1; V_u / (\phi_v V_n) \leq 1$	NEC-SE-AC y AISC 360	Verificación preliminar a flexión y cortante

Etapa metodológica	Expresión o criterio	Fuente de respaldo	Uso dentro del algoritmo
Columnas HSS	$P_u/(\phi_c P_n) \leq 1$ e interacción P-M	NEC-SE-AC y AISC 360	Verificación axial y de flexocompresión
Jerarquía resistente	$\Sigma M^*_{pc} / \Sigma M^*_{pb} > 1,00$	NEC-SE-AC y AISC 341	Control columna fuerte-viga débil
Error relativo porcentual	$ X_{Python} - X_{ref} / X_{ref} \times 100$	Chapra y Canale (2021)	Comparación con valores documentales de referencia

Fuente: elaboración propia con base en Kassimali (2012), NEC-SE-DS, NEC-SE-AC, AISC 360, AISC 341 y la teoría de errores numéricos presentada por Chapra y Canale (2021).

2.5 Modelo computacional y procedimiento algorítmico

La formulación matemática se implementó en Python mediante un procedimiento modular que separa el ingreso de datos, la generación del modelo, el ensamblaje matricial, la solución del sistema y el posprocesamiento de resultados. Esta organización permitió conservar la trazabilidad entre las variables de entrada, las operaciones algebraicas y los resultados estructurales, además de facilitar la modificación de la geometría, las propiedades de las secciones, las cargas y los parámetros sísmicos sin alterar la estructura general del algoritmo.

2.5.1 Datos de entrada y representación computacional

Los datos de entrada se organizaron en conjuntos correspondientes a nodos, elementos, apoyos, materiales, secciones, cargas gravitacionales y parámetros sísmicos. Cada nodo se identificó mediante sus coordenadas y grados de libertad, mientras que cada elemento se definió por sus nodos extremos y por las propiedades E, A e I. La conectividad permitió asociar los grados de libertad locales con las posiciones correspondientes dentro de la matriz global.

2.5.2 Secuencia de cálculo

El procedimiento computacional se desarrolló mediante las etapas que se muestran en el Algoritmo 1. La solución del sistema lineal se efectuó después de aplicar las condiciones de frontera, mientras que el cálculo de reacciones y fuerzas internas se realizó durante el posprocesamiento. Posteriormente se incorporaron los módulos de acción sísmica, control de derivas, relaciones demanda/capacidad y comparación con los valores documentales de referencia.

Algoritmo 1. Procedimiento de análisis matricial implementado en Python.

Etapa	Procedimiento computacional
Entrada	Geometría, conectividad, materiales, secciones, apoyos, cargas gravitacionales y parámetros sísmicos.
1	Generar los nodos, los elementos y la numeración global de grados de libertad.
2	Calcular la longitud, los cosenos directores y la matriz local de rigidez de cada elemento.
3	Construir la matriz de transformación y obtener la matriz de rigidez del elemento en coordenadas globales.
4	Ensamblar las matrices elementales dentro de la matriz global de rigidez.
5	Construir el vector global de cargas e incorporar las fuerzas nodales equivalentes.
6	Aplicar las condiciones de apoyo y formar el sistema reducido $K_r U_r = F_r$.

Etapa	Procedimiento computacional
7	Resolver el sistema lineal para obtener los desplazamientos nodales desconocidos.
8	Recuperar el vector global de desplazamientos y calcular las reacciones en los apoyos.
9	Transformar los desplazamientos al sistema local y calcular las fuerzas internas de cada elemento.
10	Determinar el periodo aproximado, el cortante basal, la distribución de fuerzas laterales y las derivas.
11	Ejecutar las verificaciones preliminares de vigas, columnas y jerarquía resistente.
12	Comparar los resultados con los valores consignados en las memorias de cálculo estructural.
Salida	Desplazamientos, reacciones, fuerzas internas, derivas, relaciones demanda/capacidad, errores porcentuales, tablas y gráficos.

Fuente: elaboración propia a partir de la formulación matricial y del flujo de cálculo implementado en la herramienta.

2.5.3 Control numérico de la solución

La consistencia algebraica de la solución puede verificarse mediante el vector residuo, definido como la diferencia entre el producto de la matriz de rigidez por el vector de desplazamientos y el vector de cargas. Para evitar que la magnitud de las cargas condicione la interpretación, se utiliza el residuo relativo en norma euclidiana:

$$r = K U - F$$

$$\varepsilon_r = \|K U - F\|_2 / \|F\|_2$$

Un valor reducido de ε_r indica que la solución satisface numéricamente las ecuaciones de equilibrio dentro de la precisión de cálculo. Este indicador evalúa la solución del sistema algebraico, pero no reemplaza la validación del modelo estructural, debido a que no identifica diferencias originadas por la idealización, las propiedades de las secciones, la fuente de masa o las hipótesis de carga.

2.5.4 Trazabilidad y generación de resultados

El posprocesamiento organizó los resultados por caso, nivel y elemento estructural, permitiendo identificar desplazamientos nodales, reacciones, fuerzas internas, derivas y relaciones de demanda y capacidad. Los resultados fueron exportados a tablas y gráficos comparativos para facilitar la revisión de las operaciones realizadas y la localización de diferencias frente a las memorias de cálculo estructural. El código, los datos de entrada y los reportes generados deben conservarse en el repositorio de la investigación con una versión identificable, de manera que el procedimiento pueda repetirse bajo las mismas condiciones.

2.6 Casos de estudio y protocolo de validación

La aplicación y validación de la herramienta se efectuó mediante dos proyectos reales de edificación ubicados en la ciudad de Riobamba y respaldados por documentación de aprobación municipal. Los casos fueron seleccionados intencionalmente por su pertinencia técnica y por la disponibilidad de planos, memorias de cálculo, propiedades de las secciones y resultados estructurales. Para proteger la identificación de los proyectos dentro del artículo, se utilizaron las denominaciones Caso A y Caso B.

El Caso A se empleó como configuración diagnóstica, debido a que permitió evaluar la capacidad del algoritmo para identificar diferencias en cargas, derivas, fuerzas internas y verificaciones resistentes. El Caso B correspondió a una configuración con secciones de mayor capacidad y se utilizó para analizar la concordancia de variables globales y locales en un modelo mejorado. La caracterización de ambos casos se presenta en la Tabla 6.

Tabla 6. Casos de estudio empleados para la aplicación y validación.

Caso	Uso de la edificación	Niveles	Altura total	Columnas	Vigas	Finalidad metodológica
A	Comercio y vivienda	3	9,92 m	HSS 300 × 300 × 8	IPE 300	Diagnóstico y detección de inconsistencias
B	Vivienda	4	11,90 m	HSS 400 × 400 × 10	IPE 360	Validación de una configuración estructural mejorada

Fuente: elaboración propia con base en los planos, las memorias de cálculo estructural y la documentación técnica de los casos aprobados.

2.6.1 Preparación de los modelos

Para cada caso se reprodujeron en la herramienta desarrollada la geometría, el número de niveles, las luces, las alturas, las secciones HSS e IPE, las propiedades mecánicas, las condiciones de apoyo y las cargas consignadas en la documentación técnica disponible. Antes de realizar la comparación se verificó la coherencia del sistema de unidades y la correspondencia de las propiedades geométricas, especialmente el área y el momento de inercia de las secciones.

2.6.2 Variables y criterios de comparación

El protocolo de validación consideró variables globales y locales. Las variables globales permitieron evaluar el equilibrio general y la respuesta lateral de la estructura, mientras que las variables locales permitieron analizar las fuerzas internas y las verificaciones de cada elemento. Los resultados de la herramienta se contrastaron con los valores registrados en las memorias de cálculo estructural, utilizando el error relativo porcentual definido en la Sección 2.4.

Tabla 7. Variables empleadas en el protocolo de validación.

