

Instituto Tecnológico de Costa Rica



TEC

Escuela de Ingeniería Electrónica

Caracterización de desplazamientos horizontales ante sismos en  
modelos estructurales de edificios por medio de procesamiento  
digital de imágenes

Informe de Proyecto de Graduación para optar por el título de Ingeniero en  
Electrónica con el grado académico de Licenciatura

Allan Pérez Valverde

Cartago, Noviembre del 2010

**INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA**

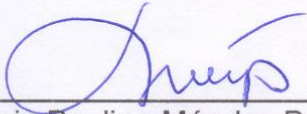
**ESCUELA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA**

**PROYECTO DE GRADUACIÓN**

**TRIBUNAL EVALUADOR**

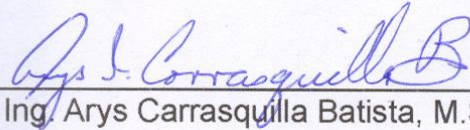
Proyecto de Graduación defendido ante el presente Tribunal Evaluador como requisito para optar por el título de Ingeniero en Electrónica con el grado académico de Licenciatura, del Instituto Tecnológico de Costa Rica.

Miembros del Tribunal



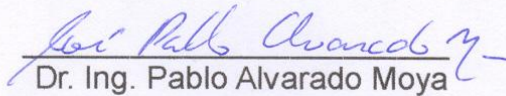
Ing. Luis Paulino Méndez Badilla, M.Sc.

Profesor lector



Ing. Arys Carrasquilla Batista, M.Sc.

Profesora lectora



Dr. Ing. Pablo Alvarado Moya

Profesor asesor

Los miembros de este Tribunal dan fe de que el presente trabajo de graduación ha sido aprobado y cumple con las normas establecidas por la Escuela de Ingeniería Electrónica

Cartago, Noviembre del 2010

## **Declaración de autenticidad**

Declaro que el presente Proyecto de Graduación ha sido realizado enteramente por mi persona, utilizando y aplicando literatura referente al tema e introduciendo conocimientos propios.

En los casos en que he utilizado bibliografía, he procedido a indicar las fuentes mediante las respectivas citas bibliográficas.

En consecuencia, asumo la responsabilidad total por el trabajo de graduación realizado y por el contenido del correspondiente informe final.

Cartago, Noviembre del 2010



Allan Pérez Valverde

Céd: 303920131

## **Resumen**

En este documento se presenta el diseño de un sistema de procesamiento digital de imágenes que permite determinar los modos de vibración de un modelo de estructura de edificio creado con un propósito educativo.

Para la determinación de estos modos de vibración, en primera instancia se adquiere y almacena una serie de imágenes que capturan el movimiento de un modelo de estructura frente a un sismo simulado. El proceso de estimación utiliza métodos de umbralización y mapas de probabilidad para discriminar entre marcas en el edificio y el fondo; seguido se procesa la imagen por métodos de re-etiquetación con consideración de área, y por último se hace un rastreo coherente de estructura.

Todo lo anterior se realiza para caracterizar el movimiento de la estructura por medio de modos de vibración y cálculos de deriva.

## **Abstract**

This document presents the design of a digital image processing system that estimates the vibration modes of a building structure model, created for educational purposes.

To establish the vibration modes an image series is acquired, that captures the movement of a structure model against a simulated earthquake. The estimation process uses methods of thresholding and probability maps to discriminate between the color marks of the building and the background; next the image is processed by area-aware relabeling methods, and the structure model is consistently tracked.

All previous steps allow the characterization of the building's structured model by means of the vibration modes and drift estimation

A mi amada Familia

## **Agradecimientos**

Mi más sincero agradecimiento a todos aquellos que de alguna forma u otra hicieron esta tesis posible. Agradezco inmensamente al profesor Pablo Alvarado que me permitió trabajar junto a él, su apoyo y orientación han sido de fundamental importancia para la realización exitosa de esta tesis.

A mis profesores del Instituto Tecnológico de Costa Rica, que me ayudaron a crear las bases de conocimiento necesarias para la conclusión de este trabajo. Al Ing. Gustavo Rojas y la Escuela de Ingeniería en Construcción por permitirme una ventana de trabajo con la institución además de facilitar la mesa y las estructuras para realizar el trabajo.

