



REVISTA TÉCNICA

DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA

Una Revista Internacional Arbitrada
que está indizada en las publicaciones
de referencia y comentarios:

- SCOPUS
- Compendex
- Chemical Abstracts
- Metal Abstracts
- World Aluminium Abstracts
- Mathematical Reviews
- Petroleum Abstracts
- Current Mathematical Publications
- MathSci
- Revenct
- Materials Information
- Periódica
- Actualidad Iberoamericana

UNIVERSIDAD DEL ZULIA



REVISTA TÉCNICA
DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA

Hacia los 130 años de creación de la Universidad del Zulia

"Buscar la verdad y afianzar los valores trascendentales", misión de las universidades en su artículo primero, inspirado en los principios humanísticos. Ley de Universidades 8 de septiembre de 1970.

Dynamic linear method for simulating seismic events and their effect on school buildings

*Cristian Luis Inca Balseca** , *Jorge Milton Lara Sinaluisa* , *Ángel Patricio Mena Reinoso* 

Facultad de Informática y Electrónica, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba 060106, Ecuador

*Autor de Contacto: cristianl.inca@esepoch.edu.ec

<https://doi.org/10.22209/rt.ve2020a03>

Recepción: 31/10/2019 | Aceptación: 14/01/2020 | Publicación: 01/03/2020

Abstract

This research aims toward the application of a linear analysis model to evaluate the kinematic responses of a school building, subjected to a simulation of a medium intensity earthquake. Applied the method of time-history analysis of the Newmark algorithm and compared with the results obtained using the ETABS and MATLAB simulation models to study the horizontal and vertical structural displacement at different levels (ground floor, first floor, second floor and roof) of the Technical University of Machala's classroom building, Ecuador. The results show that the Newmark algorithm presents results very close to those obtained with the ETABS and MATHLAB models, which differ in ranges between 0.18% and 47.01%, being the most accurate model at the structure lower levels, which allows the algorithm to be considered as a useful tool in an analysis within the elastic range.

Keywords: models; seismic risks; vulnerability.

Método dinámico lineal para la simulación de eventos sísmicos y su efecto en edificaciones escolares

Resumen

La presente investigación tiene como objetivo aplicar un modelo de análisis lineal para evaluar las respuestas cinemáticas de una edificación escolar, sometidas a una simulación de un sismo de mediana intensidad. Aplicando el método análisis tiempo-historia el algoritmo de Newmark y se comparó con los resultados obtenidos usando los modelos de simulación ETABS y MATHLAB para estudiar el desplazamiento estructural horizontal y vertical en los diferentes niveles (planta baja, primer piso, segundo piso y cubierta) del edificio de aula de la Universidad Técnica de Machala, Ecuador. Los resultados muestran que el algoritmo Newmark presenta resultados muy cercanos a los obtenidos con los modelos ETABS y MATHLAB, los cuales difieren en un rango que oscila entre el 0,18% y 47,01%, siendo el modelo más preciso en los niveles más bajo de la estructura, lo que permite considerar al algoritmo como una herramienta útil en un análisis dentro del rango elástico.

Palabras clave: modelos; riesgos sísmicos; vulnerabilidad.

Introducción

Los eventos sísmicos de mediana y alta intensidad constituyen un riesgo de desastre natural que puede afectar a las poblaciones más vulnerables, especialmente aquellas que se encuentran edificaciones con alta densidad de población como hospitales y escuelas [1] [2].

Las poblaciones ubicadas a lo largo de la cordillera andina son zonas de alto riesgo sísmicos [3] [4], por lo que las normas de construcción deben adecuarse a esta condición [5], esto considerando que no existen modelos ni programas computarizados para predecir los eventos sísmicos, pero si programas para evaluar el efecto de sismos de duración y magnitud conocida sobre las edificaciones [6].

Entre los procedimientos que se han empleado con éxito para el estudio de la vulnerabilidad sísmica están los programas computarizados como ETABS, MATLAB y SELINA [7] [8] [9] los cuales se basan en una análisis histórico- temporal de un evento sísmico, basado en la simulación de acelogramas, generados con la información de eventos sísmicos previos en la zona bajo estudio.

El análisis tiempo historia es un análisis paso a paso de la respuesta dinámica de una estructura para una carga específica que puede variar con el tiempo. Cuando el comportamiento sísmico de las estructuras lo amerita es necesario un estudio más refinado para representar con mayor aproximación el comportamiento lineal de las estructuras [10] [11]. El método "paso a paso" en el tiempo consiste en someter a la estructura a un sismo real o sintético pudiendo estar o no escalado.