Variable validada	Resultado de la herramienta en Python	Valor documental de referencia	Criterio de comparación
Geometría y secciones	Nodos, elementos, conectividad y propiedades HSS-IPE	Planos y propiedades consignadas en la memoria	Compatibilidad dimensional y de unidades
Cargas gravitacionales	Cargas D y L y reacciones verticales	Cargas y reacciones registradas	Equilibrio vertical y error relativo
Periodo	Periodo aproximado calculado conforme a la NEC	Periodo registrado en la memoria de cálculo	Diferencia porcentual, señalando la posible diferencia de método
Acción sísmica	Coefficiente sísmico, peso sísmico, cortante basal y fuerzas por nivel	Cortante basal y distribución documentados	Comparación global y por nivel
Desplazamientos y derivas	Desplazamientos nodales y derivas de entrepiso	Desplazamientos o derivas consignados	Comparación de magnitud y cumplimiento normativo

Variable validada	Resultado de la herramienta en Python	Valor documental de referencia	Criterio de comparación
Fuerzas internas	Fuerza axial, cortante y momento por elemento	Resultados documentados por miembro	Error relativo, promedio y valores máximos
Verificaciones resistentes	Relaciones demanda/capacidad y jerarquía resistente	Resultados de verificación disponibles	Cumplimiento o incumplimiento de los criterios adoptados

Fuente: elaboración propia con base en el modelo computacional, las memorias de cálculo estructural y la documentación técnica de los casos de estudio.

2.6.3 Procedimiento de validación

Primero, se verificó la equivalencia geométrica y la correspondencia de las secciones para evitar que las diferencias posteriores se atribuyeran a datos de entrada incompatibles.

Segundo, se compararon las cargas gravitacionales y las reacciones verticales con el propósito de comprobar el equilibrio global y detectar diferencias asociadas al peso propio o a la definición de cargas. Tercero, se contrastaron el periodo, el cortante basal, la distribución de fuerzas laterales, los desplazamientos y las derivas. Cuando el periodo calculado en Python correspondió a una expresión aproximada de la NEC y el valor documental procedió de otro método, esta condición se señaló como una limitación de la comparación.

Cuarto, se compararon las fuerzas internas de los elementos mediante los errores relativos individuales y sus valores promedio, diferenciando columnas y vigas cuando la cantidad de resultados lo permitió.

Finalmente, se revisaron las relaciones demanda/capacidad y el criterio columna fuerte-viga débil para determinar la capacidad diagnóstica de la herramienta y su utilidad dentro del predimensionamiento preliminar.

Las diferencias se reportaron mediante valores absolutos y porcentuales, sin considerar que una coincidencia numérica aislada demostrara por sí sola la equivalencia completa de los modelos. La interpretación tuvo en cuenta la naturaleza de cada variable, la magnitud de la respuesta y las posibles diferencias entre las hipótesis contenidas en la herramienta y en la documentación de referencia. Los documentos de aprobación municipal, los planos y las memorias de cálculo que respaldan los casos se conservaron en el archivo técnico de la investigación

Resultados

3.1 Caso A:

El Caso A permitió evaluar la capacidad diagnóstica de la herramienta computacional desarrollada en Python mediante la comparación con los valores consignados en las memorias de cálculo estructural del proyecto aprobado; la revisión inicial confirmó la correspondencia en el número de niveles, la altura total y las secciones asignadas a vigas y columnas, condición necesaria para efectuar una comparación coherente de la respuesta estructural; la diferencia observada en la inercia de las vigas IPE 300 fue inferior al 1 %, mientras que la propiedad correspondiente a las columnas HSS presentó una coincidencia prácticamente exacta; las diferencias encontradas posteriormente en cargas, desplazamientos, derivas y

fuerzas internas podrían relacionarse con la fuente de masa, la incorporación del peso propio, las combinaciones de carga y los criterios de idealización considerados en cada procedimiento de cálculo.

Tabla 8. Síntesis de equivalencia geométrica y de secciones del Caso A.

Parámetro	Python	Memoria de cálculo	Interpretación
Niveles	3	3	Coincide
Altura total	9.92 m	9.92 m	Coincide
Vigas	IPE 300	IPE 300	Compatible
Columnas	HSS 300×300×8	HSS 300×300×8	Compatible
I33 IPE 300	79,300,000 mm ⁴	79,989,869.50 mm ⁴	Diferencia menor al 1 %
I33 HSS	132,884,138.67 mm ⁴	132,884,138.70 mm ⁴	Equivalente

Fuente: elaboración propia a partir de resultados obtenidos en Python, resultados exportados de memoria de cálculo y documentación técnica del caso de estudio.

Tabla 9. Comparación de cargas y reacciones principales del Caso A.

Concepto	Python (tonf)	Memoria de cálculo (tonf)	Diferencia (%)	Interpretación
D vertical	52.8476	57.4172	8.6468	Comparación válida; revisar peso propio automático
L vertical	24.8184	24.8184	0.0000	Coincidencia exacta
Sismo E	100.1882	100.1910	0.0028	Alta concordancia
COMB3 corregida: 1.2D + 0.5L + E	75.8263	81.3098	7.2317	Aceptable con revisión de peso propio

Fuente: elaboración propia a partir de resultados obtenidos en Python y resultados exportados de La Memoria de cálculo.

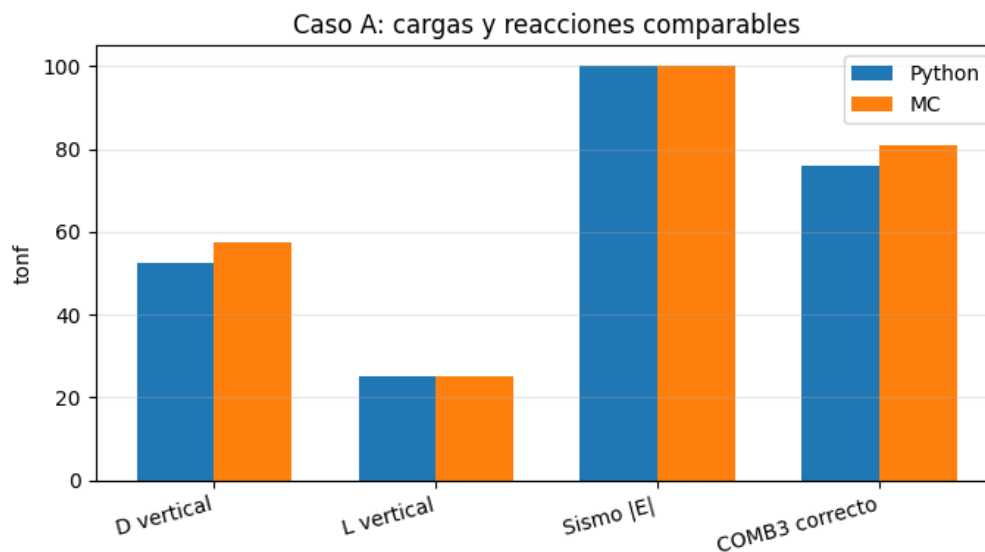


Figura 3. Caso A: comparación gráfica de carga muerta, carga viva, sismo y COMB3 .

Tabla 10. Comparación del periodo fundamental del Caso A.

Parámetro	Python (s)	MEMORIAS DE CALCULO (s)	Diferencia (%)	Interpretación
Periodo fundamental	0.4514	0.4910	8.7727	Concordancia aceptable para periodo aproximado frente a periodo modal

Fuente: elaboración propia a partir de resultados obtenidos en Python y Memoria de cálculo.

Tabla 11. Comparación de derivas elásticas del Caso A.

Piso	Python	Memoria de cálculo	Diferencia (%)	Observación
1	0.0319	0.0412	28.8013	MC mayor; revisar rigidez/modelado
2	0.0389	0.0500	28.5472	MC mayor; revisar rigidez/modelado
3	0.0268	0.0344	28.0683	MC mayor; revisar rigidez/modelado

Fuente: elaboración propia a partir de resultados obtenidos en Python y Memoria de Cálculo .