Estoy especialmente en deuda con mis padres por su apoyo incondicional antes y durante todo este tiempo. A mi esposa que siempre estuvo alentándome y dándome fuerzas para seguir. A mis hermanos que de alguna manera lucharon por la finalización de la tesis.

Este trabajo está dedicado a mis padres y hermanos que me animaron a dar lo mejor de mí y me infundieron la persistencia y deseos de superación. A mi esposa y futuros hijos que hacen valer la pena el esfuerzo. Gracias por su absoluta confianza en mí y por su comprensión y apoyo para mis actividades.

Allan Pérez Valverde  
ITCR, 30.11.2010

## Índice General

Resumen .....	ii
Abstract .....	iii
Agradecimientos.....	v
Índice General .....	i
Índice de Diagramas .....	iii
Índice de Tablas .....	iv
Capítulo 1: Introducción .....	1
1.1. Caracterización de movimiento de un modelo estructural.....	1
1.2. Uso del procesamiento digital de imágenes en la caracterización de la estructura.....	3
1.3. Objetivos y estructura del trabajo .....	4
Capítulo 2: Marco teórico .....	5
2.1 Conceptos sobre análisis modal. ....	5
2.1.1 Modos de Vibración.....	6
2.2 Formación de imágenes.....	8
2.3 Estimación de mapas de probabilidad de color .....	9
2.4 Correlación.....	10
2.5 Representación de Imágenes .....	10
2.5.1 Traslación .....	10
2.5.2 Rotación.....	11
2.6 Re-etiquetación de imágenes con consideracion de áreas.....	12
2.5.3 Umbralización .....	13
Capítulo 3: Sistema de rastreo de estructura .....	15
3.1. Requisitos de funcionamiento .....	15
3.2. Modelos de estructura.....	16
3.3. Simulación sísmica.....	17
3.4. Adquisición y almacenamiento de imágenes .....	17
3.5. Detección de marcas en la estructura.....	18
3.6. Rastreo coherente de estructura.....	20
3.7. Cálculo y presentación de resultados.....	23
Capítulo 4. Resultados Experimentales y Análisis.....	26
4.1 Determinación de equivalencia de modelos físico y digital .....	26
4.2 Resultados del análisis de imágenes.....	27
4.2.1 Determinación del mapa de probabilidades .....	27
4.2.2 Umbralización del mapa de probabilidades.....	28
4.2.3 Re-etiquetación con consideración del área. ....	28



4.2.4 Correlación.....	29
4.2.5 Alineación con puntos de referencia.....	30
4.2.6 Determinación y análisis en el tiempo de la estructura .....	30
4.2.7 Cálculo y despliegue de los resultados .....	31
Capítulo 5: Conclusiones y Recomendaciones .....	34
Capitulo 6: Bibliografía .....	35

## Índice de Diagramas

Figura 1.1:	(a) fotografías real de la torre Eiffel, (b) Modelo de estructura de la torre Eiffel..	1
Figura 1.2:	Fotografía de mesa especial	1
Figura 1.3:	Estructura deformada, y cálculos de deriva	2
Figura 1.4:	Diagrama general de la solución	3
Figura 1.5:	Escenografía para toma de imagen	3
Figura 2.1:	Estructura con una masa en extremo libre[1]	5
Figura 2.2:	Estructura de una barra con varias masas[1]	5
Figura 2.3:	Segundo modo de vibración[1]	6
Figura 2.4:	Tercer modo de vibración[1]	6
Figura 2.5:	Deformación de estructura frente a fuerzas distintas, Fuerza ejercida en (b) mayor a (a).	7
Figura 2.6:	Tres diferentes modos de vibración [1]	7
Figura 2.7:	Esquema ilustrativo de formación una imagen[2]	8
Figura 2.8:	Ejes de coordenadas y ángulos de rotación	11
Figura 2.9:	Entrada y salida del algoritmo de Fast Área Descriptor	12
Figura 2.10:	Campo de búsqueda de campo $\{t_1, t_2, \dots, t_M - 1\}$ [8]	14
Figura 3.1:	Diagrama general del programa	15
Figura 3.2:	Imagen sin modificaciones, utilizada como entrada	15
Figura 3.3:	Modelo físico de la estructura del edificio utilizada, medidas en centímetros	16
Figura 3.4:	Modelo digital de la estructura del edificio utilizada, con medidas en píxeles	16
Figura 3.5:	Fotografía de estructura metálica utilizada	17
Figura 3.6:	Diagrama de bloques de la simulación sísmica sobre estructura	17
Figura 3.7:	Mascara de color sobre imagen	18
Figura 3.8:	Diagrama de bloques de detección de marcas en estructura	19
Figura 3.9:	Diagrama de flujo del método describe	19
Figura 3.10:	Diagrama de bloques de rastreo coherente de estructura	20
Figura 3.11:	Separación de los vectores izquierdo y derecho	20
Figura 3.12:	Línea utilizada para determinar vectores de correlación	21
Figura 3.13:	Diagrama de bloques del método de determinación de desplazamiento vertical	21
Figura 3.14:	Diagrama de bloques del método de búsqueda de puntos perdidos	22
Figura 3.15:	Dibujo demostrativo del proceso de colocación de punto	22
Figura 3.16:	Diagrama de bloque de Análisis temporal	23