Las ecuaciones de equilibrio dinámico a ser resueltas están dadas por:

$$ku(t) + Cu(t) + Mu(t) = p(t) \quad (1)$$

Donde K es la matriz de rigidez, C es la matriz de amortiguamiento, M es la matriz de masa, u , \dot{u} , \ddot{u} , vienen a ser los desplazamientos, velocidades y aceleraciones de la estructura, y p las cargas aplicadas. Si la carga incluye aceleración del suelo, como lo es en el presente proyecto los desplazamientos, velocidades y aceleraciones son relativos a este movimiento del suelo.

En método de Newmark es un de métodos de integración de paso simple para la solución de problemas de dinámica estructural para cargas sísmicas [12]. Dentro de las ecuaciones se utilizan los parámetros β y γ , los cuales sirven para expresar la forma en que varía la aceleración a través del tiempo. Para el desarrollo de una familia de métodos paso a paso en el tiempo Newmarck se basó en

las siguientes ecuaciones:

$$\dot{q}_{i+1} = \dot{q}_i + [(1 - \gamma)\ddot{q}_i + \gamma\ddot{q}_{i+1}]\Delta t \quad (2)$$

$$q_{i+1} = q_i + \dot{q}_i\Delta t + \left[\left(\frac{1}{2} - \beta\right)\ddot{q}_i + \beta\ddot{q}_{i+1}\right]\Delta t^2 \quad (3)$$

Los parámetros β y γ son los que definen la variación de la aceleración durante un paso de tiempo y determinan además las características de estabilidad y precisión del método. La selección típica de γ es de $\frac{1}{2}$, y $1/6 \leq \beta \leq 1/4$ es satisfactoria desde todos los puntos de vista, incluido el de precisión. Estas dos ecuaciones, en combinación con la ecuación de equilibrio al final del paso de tiempo, proporcionan la base para calcular q_{i+1} , \dot{q}_{i+1} , \ddot{q}_{i+1} en el tiempo $i+1$ a partir de q_i , \dot{q}_i , \ddot{q}_i conocidas en el tiempo i .

El desarrollo matemático del algoritmo de Newmark, se describe a continuación. Considerando que sea \ddot{q}_i y q_{i+1} y los vectores de respuesta de aceleración de un sistema de n grados de libertad en los tiempos discretos t_i y t_{i+1} , ante acciones dinámicas y Δt el incremento de tiempo [13]. Se define:

$$\tau = t - t_i \text{ para } t_i \leq t \leq t_{i+1} \quad (4)$$

Se puede observar de la ecuación (4), que para $\tau=0$, se tiene que $\tau=0$ y para

$$\text{Siendo: } \Delta t = t_{i+1} - t_i \quad t = t_{i+1} \rightarrow \tau = \Delta t.$$

La aceleración del sistema para un instante cualquiera τ , viene dada por:

$$\ddot{q}(\tau) = \ddot{q}_i + f(\tau)(\ddot{q}_{i+1} - \ddot{q}_i) \quad (5)$$

De tal forma que:

$$f(\tau) = 0 \text{ para } \tau = 0$$

$$f(\tau) = 1 \text{ para } \tau = \Delta t$$

En síntesis, se tiene que:

$$0 \leq f(\tau) \leq 1$$

La ecuación (5) considera que la ley de variación de las aceleraciones en el intervalo $[t_i, t_{i+1}]$ es la misma para los n grados de libertad. La velocidad del sistema para un tiempo cualquiera del intervalo puede expresarse como:

$$\dot{q}(\tau) = \dot{q}_i + \int_0^\tau \ddot{q}(\tau) d\tau$$

Al reemplazar (5) en (6) se tiene:

$$\dot{q}(\tau) = \dot{q}_i + \int_0^\tau \ddot{q}_i d\tau + \int_0^\tau (\ddot{q}_{i+1} - \ddot{q}_i) f(\tau) d\tau \quad (7)$$

Se puede mencionar que \dot{q}_i , \ddot{q}_i y \ddot{q}_{i+1} y son

los vectores de velocidad y aceleración en los tiempos discretos t_i y t_{i+1} y respectivamente, son cantidades constantes. Luego:

$$\dot{q}(\tau) = \dot{q}_i + \ddot{q}_i \tau + (\ddot{q}_{i+1} - \ddot{q}_i) \int_0^\tau f(\tau) d\tau \quad (8)$$