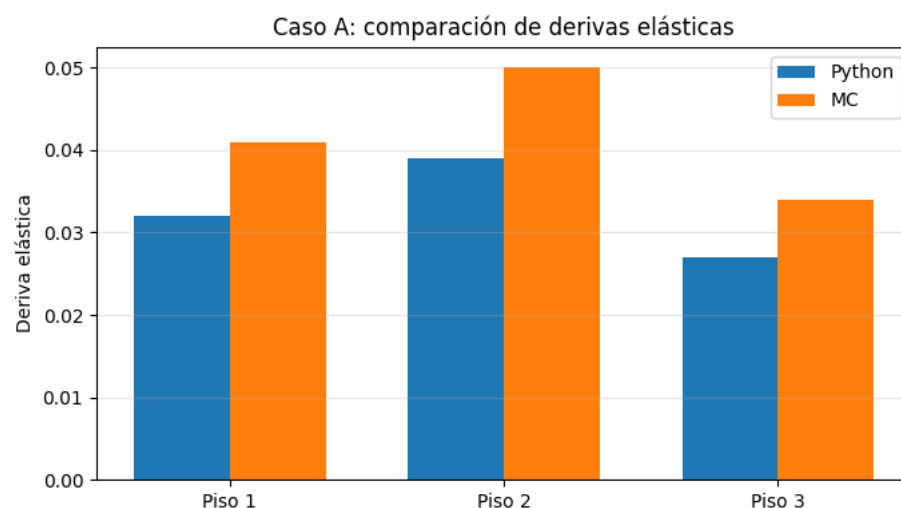


Figura 4. Caso A: comparación de derivas elásticas por piso.

Tabla 12. Chequeo resistente de vigas IPE 300 del Caso A por flexión y cortante.

Elemento	Perfil actual	$M_u/\phi_b M_n$	Flexión	$V_u/\phi_v V_n$	Cortante	Resultado global	Perfil sugerido
E9	IPE 300	4.1384	No cumple	0.8446	Cumple	No cumple	IPE 350
E10	IPE 300	5.1342	No cumple	1.1470	No cumple	No cumple	IPE 400
E11	IPE 300	3.5228	No cumple	0.7274	Cumple	No cumple	IPE 350
E12	IPE 300	4.2712	No cumple	0.9917	Cumple	No cumple	IPE 350
E13	IPE 300	2.2265	No cumple	0.5408	Cumple	No cumple	IPE 350
E14	IPE 300	2.4569	No cumple	0.5926	Cumple	No cumple	IPE 350

Fuente: elaboración propia a partir de resultados obtenidos en Python y Memoria de cálculo.

Los resultados evidencian que todas las vigas IPE 300 presentan relaciones $M_u/\phi_b M_n$ superiores a 1,00, por lo que ninguna satisface la verificación preliminar de resistencia a flexión y el resultado global se clasifica como **no cumple**; en la verificación a cortante, cinco de los seis elementos se mantienen dentro del límite admisible, aunque la viga E12 presenta una relación de 0,9917 y, por tanto, dispone de un margen resistente mínimo; el elemento más crítico corresponde a la viga E10, debido a que alcanza una relación de 5,1342 en flexión y de 1,1470 en cortante, incumpliendo simultáneamente ambas verificaciones; estos resultados demuestran que las secciones inicialmente consideradas requieren una revisión y un redimensionamiento antes de ser aceptadas como parte del diseño estructural definitivo.

Tabla 13. Verificación crítica del criterio columna fuerte-viga débil en el Caso A.

Nudo	Ubicación	ΣM_{pc}	ΣM_{pb}	M_{pc}/M_{pb}	Resultado
N10	X = 6.59 m; Y = 9.92 m	27,542.57	32,956.66	0.8357	No cumple

Fuente: elaboración propia a partir de resultados obtenidos en Python y Memoria de Cálculo.

3.2 Caso B: Proyecto CASO B

El Caso B correspondió a una configuración estructural mejorada, conformada por columnas tubulares HSS 400 × 400 × 10 y vigas IPE 360, cuyas secciones proporcionaron una mayor capacidad resistente y rigidez respecto de la configuración evaluada en el Caso A; este modelo permitió analizar la correspondencia global y local entre los resultados obtenidos mediante la herramienta desarrollada en Python y los valores consignados en la memoria de cálculo estructural del proyecto aprobado; los parámetros sísmicos implementados en el algoritmo fueron definidos conforme a los criterios establecidos en la NEC-SE-DS y se utilizaron para determinar el periodo aproximado, el coeficiente sísmico, el peso sísmico total, el cortante basal y la distribución de las fuerzas laterales por nivel; posteriormente, los resultados fueron comparados mediante variables globales, como el periodo fundamental, el cortante basal y las derivas de entrepiso, así como mediante variables locales relacionadas con las fuerzas axiales, cortantes y momentos flectores de los elementos estructurales.

Tabla 14. Parámetros sísmicos principales del Caso B.

Parámetro	Valor	Interpretación
Z	0.40	Factor de zona sísmica
Fa	1.20	Factor de sitio para aceleraciones
Fd	1.19	Factor de sitio para desplazamientos
Fs	1.28	Comportamiento no lineal del suelo
R	8.0	Factor de reducción
Ta Python	0.5221 s	Periodo aproximado
Cs	0.1488	Coefficiente sísmico
W	196,665.85 kgf	Peso sísmico total
V basal	29,263.88 kgf	Cortante basal

Fuente: elaboración propia a partir de parámetros NEC implementados en Python.

Tabla 15. Comparación de periodo y cortante basal del Caso B.

Parámetro	Python	Memoria de Cálculo	Diferencia (%)	Interpretación
Periodo fundamental	0.5221 s	0.5060 s	3.1	Muy buena concordancia global
Cortante basal	29.2639 tonf	31.8640 tonf	8.89	Concordancia aceptable; revisar fuente de masa y peso propio

Fuente: elaboración propia a partir de resultados obtenidos en Python y MEMORIAS DE CALCULO.

Tabla 16. Cortantes por piso del Caso B.

Nivel	Python (tonf)	MEMORIA DE CÁLCULO (tonf)	Diferencia (%)
Piso 1/Base	29.2639	31.8640	8.89
Piso 2	25.9106	28.5280	10.10
Piso 3	20.0841	22.7000	13.02
Piso 4	11.4507	14.0680	22.86

Fuente: elaboración propia a partir de resultados obtenidos en Python y MEMORIAS DE CALCULO.

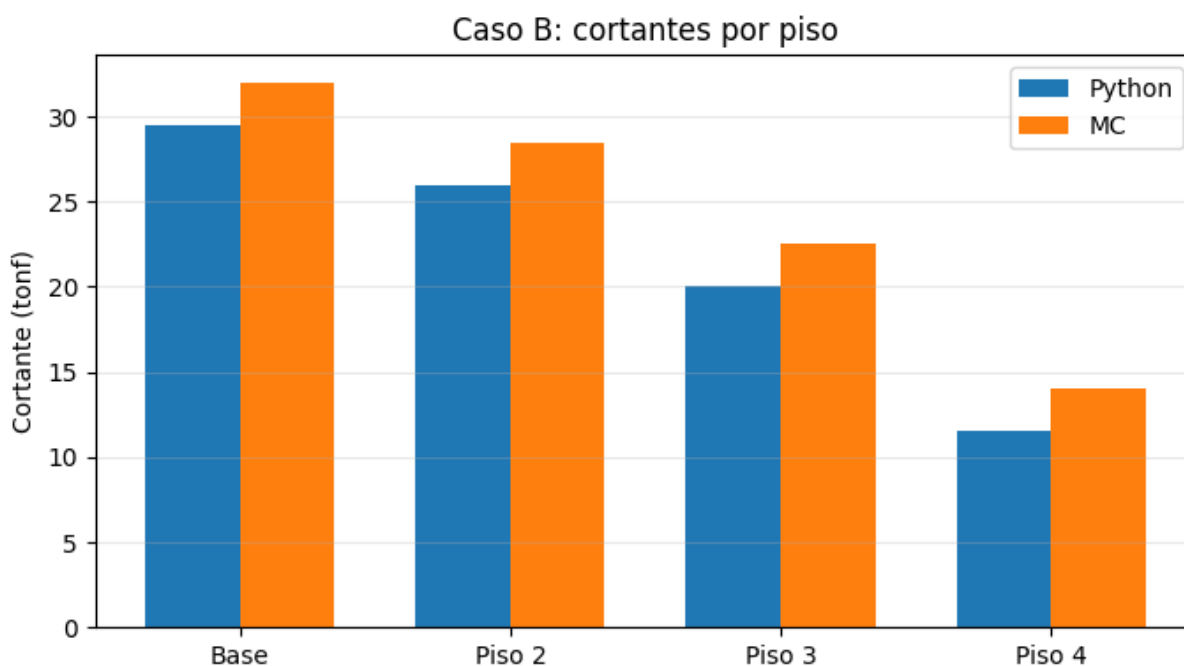


Figura 5. Caso B: comparación de cortantes por piso.