Figura 3.17: Diagrama de flujo del método de dibujo .....	24
Figura 3.18: Diagrama de flujo para el cálculo de modo de vibración .....	25
Figura 4.1: Imagen representativa de un mapa de probabilidades.....	27
Figura 4.2: Imagen representativa de probabilidades luego de una umbralización .....	28
Figura 4.3: Imágenes representativa de diferentes Áreas .....	29
Figura 4.4: Gráfica de probabilidades en la línea trazada sobre los puntos del lado derecho.....	29
Figura 4.5: Gráfica de probabilidades en la línea trazada sobre los puntos del lado izquierdo .....	29
Figura 4.6: Gráfica de correlación de los vectores izquierdo y derecho .....	30
Figura 4.7: (a)Imagen original, (b) Imagen trasladada.....	30
Figura 4.8: Estructura final de una imagen.....	31
Figura 4.9: Ejemplo de corrección de punto perdido (a) imagen de estructura con punto faltante, (b) imagen de estructura corregida .....	31
Figura 4.10: Estructura final de una imagen.....	32

## Índice de Tablas

Tabla 4.1: Coordenadas de puntos marcados del edificio en píxeles.....	26
Tabla 4.2: Diferencia vertical entre puntos y la equivalencia entre escalas... 26	
Tabla 4.3: Cálculo promedio de conversión de píxeles a centímetros.....	27
Tabla 4.4: Valores de umbralización obtenidos en una muestra de 10 imágenes.....	28
Tabla 4.5: Valores de coordenadas máximas y mínimas de la marcas (1 a la 6).....	31
Tabla 4.6: Valores de coordenadas máximas y mínimas de la marcas (6 a la 12).....	32
Tabla 4.7: Valores de desplazamientos máximos dados en pixeles (marca de la 1 a la 6).....	32
Tabla 4.8: Valores de desplazamientos máximos dados en pixeles (marca de la 6 a la 12).....	32
Tabla 4.9: Resultados de los cálculos de deriva.....	33

## Capítulo 1: Introducción

### 1.1. Caracterización de movimiento de un modelo estructural.

El movimiento de un edificio ante un sismo puede ser representado por su modo de vibración, el cual depende de la cantidad de masas que contenga el edificio, además del periodo con el que vibra el terreno donde se encuentra.

En este documento, se estudia cómo cuantificar la forma en que modelos de estructura de edificios vibran frente a un sismo simulado. El modelo de estructura es un modelo representativo de una estructura real. A manera de ejemplo se presenta en la figura 1.1 a mano izquierda una fotografía de la torre Eiffel y a mano derecha su modelo de estructura.