Sea:

$$g(\tau) = \int_0^\tau f(\tau) d\tau \quad (9)$$

$$\Delta t \gamma = \int_0^{\Delta t} f(\tau) d\tau \quad (10)$$

$$\Delta t^2 \beta = \int_0^{\Delta t} g(\tau) d\tau \quad (11)$$

Para $\tau=t_{i+1}=\Delta t$ se tiene al reemplazar (10) en (7)

$$\dot{q}_{i+1} = \dot{q}_i + \ddot{q}_i \Delta t + (\ddot{q}_{i+1} - \ddot{q}_i) \gamma \Delta t \quad (12)$$

De donde:

$$\ddot{q}_{i+1} = \dot{q}_i + [(1 - \gamma)\ddot{q}_i + \gamma\ddot{q}_{i+1}] \Delta t \quad (13)$$

Al reemplazar (9) en (7) e integrar, se halla:

$$\int_0^\tau \dot{q}(\tau) d\tau = \int_0^\tau \dot{q}_i d\tau + \int_0^\tau \ddot{q}_i \tau d\tau + (\ddot{q}_{i+1} - \ddot{q}_i) \int_0^\tau g(\tau) d\tau$$

$$q(\tau) - q_i = \dot{q}_i \tau + \ddot{q}_i \frac{\tau^2}{2} + (\ddot{q}_{i+1} - \ddot{q}_i) \int_0^\tau g(\tau) d\tau$$

$$q(\tau) = q_i + \dot{q}_i \tau + \ddot{q}_i \frac{\tau^2}{2} + (\ddot{q}_{i+1} - \ddot{q}_i) \int_0^\tau g(\tau) d\tau \quad (14)$$

Para $\tau=t_{i+1}=\Delta t$ se encuentra, luego de sustituir (11)

$$q_{i+1} = q_i + \dot{q}_i \Delta t + \ddot{q}_i \frac{\Delta t^2}{2} + (\ddot{q}_{i+1} - \ddot{q}_i) \beta \Delta t^2 \quad (15)$$

De donde:

$$q_{i+1} = q_i + \dot{q}_i \Delta t + \left[\left(\frac{1}{2} - \beta \right) \ddot{q}_i + \beta \ddot{q}_{i+1} \right] \Delta t^2 \quad (16)$$

$$q_{i+1} = q_i + \dot{q}_i \Delta t + \left(\frac{1}{2} - \beta \right) \ddot{q}_i \Delta t^2 + \beta \ddot{q}_{i+1} \Delta t^2 \quad (17)$$

Al despejar \ddot{q}_{i+1} de esta última ecuación, se tiene:

$$\ddot{q}_{i+1} = \frac{1}{\beta \Delta t^2} [q_{i+1} - q_i - \dot{q}_i \Delta t] - \left(\frac{1}{2\beta} - 1 \right) \ddot{q}_i \quad (18)$$

Al reemplazar (18) en (12), se obtiene:

$$\dot{q}_{i+1} = \dot{q}_i + (1 - \gamma) \ddot{q}_i \Delta t + \gamma \Delta t \frac{1}{\beta \Delta t^2} [q_{i+1} - q_i - \dot{q}_i \Delta t] - \gamma \Delta t \ddot{q}_i \left(\frac{1}{2\beta} - 1 \right) \quad (19)$$

Luego:

$$\dot{q}_{i+1} = \frac{\gamma}{\beta \Delta t} (q_{i+1} - q_i) + \left(1 - \frac{\gamma}{\beta} \right) \dot{q}_i + \left(1 - \frac{\gamma}{2\beta} \right) \Delta t \ddot{q}_i \quad (20)$$

Aplicación del Método de Newmark

El sistema de ecuaciones diferenciales que gobierna los problemas dinámicos, está definido por la ecuación (21). La solución de este sistema se realizó con el método de Newmark.

$$M\ddot{q} + C\dot{q} + Kq = -MJa(t) \quad (21)$$

Donde M, C, K son las matrices de Masa, Amortiguamiento y Rigidez del sistema.

Se consideran constantes para análisis lineal, q, \dot{q}, \ddot{q} son los vectores de desplazamiento, velocidad y aceleración, respectivamente, J es un vector que contiene unos para el caso plano, depende del modelo numérico de análisis, $a(t)$ es la aceleración de movimiento del suelo. Normalmente se considera la componente horizontal [14].