Tabla 17. Comparación de derivas inelásticas del Caso B.

Piso	Deriva inelástica Python	Deriva inelástica MEMORIAS DE CALCULO	Resultado
1	0.0133	0.0196	Cumple / Cumple
2	0.0209	0.0310	No cumple / No cumple
3	0.0181	0.0277	Cumple / No cumple
4	0.0130	0.0197	Cumple / Cumple

Fuente: elaboración propia a partir de resultados obtenidos en Python y MEMORIAS DE CALCULO.

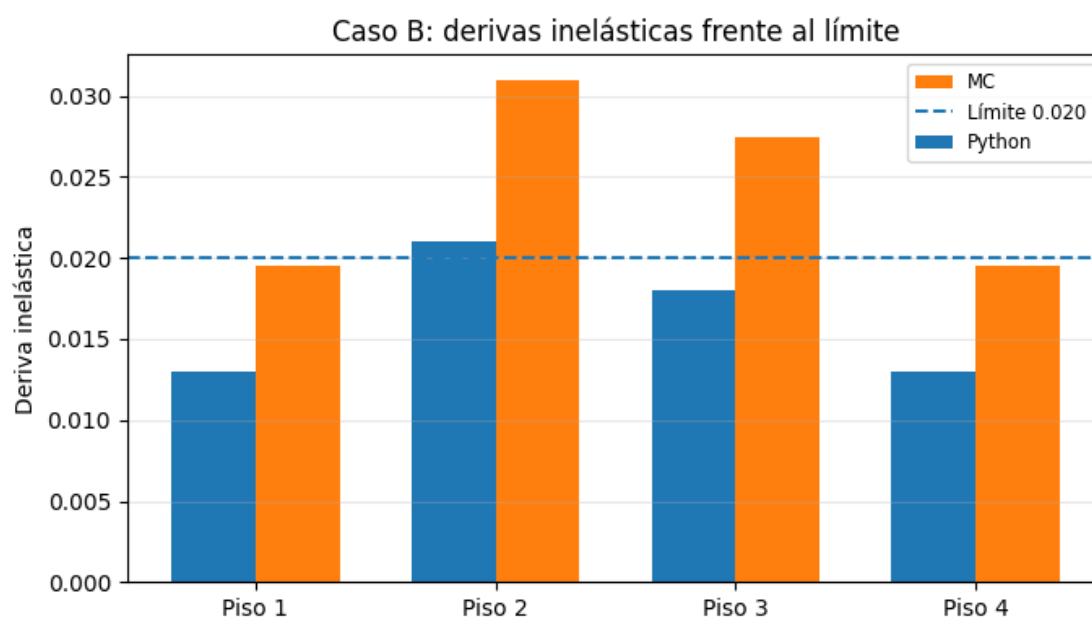


Figura 6. Caso B: derivas inelásticas frente al límite 0.020.

Tabla 18. Síntesis resistente y de desempeño del Caso B.

Control	Valor crítico	Elemento/Nudo crítico	Resultado
$M_u/\phi M_n$ máximo	0.9352	E16	Cumple
$V_u/\phi V_n$ máximo	0.4248	E16	Cumple
$P_u/\phi P_n$ máximo	0.2468	E8	Cumple
Interacción P-M máxima	0.5844	E4	Cumple
M_{pc}/M_{pb} mínimo	1.0689	N18	Cumple

Control	Valor crítico	Elemento/Nudo crítico	Resultado
Deriva crítica	0.0209	Piso 2	No cumple parcial

Fuente: elaboración propia a partir de resultados obtenidos en Python y Memoria de cálculo.

Tabla 19. Comparación local del elemento E25/B1.

Variable	Python	Memoria de Cálculo	Diferencia (%)	Interpretación
Momento Mu/M3	14,983.96 kgf·m	14,981.30 kgf·m	0.018	Concordancia excelente
Momento gráfico Python	15,776.81 kgf·m	14,981.30 kgf·m	5.31	Aceptable; depende del punto de lectura
Cortante Vu/V2	12,268.15 kgf	13,713.30 kgf	10.54	Aceptable; revisar offsets y longitud efectiva

Fuente: elaboración propia a partir de resultados obtenidos en Python y MEMORIAS DE CALCULO.

3.3 Comparación elemento a elemento de fuerzas internas

En el Caso B se compararon 28 elementos estructurales, correspondientes a 16 columnas y 12 vigas. Las variables evaluadas fueron fuerza axial N, cortante V y momento flector M. La comparación completa se presenta en el Anexo A, mientras que la síntesis estadística de errores promedio y máximos se muestra en la Tabla 20.

Tabla 20. Errores promedio y máximos por tipo de elemento.

Grupo	n	Prom. Err N (%)	Prom. Err V (%)	Prom. Err M (%)	Max. Err N (%)	Max. Err V (%)	Max. Err M (%)
Columnas	16	4.77	6.31	3.14	10.14	17.60	8.17
Vigas	12	11.45	3.55	1.06	31.53	6.89	6.12
Total	28	7.63	5.13	2.25	31.53	17.60	8.17

Fuente: elaboración propia a partir de resultados obtenidos en Python y resultados exportados de MEMORIAS DE CALCULO.

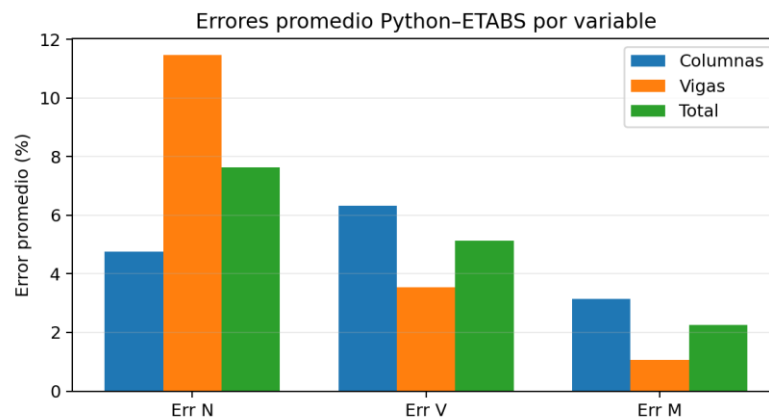


Figura 7. Errores promedio por tipo de elemento y variable.

Fuente: elaboración propia a partir de resultados obtenidos en Python y MEMORIAS DE CALCULO.

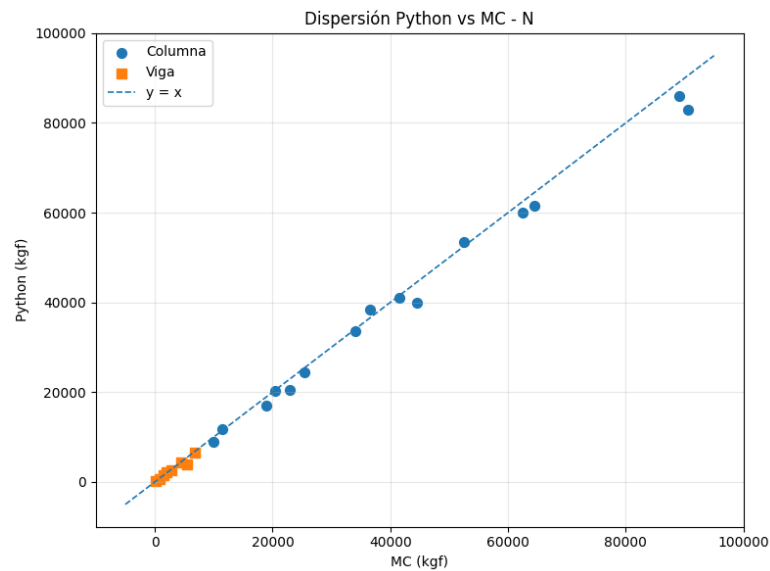


Figura 8. Diagrama de dispersión Python vs Memoria de cálculo para cargas axiales N.

Fuente: elaboración propia a partir de resultados obtenidos en Python y M.C.