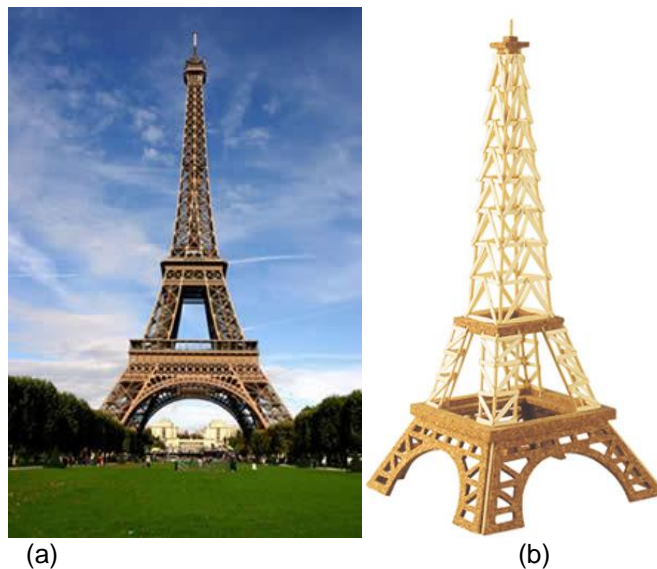


Figura 1.1: (a) fotografías real de la torre Eiffel (tomado de: <http://www.planetacurioso.com>), (b) Modelo de estructura de la torre Eiffel (tomado de: <http://www.tradid.es>)

El modelo de estructura es sometido a un sismo simulado por medio de una mesa especial cuyo funcionamiento está dictado por la retracción y extensión de una palanca móvil metálica (figura 1.2). Este movimiento es controlado manualmente, y es el que dicta el periodo al cual se mueve la base de la estructura, de ahora en adelante llamado “el terreno”.



Figura 1.2: Fotografía de mesa especial

El movimiento del terreno genera fuerzas ondulatorias que son propagadas en la estructura. Estas fuerzas son aplicadas directamente sobre las masas de esta, las cuales se modelan en niveles o pisos. Dependiendo de la magnitud de la masa así es el efecto que estas fuerzas ondulatorias producen.

El movimiento de la estructura se caracteriza por medio del desplazamiento máximo de cada piso, y los modos de vibración. Adicionalmente se pueden determinar otras variables relacionadas como la deriva que representa cuánto varía horizontalmente un nivel con respecto a su altura.

En la figura 1.3 se observa una estructura deformada por un sismo, donde se muestran cálculos de deriva representativa, enlazando el cálculo de ésta con el desplazamiento máximo de cada piso.

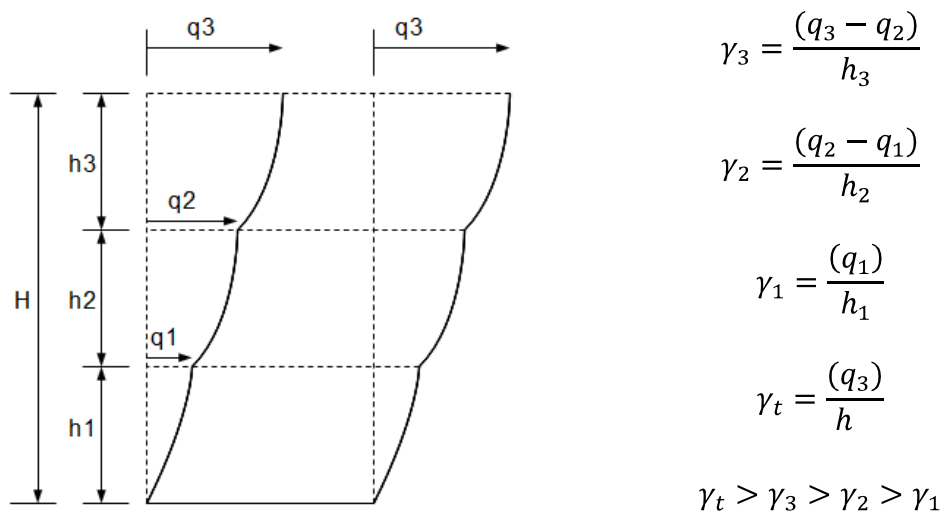


Figura 1.3: Estructura deformada, y cálculos de deriva

Actualmente en la Escuela de Ingeniería en Construcción se lleva a cabo el estudio de modos de vibración para un curso donde se evalúa si una estructura es resistente a sismos, según estándares internacionales, y llevan a la práctica este estudio por un método manual, con ayuda de cámaras fotográficas y una cuadrícula métrica, llevan a cabo una simulación de sismo, durante la cual obtienen fotografías con la cuadrícula de fondo, lo que les permite medir desplazamientos de los pisos con respecto a una fotografía de referencia y se identifican los modos de vibración.