Para el tiempo discreto t_{i+1} , la ecuación (21), queda:

$$M\ddot{q}_{i+1} + C\dot{q}_{i+1} + Kq_{i+1} = -MJa_{i+1} \quad (22)$$

Por otra parte, el vector de desplazamientos en forma incremental es

$$q_{i+1} = \Delta q_{i+1} + q_i \quad (23)$$

Las ecuaciones (12) y (11) en función de quedan:

$$\ddot{q}_{i+1} = \frac{1}{\beta \Delta t^2} \Delta q_{i+1} - \frac{1}{\beta \Delta t} \dot{q}_i - \left(\frac{1}{2\beta} - 1 \right) \ddot{q}_i \quad (24)$$

$$\dot{q}_{i+1} = \frac{\gamma}{\beta \Delta t} \Delta q_{i+1} + \left(1 - \frac{\gamma}{\beta} \right) \dot{q}_i + \left(1 - \frac{\gamma}{2\beta} \right) \Delta t \ddot{q}_i \quad (25)$$

Finalmente, al reemplazar (25), (24) y (23) en (22), se obtiene luego de agrupar términos

$$\bar{K} \Delta q_{i+1} = F_{i+1} \quad (26)$$

$$\bar{K} = K + \frac{1}{\beta \Delta t^2} M + \frac{\gamma}{\beta \Delta t} C \quad (27)$$

$$F_{i+1} = -MJa_{i+1} + M \left[\frac{1}{\beta \Delta t} \dot{q}_i + \left(\frac{1}{2\beta} - 1 \right) \ddot{q}_i \right] - c \left[\left(1 - \frac{\gamma}{\beta} \right) \dot{q}_i + \left(1 - \frac{\gamma}{2\beta} \right) \Delta t \ddot{q}_i \right] - Kq_i \quad (28)$$

Se denomina a \bar{K} como la matriz de rigidez efectiva, que es una matriz constante para análisis lineal y a F_{i+1} el vector de cargas efectivas, que es variable en cada instante de tiempo.

Al resolver el sistema de ecuaciones lineales definido en (26) se encuentra Δq_{i+1} .

Por lo tanto el vector de desplazamientos para

el tiempo $i+1$ se obtendrá sumando estos valores a los del tiempo i , utilizando la ecuación (23). La aceleración y velocidad para el tiempo $i+1$ se encuentran con las ecuaciones (24) y (25).

Si en el tiempo $t=0$, la aceleración del suelo es diferente de cero y si las condiciones iniciales $\dot{q}(0)=q(0)=0$. Se debe evaluar $\dot{q}(0)$ con la ecuación del movimiento que queda:

$$M\dot{q}(0) = -M J a(0) \quad (29)$$

En el caso de estudio se simuló un sismo de mediana magnitud y corta duración ocurrido en la ciudad de Pedernales, en la costa pacífica del Ecuador.

Para la simulación se aplicó el método de análisis tiempo-historia, que examina los resultados obtenidos mediante el algoritmo de Newmark, se consideró que la respuesta de la estructura corresponde al espectro del análisis lineal, así mismo se analizó al edificio como una estructura integrada por pórticos planos, donde cada nodo posee tres grados de libertad: uno para el desplazamiento horizontal, uno para el desplazamiento vertical y otro para el desplazamiento rotacional y finalmente se comparó el desplazamiento horizontal obtenido mediante el algoritmo implementado que se obtiene con ayuda de los softwares de cálculo Estructural ETABS y MATLAB, con el propósito de validar los resultados.

Materiales y Métodos

Ubicación

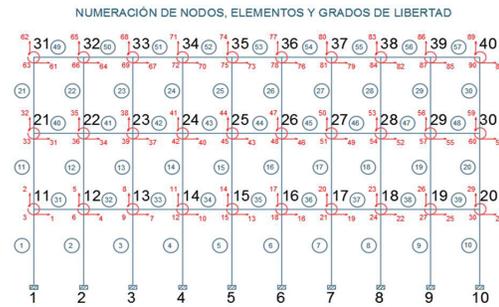
La edificación bajo estudio se encuentra ubicada en la Universidad Técnica de Machala, Ecuador. La mayor parte de sus instalaciones son bloques de aulas de tres niveles con distribución y dimensiones muy similares, construidos en la década del 70, con procedimientos y normas constructivas vigentes para la época. La edificación cuenta de 4 niveles planta baja, primer piso, segundo piso y cubierta, para el análisis se evaluaron tanto los pórticos longitudinales (A y B) y los pórticos transversales (1 y 2) Figura 1.



Figura 1. Estructura evaluadas en universidad técnica de Machala. a.- planta baja; b.- primer piso; c.- segundo piso d.- cubierta

Pórtico longitudinal A y B

En la Figura 2 se puede apreciar que los pórticos A y B tienen 20 nodos, 27 elementos y cuenta con 45 grados de libertad, debido a que es un pórtico plano con 3 grados de libertad por nodo, además de sus respectivas dimensiones. Aunque los pórticos A y B tienen las mismas dimensiones, sus cargas estáticas son diferentes ya que el pórtico B tiene que soportar un volado de 2,30 m de ancho y el pórtico A no tiene que soportar esas cargas.