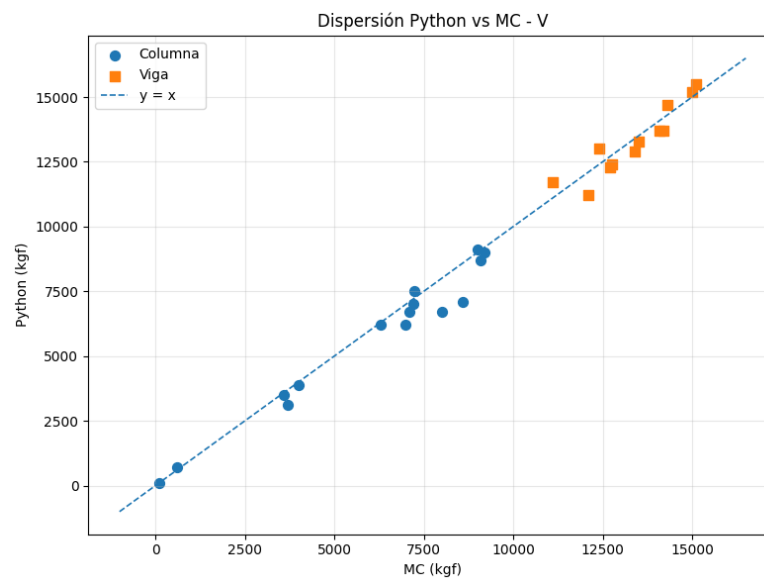


Figura 9 . Diagrama de dispersión Python vs MEMORIAS DE CALCULO para cargas cortantes V .

Fuente: elaboración propia a partir de resultados obtenidos en Python y M.C.

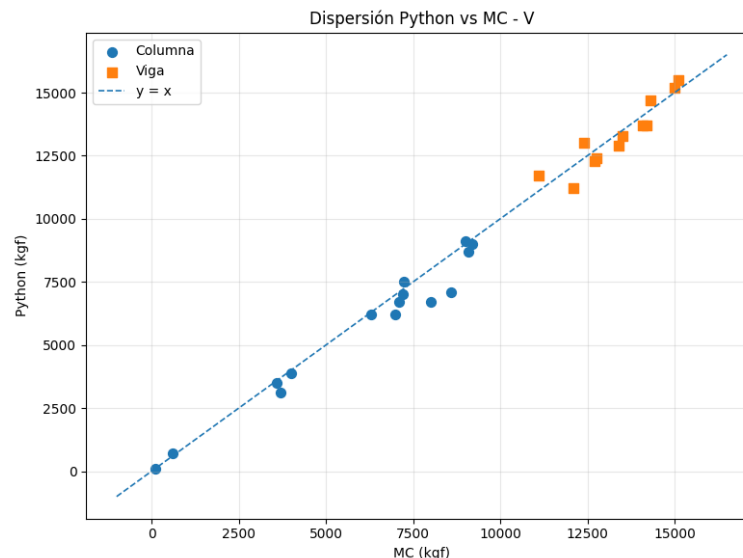


Figura 10 . Diagrama de dispersión Python vs Memoria de cálculo para momentos flectores M .

Fuente: elaboración propia a partir de resultados obtenidos en Python y M.C.

Los resultados muestran que la mejor concordancia se obtuvo en el momento flector, con un error promedio total de 2.25 %. El cortante presentó un error promedio total de 5.13 %, considerado aceptable para una validación preliminar. La fuerza axial presentó un error promedio mayor, especialmente en vigas, debido a que sus valores absolutos son pequeños y, por tanto, pequeñas diferencias generan porcentajes relativos elevados. En conjunto, la comparación elemento a elemento respalda la validez de la herramienta Python para reproducir las fuerzas internas principales del pórtico HSS-IPE.

Discusión

La comparación de los dos casos permitió examinar la influencia de las secciones estructurales sobre la resistencia, la rigidez lateral y la jerarquía resistente de los pórticos analizados; el Caso A, conformado por vigas IPE 300 y columnas HSS $300 \times 300 \times 8$, presentó incumplimientos en las verificaciones de las vigas, la interacción axial-momento de determinadas columnas, las derivas de entrepiso y el criterio columna fuerte-viga débil; el Caso B, integrado por vigas IPE 360 y columnas HSS $400 \times 400 \times 10$, evidenció una mejora en las relaciones de demanda y capacidad, además cumplió el criterio de jerarquía resistente, aunque mantuvo observaciones relacionadas con el control de las derivas; estos resultados muestran que el incremento de las secciones favoreció el comportamiento resistente, pero no solucionó completamente las exigencias de rigidez lateral del sistema estructural.

Tabla 21. Comparación del cumplimiento estructural de los casos analizados

Control evaluado	Caso A	Caso B	Interpretación
Geometría y secciones	Correspondencia entre el modelo y la documentación	Correspondencia entre el modelo y la documentación	Los datos geométricos permiten efectuar la comparación de resultados
Cortante basal	Diferencia reportada de 0,0028 %	Diferencia reportada de 8,89 %	El Caso A presenta mayor proximidad numérica
Periodo	Diferencia reportada de 8,77 %	Diferencia reportada de 3,10 %	El Caso B presenta menor diferencia porcentual
Derivas	No cumple	Cumplimiento parcial	La rigidez lateral constituye el control más sensible
Vigas	No cumplen las verificaciones principales	Cumplen las verificaciones resistentes reportadas	Las vigas IPE 360 presentan mayor capacidad
Columnas	Se reportan incumplimientos en interacción P-M	Cumplen las verificaciones reportadas	Las columnas HSS $400 \times 400 \times 10$ presentan mayor capacidad resistente
Columna fuerte-viga débil	No cumple en el nudo N10	Cumple en los nudos evaluados	El Caso B satisface la jerarquía resistente analizada
Resultado general	Requiere redimensionamiento estructural	Requiere ajuste de rigidez lateral y nueva verificación	Ningún caso debe aceptarse como diseño definitivo sin completar las comprobaciones correspondientes

Fuente: elaboración propia con base en los resultados obtenidos mediante la herramienta desarrollada en Python y los valores consignados en las memorias de cálculo estructural de los casos analizados.

La comparación de las variables globales muestra diferencias reducidas en ciertos resultados, aunque la magnitud de estas variaciones no fue uniforme entre los dos casos; el cortante basal del Caso A presentó una diferencia de 0,0028 %, mientras que en el Caso B alcanzó 8,89 %; respecto del periodo, el Caso B mostró una diferencia menor que el Caso A, sin embargo, esta comparación debe interpretarse con precaución cuando el valor obtenido en Python corresponde a un periodo aproximado determinado mediante la NEC y el valor documental procede de un análisis modal, puesto que ambos resultados no se originan necesariamente en el mismo procedimiento matemático.

Tabla 22. Indicadores principales de comparación numérica

Indicador	Caso	Diferencia reportada (%)	Rango descriptivo
Cortante basal	Caso A	0,0028	Menor al 1 %
Periodo	Caso A	8,7727	Entre 5 % y 10 %

Indicador	Caso	Diferencia reportada (%)	Rango descriptivo
Periodo	Caso B	3,10	Entre 1 % y 5 %
Cortante basal	Caso B	8,89	Entre 5 % y 10 %
Momento del elemento E25/B1	Caso B	0,018	Menor al 1 %
Cortante del elemento E25/B1	Caso B	10,54	Mayor al 10 %

Fuente: elaboración propia con base en los resultados obtenidos mediante la herramienta desarrollada en Python y los valores documentados en las memorias de cálculo estructural.

Las diferencias entre los resultados calculados mediante Python y los valores documentados podrían relacionarse con las hipótesis adoptadas en los modelos estructurales de referencia, entre ellas la incorporación del peso propio, la definición de las fuentes de masa, los diafragmas, las zonas rígidas, las liberaciones, la discretización de los elementos y las condiciones de apoyo; no obstante, estas causas solamente pueden confirmarse mediante la revisión de la configuración original de los modelos empleados para elaborar las memorias de cálculo, debido a que dichos documentos constituyen fuentes técnicas de resultados y no programas informáticos capaces de ejecutar directamente el análisis estructural.