Este proceso manual tiene como problema que no es reproducible, lo que impide llegar a alguna conclusión concreta. Además, la obtención de las fotografías no está automatizada, lo que impide determinar con exactitud el desplazamiento máximo de los puntos, por lo que el cálculo de las constantes del edificio es un aproximado poco confiable.

## 1.2. Uso del procesamiento digital de imágenes en la caracterización de la estructura

El problema que presenta el método manual es solucionable con ayuda del procesamiento digital de imágenes, eliminando así el error humano y proporcionando mayor veracidad a los resultados. Con la configuración utilizada en este proyecto se ha logrado una desviación de  $\pm 0,05$  segundos en la captura de la imagen tomando como referencia el desplazamiento máximo, y de  $\pm 1$  pixel en el cálculo del desplazamiento, lo que representa  $\pm 0,17$  cm.

Para el nuevo modelo de procesamiento digital de imágenes generado para este proyecto, se sustituye la cámara fotográfica utilizada en el sistema anterior por una cámara web, se elimina la cuadrícula y se sustituye ésta por un proceso de medición equivalente, en píxeles, además se genera un programa que captura y analiza la imagen de entrada, realiza el rastreo coherente de la estructura, para lograr caracterizar su movimiento.

La figura 1.4 sintetiza la propuesta para caracterizar el movimiento de un modelo de estructura de un edificio, para lo que se utilizó una “escena” similar a la descrita en la figura 1.5.

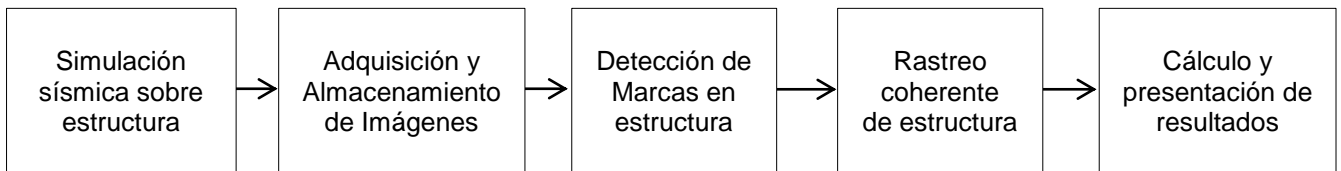


Figura 1.4: Diagrama general de la solución

El sistema propuesto se implementó en software utilizando el lenguaje C++. Se hizo uso además de una biblioteca de software libre que pone a disposición módulos básicos del procesamiento y análisis de imágenes, utilizados en la estimación de los desplazamientos máximos y de los modos de vibración.

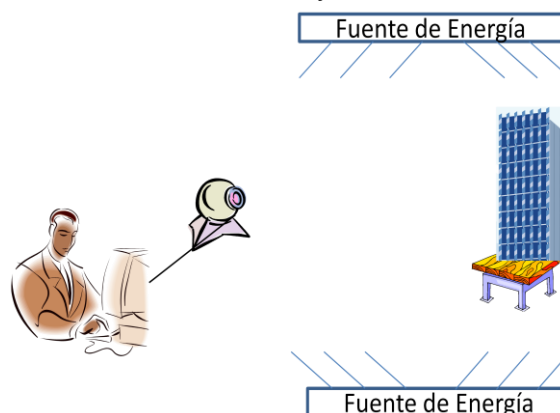


Figura 1.5: Escenografía para toma de imagen

### **1.3. Objetivos y estructura del trabajo**

El objetivo general de este trabajo es proveer un sistema que permita medir los desplazamientos horizontales de modelos estructurales de edificios sometidos a movimientos que simulan un sismo. Para lograrlo, es necesario contar con un sistema controlado de adquisición de imágenes, con las cuales se procura, en una etapa de pre-procesamiento, separar los píxeles que pertenecen a marcas en la estructura con píxeles pertenecientes al resto de la escena. Con los píxeles de la estructura se debe determinar entonces el contorno de la estructura, y encontrar la correspondencia entre los contornos de toda la secuencia de imágenes, para así estimar los desplazamientos máximos de cada nivel

El próximo capítulo presenta el fundamento teórico en el que sustenta la propuesta, seguido por una descripción detallada del sistema de procesamiento de imágenes realizado. El capítulo 4 muestra los resultados y su análisis y el capítulo 5 las conclusiones y recomendaciones del proyecto.