NOMENCLATURA
 — GRADO DE LIBERTAD EN EL SENTIDO HORIZONTAL
 | GRADO DE LIBERTAD EN EL SENTIDO VERTICAL
 ○ GRADO DE LIBERTAD CORRESPONDIENTE AL GIRO
 ○ ELEMENTO 1
 1 NODO 1

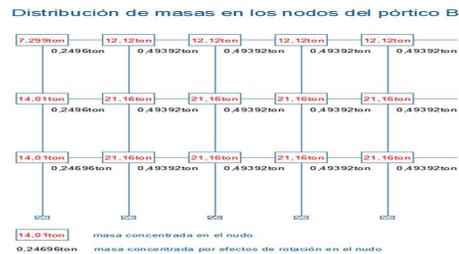


Figura 2. Pórtico longitudinal A y B en bloques de aulas, Universidad Técnica de Machala, Ecuador.

La carga en el pórtico A se distribuyó en los nodos 7, 8, 9, 10, 12, 13, 14 y 15 con una carga viva 2,41 Tn: una carga muerta de 10,16 Tn y una carga total de 12,47 Tn, en los nodos 6 y 11 la distribución de carga fue de 1,21 Tn para la carga viva; 8,66 Tn de carga muerta y una carga total de 9,77 Tn, mientras que en los nodos 17,18,19 y 20 fue carga viva 0,85 Tn: una carga muerta de 8,82 Tn y una carga total de 7,67; finalmente la distribución de carga en el nodo 16 fue de 0,42, 4,15 y 5,47 Tn para las cargas vivas, muerta y total respectivamente.

En el pórtico B se distribuyó en los nodos 7, 8, 9, 10, 12, 13, 14 y 15 con una carga viva 6,27 Tn: una carga muerta de 14,88 Tn y una carga total de 21,87 Tn, en los nodos 6 y 11 la distribución de carga fue de 3,14 Tn para

la carga viva; 10,87 Tn de carga muerta y una carga total de 14,01 Tn, mientras que en los nodos 17,18, 19 y 20 fue carga viva 1,40 Tn: una carga muerta de 10,69 y una carga total de 12,09 Tn, finalmente la distribución de carga en el nodo 16 fue de 0,70, 6,60 y 7,30 Tn para las cargas vivas, muerta y total respectivamente.

Pórtico transversal 1 y 2

El análisis del comportamiento de la estructura en el tiempo se va a desarrollar para los pórticos transversales denominados 1 y 2, aplicando el mismo método de Newmark y sometiendo a los pórticos al “componente Norte” del acelerograma del sismo ocurrido en Pedernales el 16 de Abril de 2016. El pórtico 1 tiene las mismas dimensiones que el pórtico 2 pero sus cargas estáticas son distintas, ya que el pórtico 1 está en el extremo del edificio y el pórtico 2 igual que los pórticos 3, 4, 5, 6, 7, 8 y 9, son centrales (Figura 3).

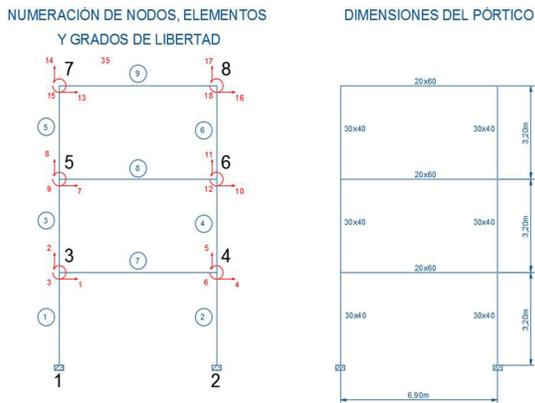


Figura 3. Descripción de pórticos transversales 1 y 2 de bloques de aulas, Universidad Técnica de Machala, Ecuador.

Descripción del sismo usado en la simulación

Para simular el sismo sobre la estructura educativa, se hizo un acelerograma, usando como datos la magnitud y duración del sismo que ocurrió a mediados del año 2016 en la región de Pedernales, Ecuador.

Construcción de los acelogramas

Con los datos correspondientes al sismo ocurrido en Pedernales en 2016, se realizaron los acelogramas que permiten visualizar las gráficas de desplazamiento, velocidad y aceleración versus tiempo, además se presenta los valores máximos de cada magnitud en la dirección de cada grado de libertad y los instantes en que se desarrollan (Figura 4).