El control de derivas representó el aspecto más sensible de la respuesta estructural; aunque el Caso B cumplió las verificaciones resistentes principales, la herramienta desarrollada en Python obtuvo una deriva inelástica máxima de 0,0209 en el segundo piso, mientras que los valores documentados mostraron superaciones del límite adoptado en los pisos segundo y tercero; esta condición demuestra que el cumplimiento de las relaciones de resistencia no garantiza por sí solo un comportamiento estructural adecuado, dado que el diseño de pórticos especiales de acero debe considerar simultáneamente la capacidad resistente, la rigidez lateral, el control de desplazamientos y la jerarquía columna fuerte–viga débil.

La comparación de los 28 elementos estructurales del Caso B evidenció que los momentos flectores presentaron la menor diferencia promedio, con un valor de 2,25 %, mientras que los cortantes alcanzaron 5,13 % y las fuerzas axiales 7,63 %; la proximidad obtenida en los momentos respalda de manera preliminar el procedimiento de transformación, ensamblaje matricial y recuperación de fuerzas internas implementado en Python; los errores relativos más elevados en las fuerzas axiales de algunas vigas se relacionan con la baja magnitud de estos valores, debido a que una pequeña diferencia absoluta puede producir un porcentaje considerable cuando el valor utilizado como referencia se aproxima a cero.

Desde la perspectiva matemática y computacional, los resultados obtenidos muestran que la representación del pórtico mediante matrices locales de rigidez, transformaciones de coordenadas, ensamblaje de la matriz global y resolución del sistema de ecuaciones permitió reproducir de manera razonable las principales variables estructurales; pese a ello, la validación debe considerarse preliminar porque se limita a dos casos de estudio y a valores documentales de referencia, por lo que futuros análisis deberían incorporar un mayor número de configuraciones, métricas complementarias de error, verificación del residuo numérico y comparación con soluciones analíticas o plataformas abiertas de análisis estructural.

En el ámbito práctico, la herramienta puede utilizarse como apoyo para la revisión preliminar de proyectos estructurales en Riobamba, debido a que facilita la comprobación independiente de cargas,

cortante basal, desplazamientos, derivas, fuerzas internas y relaciones de demanda y capacidad; su aplicación también permite identificar posibles inconsistencias y orientar el redimensionamiento de los elementos, aunque sus resultados no reemplazan el análisis estructural definitivo, la revisión integral de las conexiones, la comprobación completa de los requisitos normativos ni la responsabilidad profesional del calculista.

Conclusiones

- La herramienta computacional desarrollada en Python permitió analizar y Pre-dimensionar pórticos especiales de acero conformados por vigas IPE y columnas HSS mediante el método matricial de rigidez, obteniendo desplazamientos, reacciones, fuerzas internas, derivas y relaciones demanda/capacidad conforme a los criterios establecidos en la Norma Ecuatoriana de la Construcción, por lo que constituye una alternativa abierta y trazable para la revisión estructural preliminar de edificaciones metálicas.
- La comparación con MEMORIAS DE CALCULO mostró una concordancia favorable en las principales variables estructurales, especialmente en los momentos flectores, cuyo error promedio fue de 2,25 %, mientras que los errores promedio en cortante y fuerza axial alcanzaron 5,13 % y 7,63 %, respectivamente, resultados que evidencian que el algoritmo reproduce de manera aceptable el comportamiento global y local de los casos analizados, aunque las diferencias dependen de la fuente de masa, el peso propio, la rigidez y los criterios de modelación empleados en cada programa.
- El análisis de los proyectos Caso A y CASO B permitió comprobar que el aumento de las secciones estructurales mejoró la resistencia y el cumplimiento del criterio columna fuerte–viga débil, aunque el control de derivas continuó siendo el aspecto más sensible del diseño, por lo que la herramienta puede emplearse como apoyo para detectar inconsistencias y seleccionar secciones preliminares, sin sustituir el diseño estructural definitivo, la validación mediante software especializado ni la responsabilidad profesional del calculista.

Referencias Bibliográficas

- American Institute of Steel Construction. (2016a). *ANSI/AISC 341-16: Seismic provisions for structural steel buildings*. AISC.
- American Institute of Steel Construction. (2016b). *ANSI/AISC 360-16: Specification for structural steel buildings*. AISC.
- Andrade Santillán, P. G. (2024a). *Memoria de cálculo estructural del proyecto de construcción de uso familiar y comercial Elvia Cumanda Villagómez* [Memoria técnica]

- no publicada presentada al Gobierno Autónomo Descentralizado Municipal del Cantón Riobamba].
- Andrade Santillán, P. G. (2024b). *Memoria estructural del proyecto “Construcción de comercio y vivienda Bertha Patricia Cajo Gadva”* [Memoria técnica no publicada presentada al Gobierno Autónomo Descentralizado Municipal del Cantón Riobamba].
- Andrade Santillán, P. G. (2026). *Modelo pórtico CAJO: Informe resumido de resultados estructurales, revisión 0* [Informe técnico no publicado].
- Brasier, S., & Pollard, F. (2014). *A Python-based post-processing toolset for seismic analyses*. arXiv. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1412.6410>
- Chapra, S. C., & Canale, R. P. (2021). *Numerical methods for engineers* (8th ed.). McGraw Hill.
- Colcha Sánchez, C. R., & Santacruz Báez, E. E. (2017). *Estudio estadístico sobre el cumplimiento de la Norma NEC (2015), en viviendas de hasta dos pisos con luces de hasta 5 m en la ciudad de Riobamba* [Trabajo de titulación, Universidad Nacional de Chimborazo]. Repositorio Digital de la Universidad Nacional de Chimborazo. <http://dspace.unach.edu.ec/bitstream/51000/3786/1/UNACH-EC-ING-CIVIL-2017-0018.pdf>
- Gobierno Autónomo Descentralizado Municipal del Cantón Riobamba. (2025, 23 de enero). *Resolución administrativa: Licencia de obra mayor No. 021-2025-GADMR-GOT-OM* [Resolución administrativa].
- Informe de resultados de la encuesta municipal de revisión estructural: Proceso de revisión y aprobación de diseños estructurales en el Municipio de Riobamba. (2026).* [Documento técnico consolidado no publicado].
- Kassimali, A. (2012). *Matrix analysis of structures* (2nd ed.). Cengage Learning.
- McKenna, F. (2011). OpenSees: A framework for earthquake engineering simulation. *Computing in Science & Engineering*, 13(4), 58–66. <https://doi.org/10.1109/MCSE.2011.66>
- Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda. (2015a). *Norma Ecuatoriana de la Construcción NEC-SE-AC: Estructuras de acero*. MIDUVI.
- Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda. (2015b). *Norma Ecuatoriana de la Construcción NEC-SE-DS: Peligro sísmico y diseño sismorresistente*. MIDUVI.
- Nam, P. H., Paolacci, F., & Hoang, P. H. (2019). *Seismic performance of an infilled moment-resisting steel frame during the 2016 Central Italy earthquake*. arXiv. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1907.10263>
- Shafegati Charvade, A., & Mousavi Janbeh Sarayi, S. M. (2020). *An analytical approach for preliminary response-based design of semi-rigid moment-resisting frames*. arXiv. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2009.05589>

Anexo A. Comparación completa de fuerzas internas Python–MEMORIAS DE CALCULO

Caso B: Proyecto CASO B | Combinación MC: Comb1 | Unidades: kgf y kgf·m. Los errores se calcularon con la expresión $\text{Error (\%)} = |\text{Python} - \text{Memoria de calculo CALCULO}| / |\text{MC}| \times 100$.

Tabla 23. Comparación completada de fuerzas internas Python–Memoria de cálculo.