## Capítulo 2: Marco teórico

### 2.1 Conceptos sobre análisis modal.

El movimiento de un edificio ante un sismo es semejante al movimiento de un péndulo invertido. En este movimiento la masa no tiene una velocidad uniforme. La velocidad de la masa aumenta al pasar por el eje central y disminuye conforme se acerca al los extremos, llegando a reducirse completamente al llegar al extremo, donde cambia de dirección.

En el caso de estructuras de edificios la deformación es pequeña y depende de la consistencia del material. Estructuras con una sola masa se deforman como lo indica la figura 2.1:

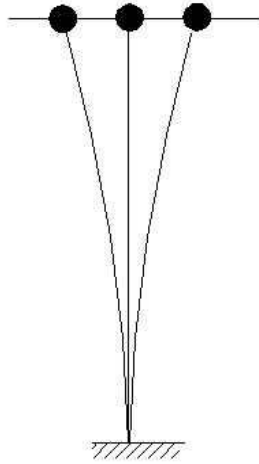


Figura 2.1: Estructura con una masa en extremo libre[1]

Si la estructura se compone de varias masas la deformación sigue el patrón de la figura 2.2.

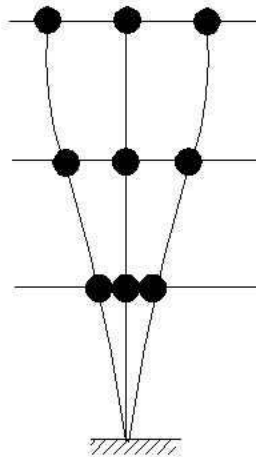


Figura 2.2: Estructura de una barra con varias masas[1]



### 2.1.1 Modos de Vibración.

El modo de vibración se refiere a deformaciones en la estructura provocadas por el periodo de vibración del terreno donde se encuentran. El modo de vibración es inversamente proporcional al periodo de movimiento del terreno.

Cuando la estructura se mueve de modo que todas sus masas pasan de un lado a otro de la posición de reposo, ocurre el primer modo de vibración o modo fundamental de vibración, el cual se ilustra en las figuras 2.1 y 2.2.

La forma de cada modo de vibración no depende de la fuerza con que es aplicado el movimiento. En otras palabras, si el sismo es más o menos fuerte, el modo de vibración se mantiene; lo que varía es el desplazamiento horizontal de cada uno de los niveles.

Los modos de vibración son dependientes del periodo con que se mueve el terreno donde se ubica la estructura. Si una estructura se encuentra deformándose en un primer modo de vibración, y se disminuye el periodo con que se mueve el terreno, la estructura podrá deformarse de una segunda manera como se ilustra en la figura 2.3.

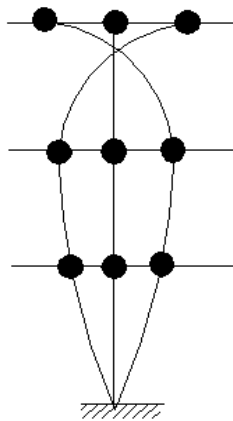


Figura 2.3: Segundo modo de vibración[1]

El tercer modo de vibración ocurre cuando se reduce aún más el periodo de movimiento del terreno, este movimiento se ejemplifica en la figura 2.4.

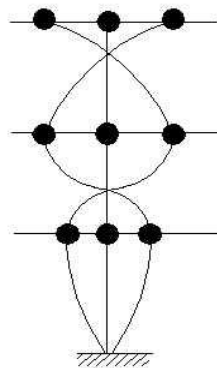


Figura 2.4: Tercer modo de vibración[1]

Existen tantos modos de vibración como masas hay en la estructura, o

en otras palabras cuanto más niveles tenga un edificio, mayor es la cantidad de modos de vibración, siendo cada uno de estos dependiente del periodo de movimiento del terreno. Como ejemplo para un edificio de quince pisos, considerando que tiene quince masas, podrá tener teóricamente 15 modos de vibración, y si es una estructura continua, puede tener un número infinito de modos de vibración.