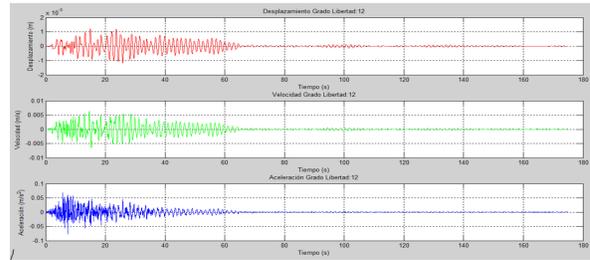


Figura 4. Ejemplo de acelergama para simulación de evento sísmico

Modelos usados en la simulación

Para calcular los desplazamientos horizontales se emplearon los modelos matemáticos ETABS (versión 9.5) y MATLAB (versión 6.5). El modelo ETABS utiliza el programa de cálculo para el modelado de edificaciones a través de elementos finitos, el cual permite modelar, dimensionar y comprobar estructura de diferentes materiales, así como determinar el comportamiento de las estructuras de la edificación producto de un evento sísmico. Matlab es un lenguaje de programación técnico-científico que básicamente trabaja con variables vectoriales y matriciales, es apropiado para el caso de las señales sísmicas donde la frecuencia de muestreo es relativamente baja (de 20 hasta 100Hz), este programa permite el procesamiento digital de señales para realizar la lectura automática de las señales sísmicas: fase P, fase S, periodo, amplitud y duración y así vectorizar los datos de tiempo (t) y señal sísmica.

Algoritmo de Newmark

El procedimiento de cálculo, para el análisis lineal, utilizando el método β de Newmark, es el siguiente [14]:

Se determina la matriz de rigidez efectiva.

$$\bar{K} = K + \frac{1}{\beta \Delta t^2} M + \frac{\gamma}{\beta \Delta t} C \tag{30}$$

Para el instante de tiempo $i+1$ se determina el vector de cargas efectivo.

$$F_{i+1} = -M \ddot{a}_{i+1} + M \left[\frac{1}{\beta \Delta t} \dot{q}_i + \left(\frac{1}{2\beta} - 1 \right) \ddot{q}_i \right] - c \left[\left(1 - \frac{\gamma}{\beta} \right) \dot{q}_i + \left(1 - \frac{\gamma}{2\beta} \right) \Delta t \ddot{q}_i \right] - K q_i$$

Se obtiene el incremento de desplazamiento para el tiempo $i+1$, para ello se debe resolver el sistema de ecuaciones lineales:

$$\bar{K} \Delta q_{i+1} = F_{i+1} \tag{31}$$

Se calculan la aceleración, velocidad y desplazamiento en el incremento de tiempo $i+1$.

$$\ddot{q}_{i+1} = \frac{1}{\beta \Delta t^2} \Delta q_{i+1} - \frac{1}{\beta \Delta t} \dot{q}_i - \left(\frac{1}{2\beta} - 1 \right) \ddot{q}_i$$

$$\dot{q}_{i+1} = \frac{\gamma}{\beta \Delta t} \Delta q_{i+1} + \left(1 - \frac{\gamma}{\beta} \right) \dot{q}_i + \left(1 - \frac{\gamma}{2\beta} \right) \Delta t \ddot{q}_i$$

$$q_{i+1} = \Delta q_{i+1} + q_i$$

Se actualizan desplazamientos, velocidades y aceleraciones y se pasa al próximo punto desde el paso i.

$$q_i = q_{i+1}$$

$$\dot{q}_i = \dot{q}_{i+1}$$

$$\ddot{q}_i = \ddot{q}_{i+1}$$

Modelo ETABS y Matlab

Análisis de los datos

Se calcularon los desplazamiento horizontales en los pórticos longitudinales A y B y en los transversales 1 y 2, en cada uno de los niveles de la estructura, usando los modelos ETABS y MATLAB, se calculó el error relativo de cada modelo comparado con los valores obtenido por el algoritmo de Newmark

Resultados y Discusión

Comparación del pórtico A.

Se comparó el desplazamiento horizontal de la estructura en los 4 niveles, usando el algoritmo de Newmark con los programas ETABS y Matlab, observando que las mayores diferencias en el pórtico longitudinal A, se encuentra en los niveles 1 y 2, mientras que los errores más bajo se observaron en la planta baja y a nivel de la cubierta (Tabla1).

Tabla 1. Comparación de desplazamiento horizontal obtenidos en ETABS y Matlab pórtico A.