Elem.	Tipo	Ref. MC	N Py	N MC	Err N	V Py	V MC	Err V	M Py	M MC	Err M
E0	Columna	Story1-C1	33,388.21	33,680.47	0.87%	3,900.69	3,968.48	1.71%	15,049.64	15,516.52	3.01%
E1	Columna	Story2-C1	24,370.93	25,247.06	3.47%	692.13	614.65	12.61%	1,429.63	1,456.07	1.82%
E2	Columna	Story3-C1	17,010.01	18,929.08	10.14%	102.20	99.41	2.81%	2,357.14	2,515.83	6.31%
E3	Columna	Story4-C1	8,834.41	9,810.72	9.95%	3,522.98	3,559.01	1.01%	5,533.90	5,116.09	8.17%
E4	Columna	Story1-C2	83,203.65	90,323.07	7.88%	8,957.24	9,227.81	2.93%	20,175.70	20,370.99	0.96%
E5	Columna	Story2-C2	59,933.11	62,242.13	3.71%	9,088.20	9,003.37	0.94%	13,559.00	14,075.64	3.67%
E6	Columna	Story3-C2	40,159.96	44,367.27	9.48%	6,711.64	7,067.76	5.04%	11,429.28	11,111.52	2.86%
E7	Columna	Story4-C2	20,346.26	20,473.78	0.62%	6,206.91	6,249.56	0.68%	10,344.37	10,110.37	2.31%
E8	Columna	Story1-C3	85,817.84	89,012.04	3.59%	7,088.88	8,602.84	17.60%	19,524.25	20,824.40	6.24%
E9	Columna	Story2-C3	61,784.07	64,165.34	3.71%	7,481.38	7,215.29	3.69%	11,012.57	11,391.03	3.32%
E10	Columna	Story3-C3	41,132.54	41,392.07	0.63%	6,234.01	6,959.00	10.42%	10,038.27	9,557.98	5.03%
E11	Columna	Story4-C3	20,588.20	22,722.86	9.39%	3,101.50	3,716.56	16.55%	6,722.99	6,732.30	0.14%
E12	Columna	Story1-C4	53,702.82	52,491.77	2.31%	8,917.06	9,064.87	1.63%	20,659.24	20,745.22	0.41%
E13	Columna	Story2-C4	38,453.73	36,343.74	5.81%	8,648.89	9,094.69	4.90%	13,207.57	13,490.98	2.10%
E14	Columna	Story3-C4	24,725.38	24,977.09	1.01%	7,036.29	7,196.65	2.23%	12,209.01	11,995.23	1.78%
E15	Columna	Story4-C4	11,745.07	11,325.39	3.71%	6,665.25	7,960.88	16.27%	13,733.27	13,452.10	2.09%
E16	Viga	Story1-B1	2,370.24	2,319.83	2.17%	15,535.27	15,134.69	2.65%	21,543.88	20,301.69	6.12%
E17	Viga	Story1-B2	1,000.97	1,210.27	17.29%	14,730.31	14,319.96	2.87%	19,078.79	18,864.62	1.14%
E18	Viga	Story1-B3	570.15	663.81	14.11%	15,249.09	14,959.60	1.94%	21,082.93	20,979.61	0.49%
E19	Viga	Story2-B1	866.69	858.94	3.53%	13,741.63	14,206.03	3.27%	19,773.26	19,593.59	0.92%
E20	Viga	Story2-B2	53.26	69.67	23.55%	13,277.32	13,553.32	2.04%	18,831.76	18,730.14	0.54%
E21	Viga	Story2-B3	155.99	158.96	1.87%	13,728.35	14,122.30	2.79%	20,070.44	19,961.59	0.55%
E22	Viga	Story3-B1	1,466.81	1,517.60	3.35%	12,926.95	13,405.66	3.57%	17,430.82	17,474.12	0.25%
E23	Viga	Story3-B2	813.18	977.80	16.84%	12,422.09	12,734.31	2.45%	16,440.41	16,291.35	0.91%
E24	Viga	Story3-B3	1,787.33	1,722.23	3.78%	12,980.31	12,407.35	4.62%	17,804.96	17,751.27	0.30%
E25/B1	Viga	Story4-B1	6,385.65	6,476.01	1.40%	12,268.15	13,713.30	10.54%	14,983.96	14,981.30	0.02%
E26	Viga	Story4-B2	4,041.41	4,043.45	0.05%	11,230.72	12,061.65	6.89%	13,293.48	13,202.88	0.69%
E27	Viga	Story4-B3	4,802.58	4,843.88	2.50%	11,745.07	11,081.04	5.99%	13,733.27	13,619.98	0.83%

Fuente: elaboración propia con resultados de Python M.C

Anexo B. Pseudocódigo general de la herramienta computacional

El siguiente pseudocódigo resume el procedimiento implementado en el cuaderno de Python para la generación geométrica del pórtico, asignación de perfiles, cálculo de cargas, análisis sísmico, ensamblaje matricial, solución numérica, recuperación de fuerzas internas y verificaciones preliminares de los elementos estructurales.

Algoritmo D.1. Análisis y predimensionamiento sísmico de pórticos HSS–IPE

ALGORITMO: Análisis matricial y predimensionamiento de pórticos HSS–IPE

ENTRADAS:

- Número de vanos
- Número de pisos
- Longitudes de los vanos
- Alturas de los pisos
- Propiedades mecánicas del acero
- Perfiles IPE asignados a las vigas
- Dimensiones HSS asignadas a las columnas
- Cargas muertas por piso
- Cargas vivas según el uso de la edificación
- Parámetros sísmicos establecidos en la NEC
- Condiciones de apoyo
- Combinación de carga seleccionada

SALIDAS:

- Coordenadas de nodos
- Conectividad de elementos
- Matrices locales y globales de rigidez
- Vector global de cargas
- Desplazamientos nodales
- Fuerzas axiales, cortantes y momentos
- Derivas de entrepiso
- Verificaciones de vigas y columnas
- Verificación columna fuerte–viga débil
- Recomendaciones preliminares de perfiles
- Tablas, gráficos y reporte técnico

INICIO

1. Importar las bibliotecas numéricas, gráficas y de procesamiento de datos
2. Solicitar el número de vanos y pisos
3. Solicitar las longitudes de los vanos y las alturas de los pisos

4. Verificar que todos los datos ingresados sean numéricos y mayores que cero
5. Generar las coordenadas acumuladas en las direcciones horizontal y vertical
6. PARA cada intersección entre ejes y niveles HACER
 - Crear un nodo con coordenadas X e Y
 - Asignar un identificador único al nodoFIN PARA
7. Generar los elementos verticales entre nodos consecutivos
 - Clasificar estos elementos como columnas
8. Generar los elementos horizontales entre nodos consecutivos
 - Clasificar estos elementos como vigas
9. Mostrar gráficamente el pórtico inicialmente generado
10. Permitir, de manera opcional, la eliminación de elementos que no formen parte de la configuración estructural real
11. Eliminar los nodos que queden desconectados
12. Reindexar los nodos y elementos resultantes
13. PARA cada viga HACER
 - Seleccionar un perfil de la base de datos IPE
 - Recuperar el área, la inercia, el módulo resistente y el área de cortante
 - Almacenar las propiedades geométricas de la secciónFIN PARA
14. PARA cada columna HACER
 - Ingresar las dimensiones exteriores H, B y el espesor t
 - Calcular el área de la sección HSS
 - Calcular los momentos de inercia principales
 - Calcular los radios de giro
 - Calcular los módulos resistentes
 - Almacenar las propiedades geométricas de la secciónFIN PARA
15. Ingresar las propiedades mecánicas del acero:
 - Módulo de elasticidad E
 - Esfuerzo de fluencia F_y
 - Factores de resistencia
16. Calcular el peso propio de las vigas a partir del área y la densidad del acero
17. Ingresar las cargas permanentes correspondientes a:

Losa
Acabados
Instalaciones
Mampostería
Elementos no estructurales
Peso propio

18. Calcular la carga muerta distribuida D de cada viga
19. Ingresar la carga viva L de cada piso según el uso de la edificación
20. Asignar las cargas muertas y vivas a las vigas correspondientes
21. Ingresar los parámetros sísmicos establecidos en la NEC:
 - Factor de zona sísmica Z
 - Factor de importancia I
 - Factores de sitio F_a , F_d y F_s
 - Factor de reducción R
 - Coefficientes C_t y α
 - Coefficientes de regularidad
 - Peso sísmico de la estructura
22. Calcular la altura total H_n de la edificación
23. Calcular el periodo aproximado:
 $T_a \leftarrow C_t \times H_n^\alpha$
24. Calcular la aceleración espectral S_a correspondiente al periodo T_a
25. Calcular el coeficiente sísmico C_s
26. Calcular el cortante basal:
 $V \leftarrow C_s \times W$
27. Distribuir el cortante basal entre los pisos según el peso y la altura correspondiente a cada nivel
28. Transformar las fuerzas sísmicas por piso en fuerzas nodales horizontales
29. Generar las combinaciones de carga:
 - COMB1 $\leftarrow 1,4D$
 - COMB2 $\leftarrow 1,2D + 1,6L$
 - COMB3 $\leftarrow 1,2D + 0,5L + E$
 - COMB4 $\leftarrow 1,2D + 0,5L - E$
 - COMB5 $\leftarrow 0,9D + E$
 - COMB6 $\leftarrow 0,9D - E$