En cualquiera de los modos de vibración, la intensidad de la fuerza que actúa en la base determina la magnitud del desplazamiento que sufre cada masa. Estos desplazamientos en cada modo conservan su proporcionalidad según el modo en que vibre, siendo así la forma de los modos de vibración independiente de la fuerza. Como ejemplo de este comportamiento se puede observar la figura 2.5 donde la fuerza aumenta pero el modo se mantiene.

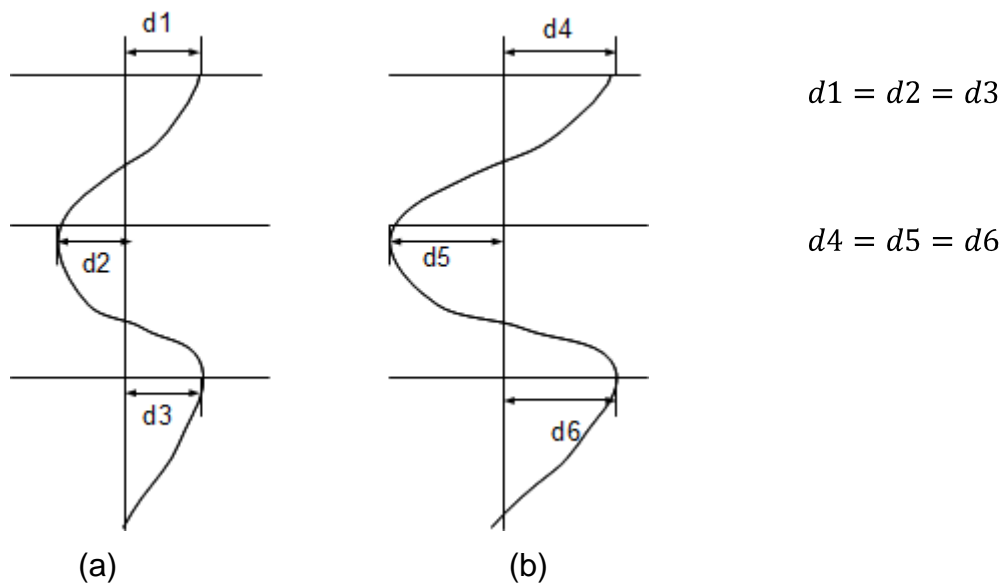


Figura 2.5: Deformación de estructura frente a fuerzas distintas, Fuerza ejercida en (b) mayor a (a).

En todos los casos, para que exista equilibrio, la suma algebraica de las fuerzas que se verifican en las masas tendrá que ser igual y de sentido contrario a la que el terreno impone a la base.

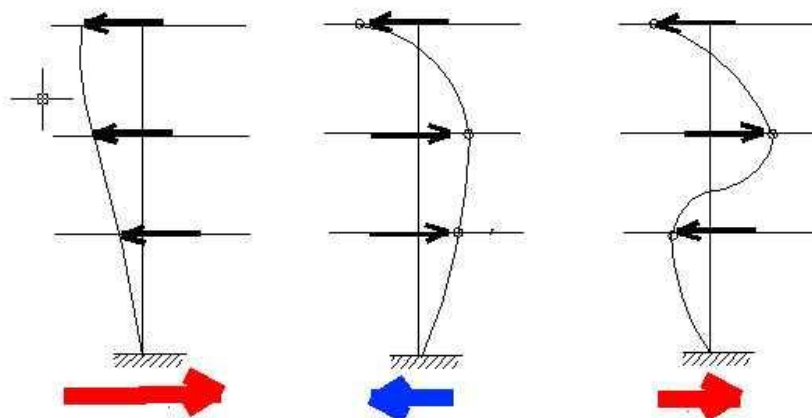


Figura 2.6: Tres diferentes modos de vibración [1]

Los modos en que se mueva la estructura depende de los valores de las masas de cada nivel, de la flexibilidad de los materiales de los que está hecha la estructura y del periodo en el que el terreno se mueve, de modo que durante un mismo temblor y con la misma vibración del terreno, una estructura puede vibrar de un modo y otra vibrar de otro modo.