	Desplazamiento X		
	ETABS	Matlab	Error Relativo
CUBIERTA	0,033859	0,03	11,40
2 PA	0,027411	0,02	27,04
1 PA	0,014121	0,01	29,18
PB	0	0	0

Comparación del pórtico B.

En el pórtico longitudinal B, la tasa de error al comparar el algoritmo de Newmark con los modelos ETABS y Matlab fue menor a lo encontrado en el pórtico A, aunque se mantuvo la misma tendencia a encontrar

el mayor error relativo en los niveles 1y 2, mientras que la tasa de error disminuyo en la planta baja y la cubierta (Tabla2).

Tabla 2. Comparación de desplazamiento horizontal obtenidos en ETABS y Matlab pórtico B.

	Desplazamiento X		
	ETABS	Matlab	Error Relativo
CUBIERTA	0,050089	0,05	0,18
2 PA	0,040251	0,04	0,62
1 PA	0,020661	0,02	3,20
PB	0	0	0

En tal sentido [15] afirma que varios factores se deben tomar en cuenta cuando los desplazamientos son mayores un 4.8%, como ocurrió en el caso del pórtico A, también señala que mientras el edificio sea más alto y cuente con un número considerable de entresijos, las diferencias serán mayores en cuanto a los elementos mecánicos evaluados y la vulnerabilidad sísmica se incrementa.

Comparación del pórtico 1.

En los pórticos transversales la tasa de error se incrementó considerablemente en comparación a los pórticos longitudinales, el error relativo más alto se observó en la segunda planta, mientras que la menor tasa de error correspondió a la planta baja y al primer nivel con valores de 0 y 9,27 % respectivamente, a diferencia de lo observado en los pórticos longitudinales A y B, la tasa de error se incrementó a nivel de la cubierta (Tabla3).

Tabla 3. Comparación de desplazamiento horizontal obtenido en ETABS y Matlab pórtico 1.

	Desplazamiento X		
	ETABS	Matlab	Error Relativo
CUBIERTA	0,024269	0,02	17,59
2 PA	0,018872	0,01	47,01
1 PA	0,009152	0,01	9,27
PB	0	0	0

Comparación del pórtico 2.

En el pórtico transversal B se observó un comportamiento distinto lo reportado en los pórticos longitudinales A y B y el pórtico transversal 1, en este caso

no se observó desplazamiento en la planta baja, pero se evidenció que no existieron diferencias al comparar el error relativo entre los niveles 1, 2 y la cubierta (Tabla 4).

Tabla 4. Comparación de desplazamiento horizontal obtenidos en ETABS y Matlab pórtico 2.

	Desplazamiento X		
	ETABS	Matlab	Error Relativo
CUBIERTA	0,039825	0,03	24,67
2 PA	0,027548	0,02	27,40
1 PA	0,013859	0,01	27,84
PB	0	0	0

En todos los casos evaluados en la estructura de aula los valores de desplazamiento más alto se encontraron al aplicar el modelo ETABS, mientras que cuando se aplicó el modelo Matlab se obtuvieron valores cercanos al encontrado con el algoritmo de Newmark.

Como lo reporta [15] cuando el error relativo supera el 5 % como lo observado en los pórticos transversales 1 y 2, el modelo lineal no se ajusta adecuadamente, este error se incrementa a medida que la estructura posea más pisos, en tal sentido [16] propusieron el modelo no lineal de Bouc-Wen-Baber-Noori (BWBN) para simular el comportamiento de viviendas bajo movimientos sísmicos, estos autores encontraron que el modelo dinámico no lineal propuesto se ajusta bien a la respuesta experimental bajo cargas aleatorias y es estructuralmente robusto para el análisis sísmico no lineal de las viviendas.

Conclusiones

El algoritmo Newmark lineal que se empleó en el método Tiempo-Historia brinda resultados muy cercanos a los obtenidos con los programas computacionales ETABS y MATLAB, sin embargo hay que considerar que no se tomaron en cuenta algunos elementos que aportan a la rigidez lateral de la estructura, entre ellos, la proporcionada por la mampostería.

La mayor diferencia entre el algoritmo Newmark y los programas computacionales se encontraron en los niveles más alto de la estructura, mientras que la menor tasa de error fue observada a nivel de la planta baja y la cubierta, lo cual obliga a un ajuste de los modelos, dado que hoy día dado al aumento de la densidad de población se construyen edificaciones de más altura y niveles.