30. Seleccionar la combinación de carga que será analizada
31. Asignar a cada nodo tres grados de libertad:
 - Desplazamiento horizontal U_x
 - Desplazamiento vertical U_y
 - Rotación R_z
32. Restringir los grados de libertad correspondientes a los apoyos de la base
33. Numerar únicamente los grados de libertad no restringidos
34. Inicializar la matriz global de rigidez K con valores iguales a cero
35. PARA cada elemento estructural e HACER

Obtener las coordenadas de los nodos inicial y final

Calcular:

$$\Delta x \leftarrow X_j - X_i$$

$$\Delta y \leftarrow Y_j - Y_i$$

$$L \leftarrow \sqrt{(\Delta x)^2 + (\Delta y)^2}$$

$$c \leftarrow \Delta x / L$$

$$s \leftarrow \Delta y / L$$

Verificar que L sea mayor que cero

Recuperar E , A e I de la sección asignada

Construir la matriz local de rigidez k_e de dimensión 6×6

Construir la matriz de transformación T_e mediante c y s

Transformar la matriz local al sistema global:

$$k_{e_global} \leftarrow T_e^T \times k_e \times T_e$$

Identificar los grados de libertad globales del elemento

Ensamblar k_{e_global} dentro de la matriz global K

FIN PARA

36. Verificar que la matriz global K :
 - Sea cuadrada
 - Contenga valores distintos de cero
 - Sea aproximadamente simétrica
37. Inicializar el vector global de cargas F con valores iguales a cero

38. PARA cada viga HACER

Recuperar la carga distribuida q de la combinación seleccionada

Calcular el vector de cargas nodales equivalentes en coordenadas locales

Transformar el vector local al sistema global

Ensamblar sus componentes dentro del vector global F

FIN PARA

39. PARA cada fuerza sísmica nodal HACER

Incorporar su valor en el grado de libertad horizontal correspondiente

FIN PARA

40. Verificar la compatibilidad dimensional entre K y F

41. Calcular el determinante y el número de condición de K

42. SI la matriz K es regular ENTONCES

Resolver el sistema:

$$K \times U = F$$

utilizando un solucionador directo

EN CASO CONTRARIO

Reportar una advertencia de singularidad

Revisar apoyos, conectividad y elementos sin rigidez

Emplear la pseudoinversa únicamente como recurso diagnóstico temporal

FIN SI

43. Calcular el vector de fuerzas reconstruido:

$$F_{\text{calculado}} \leftarrow K \times U$$

44. Calcular el residuo numérico:

$$r \leftarrow F - F_{\text{calculado}}$$

45. Calcular la norma del residuo:

$$er \leftarrow \|r\|$$

46. SI la norma del residuo supera la tolerancia establecida ENTONCES

Emitir una advertencia sobre la solución numérica

FIN SI

47. Organizar los desplazamientos por nodo:

U_x

U_y

Rz

48. PARA cada elemento estructural e HACER

Extraer del vector U los desplazamientos globales del elemento

Transformar los desplazamientos al sistema local:

$$de_local \leftarrow T_e \times de_global$$

Calcular el vector local de cargas equivalentes

Recuperar las fuerzas internas de los extremos:

$$fe_local \leftarrow k_e \times de_local - fe_cargas$$

Extraer:

Fuerza axial N_i y N_j

Cortante V_i y V_j

Momento M_i y M_j

Determinar los máximos absolutos N, V y M

Almacenar los resultados del elemento

FIN PARA

49. Generar los diagramas de:

Fuerza axial

Fuerza cortante

Momento flector

Forma deformada

50. PARA cada viga IPE HACER

Calcular la capacidad nominal a flexión:

$$M_n \leftarrow F_y \times Z_x$$

Calcular la resistencia de diseño:

$$\phi M_n \leftarrow \phi_b \times M_n$$

Calcular la relación de flexión:

$$R_F \leftarrow M_u / \phi M_n$$

Calcular la capacidad nominal a cortante:

$$V_n \leftarrow 0,60 \times F_y \times A_v$$

Calcular la resistencia de diseño:

$$\phi V_n \leftarrow \phi_v \times V_n$$

Calcular la relación de cortante:

$$RV \leftarrow Vu/\phi V_n$$

Calcular el desplazamiento nodal máximo

Comparar el desplazamiento con el límite $L/360$

SI $RF \leq 1$ Y $RV \leq 1$ Y la deflexión cumple ENTONCES

Clasificar la viga como CUMPLE

EN CASO CONTRARIO

Clasificar la viga como NO CUMPLE

FIN SI

FIN PARA

51. PARA cada columna HSS HACER

Calcular la relación de esbeltez:

$$\lambda \leftarrow KL/r$$

Calcular el esfuerzo crítico elástico:

$$F_e \leftarrow \pi^2 E / (KL/r)^2$$

Calcular el esfuerzo crítico de compresión F_{cr}
según el intervalo de esbeltez aplicable

Calcular la capacidad nominal:

$$P_n \leftarrow F_{cr} \times A$$

Calcular la resistencia de diseño:

$$\phi P_n \leftarrow \phi_c \times P_n$$

Calcular:

$$R_A \leftarrow P_u / \phi P_n$$

$$R_M \leftarrow M_u / \phi M_n$$

SI $R_A \geq 0,20$ ENTONCES

$$\text{Interacción} \leftarrow R_A + (8/9)R_M$$

EN CASO CONTRARIO

$$\text{Interacción} \leftarrow R_A/2 + R_M$$

FIN SI

SI $R_A \leq 1$ Y KL/r cumple Y la interacción ≤ 1 ENTONCES

Clasificar la columna como CUMPLE

EN CASO CONTRARIO

Clasificar la columna como NO CUMPLE

FIN SI

FIN PARA

52. PARA cada piso i HACER

Determinar el desplazamiento horizontal máximo del nivel superior

Determinar el desplazamiento horizontal del nivel inferior

Calcular el desplazamiento relativo:

$$\Delta_i \leftarrow |U_i - U_{i-1}|$$

Calcular la deriva elástica:

$$\theta_e \leftarrow \Delta_i / h_i$$

Calcular la deriva inelástica:

$$\theta_i \leftarrow 0,75 \times R \times \theta_e$$

SI $\theta_i \leq 0,020$ ENTONCES

Clasificar la deriva como CUMPLE

EN CASO CONTRARIO

Clasificar la deriva como NO CUMPLE

FIN SI

FIN PARA

53. PARA cada nudo interior viga–columna HACER

Calcular la suma de capacidades de las columnas:

$$\Sigma M_{pc}$$

Calcular la suma de capacidades de las vigas:

$$\Sigma M_{pb}$$

Calcular:

$$RSCWB \leftarrow \Sigma M_{pc} / \Sigma M_{pb}$$

SI $RSCWB \geq 1,00$ ENTONCES

El nudo cumple columna fuerte–viga débil

EN CASO CONTRARIO

El nudo no cumple columna fuerte–viga débil

FIN SI

FIN PARA

54. Identificar las vigas, columnas, pisos y nudos que no cumplen

55. Generar recomendaciones preliminares:

- Incrementar el perfil IPE de las vigas que no cumplen
- Incrementar las dimensiones o el espesor de las columnas HSS
- Aumentar la rigidez lateral cuando las derivas sean excesivas
- Revisar la relación columna fuerte–viga débil
- Repetir todo el análisis después de modificar las secciones

56. Generar tablas de resultados y gráficos

57. Crear el reporte técnico en formato PDF

FIN

Contribuciones de los autores:

Pablo Geovanny Andrade Santillán: Investigación, búsqueda y recopilación bibliográfica, conceptualización del estudio, supervisión del proyecto, validación científica y revisión crítica del manuscrito.

Lorena Paulina Molina Valdiviezo: Diseño metodológico, resultados, discusión, validación de contenidos, revisión crítica, corrección académica y gestión del proyecto, análisis de la literatura científica y redacción del borrador original.

Conflicto de intereses:

Los autores declaran que no existe conflicto de interés