La diferencia de cálculo fue superior en los pórticos transversales al compararse con los longitudinales, por lo que se deben realizar los ajustes de cálculo para poder aplicar de forma homogénea la

modelización en todos los componentes de la estructura evaluada.

Referencias Bibliográficas

- [1] Salazar-Arbelaez, G.: Terremotos y salud: lecciones y recomendaciones. Salud Pública de México, Vol. 60, No. 1 (2018) 6-15. DOI: <https://dx.doi.org/10.21149/9445>
- [2] Serrano, J.: Sismos y su repercusión en la educación de México. Revista Iberoamericana de producción académica y gestión educativa, Vol. 5, No. 9 (2018) 1-12.
- [3] Moreiras, S.M, Giambiagi, L.B, Spagnotto, S., Nacif, S., Mescua, J. y Toural, R.: El frente orogénico activo de Los Andes centrales a la latitud de la ciudad de Mendoza (32°50'-33°S). Andean geology, Vol. 41, No. 2 (2014) 1-12. DOI: <https://dx.doi.org/10.5027/andgeoV41n2-a04>
- [4] Cardona, O. D., Bernal, G. A., Zuloaga, D., Salgado-Gálvez, M. A. y González, D.: Amenaza y riesgo sísmico del cono sur. REDER, Vol. 1, No. 1 (2017) 43-69
- [5] Salgado-Gálvez, M. A., Romero, D. Z., Granados, G. A. B. y Arboleda, O. D. C.: Comparación de los resultados de riesgo sísmico en dos ciudades con los mismos coeficientes de diseño sismo resistente. Revista de Ingeniería, Vol. 41 (2014) 8-14
- [6] Celi, C., Pantoja, J. C., Sosa, D. y Ayala, C.: Vulnerabilidad sísmica de Quito Ecuador, fase I: curvas de capacidad de las tipologías estructurales, Proyecto GEM-SARA. Revista PUCE, Vol. 106 (2018) 41-79
- [7] Ugarte, A.: Metodología de modelación de escenarios de riesgo sísmico en Managua, Nicaragua. Revista científica Nexo, Vol. 23, No. 1 (2010) 9-17.
- [8] Sahin A.: Mathematical models and solution algorithms for computational design of RC piles under structural effects. ApplMathModel, Vol. 35, No. 7 (2011) 3611-3638.
- [9] Medina, R. y Music, J.: Determinación del nivel de desempeño de un edificio habitacional estructurado en base a muros de hormigón armado y diseñado según normativa chilena. Obras y proyectos, Vol. 23 (2018) 63-77. DOI: <https://dx.doi.org/10.4067/s0718-28132018000100063>
- [10] Sahin, A.: Metodología de modelación de escenarios de riesgo sísmico en Managua, Nicaragua. Revista científica Nexo, Vol. 23, No. 1 (2010) 9-17.

- [11] Askan A., Sisman F.N. y Ugurhan B.: Stochastic strong ground motion simulations in sparsely-monitored regions: a validation and sensitivity study on the 13 March 1992 Erzincan (Turkey) earthquake. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 55 (2013) 170–181. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2013.09.014>
- [12] Chopra, A.K.: *Dinámica de Estructuras*. México, Pearson, 4ª ed (2014).
- [13] Falconi, R. A. *Dinámica de Estructuras con MATLAB*. Quito: Escuela Politécnica del Ejercito. (2006).
- [14] Falconí, R. A. y Contreras, J. S. Análisis Modal Espectral En Estructuras con Aisladores Elastoméricos. VI Congreso de Ciencia y Tecnología ESPE 2011, Vol. 1 (2011)
- [15] Rojas, A. Análisis de dos modelos por el método dinámico para el diseño sísmico de edificios *Revista de Arquitectura e Ingeniería*, Vol.5, No.3 (2011) 1:10.
- [16] Bedoya, D., Ortiz, G., Alvarez, D y Hurtado, J. Modelo dinámico no lineal para evaluar el comportamiento sísmico de viviendas de ferrocemento. *Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería*, Vol. 31, No. 3 (2015) 139-206 DOI: <https://10.1016/j.rimni.2014.04.001>



UNIVERSIDAD
DEL ZULIA

REVISTA TECNICA

DE LA FACULTAD DE INGENIERIA
UNIVERSIDAD DEL ZULIA

Volumen Especial, 2020, No. 1, pp. 03 - 55 _____

*Esta revista fue editada en formato digital y publicada en Febrero de 2020, por el **Fondo Editorial Serbiluz, Universidad del Zulia. Maracaibo-Venezuela***

www.luz.edu.ve
www.serbi.luz.edu.ve
www.produccioncientifica.luz.edu.ve