En los modos que siguen al primero, es posible que algunas de las fuerzas que actúan en los distintos niveles, sean más intensas que la que se verifica en el terreno.

## 2.2 Formación de imágenes

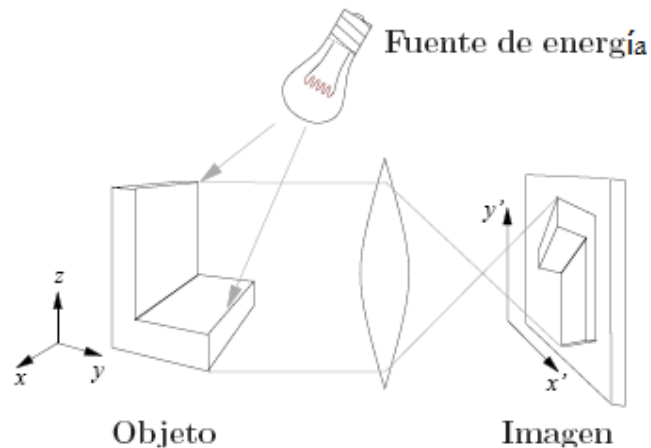


Figura 2.7: Esquema ilustrativo de formación una imagen[2]

En la figura 2.7 se observa un esquema que representa la formación de una imagen, que incluye cuatros elementos:

- Fuente de energía: Es la fuente de luz visible. Más adelante en el marco teórico se explican los procesos de iluminación.
- El objeto a ser capturado interactúa con la luz de la fuente, con procesos de reflexión, refracción, transmisión, absorción y difracción.
- La cámara: es el sistema óptico que colecta la energía recibida y la proyecta sobre el sistema de captura de la imagen
- El sistema de captura: es, en el caso de este proyecto un chip CCD que transforma la señal proyectada a señales eléctricas aptas para su procesamiento en un computador

Los cuatro componentes anteriormente mencionados son parte del proceso de adquisición de imágenes aquí implementados.

El valor que adquiere cada pixel en una imagen se puede calcular como[3]:

$$p^k = \int R^k(\lambda)S(\lambda)E(\lambda)d\lambda$$

donde:

$p^k$  es la respuesta ideal de la cámara para el canal k (rojo, verde o azul)

$S(\lambda)$  es la respuesta espectral de la superficie

$E(\lambda)$  la composición espectral de la fuente de luz

$R^k(\lambda)$  la respuesta espectral del sensor

Se aprecia que el valor del pixel depende tanto de la composición espectral de las fuentes de luz utilizadas de las características de color de la estructura, así como de la respuesta del sensor lo que incluye configuraciones de contraste, obturación, balance de color [4].

### 2.3 Estimación de mapas de probabilidad de color

Los modelos estructurales en una imagen son detectados en este trabajo con base a su color. Para ello se colocan marcas en posiciones estratégicas de la estructura que serán ubicadas en la imagen de acuerdo a su color. Aunque se sabe que las marcas son de color rojo, éste se ve afectado por la iluminación, el material de la marca e incluso por la respuesta espectral de la cámara que sensa la imagen, por lo que determinar la variación en el color por métodos analíticos se dificulta.

Para poder distinguir objetos respecto a su color se aplican métodos estadísticos, separando los pixeles en dos clases: objeto y no-objeto. Se estima la probabilidad de que cada pixel pertenezca a una u otra clase únicamente por el color. Esto se lleva a cabo utilizando histogramas generados con datos de entrenamiento, en los que se almacenan los colores que se escogieron como parte del objeto y del fondo de la escena[5].

Las probabilidades de que un pixel de color c pertenezca a la clase objeto o la clase no-objeto se denotan[2]:

$$p(c|objeto) \tag{2.1}$$

$$p(c|no - objeto) \tag{2.2}$$

Según el teorema de Bayes:

$$p(a|b) = \frac{p(b|a) \cdot p(a)}{p(b)} \tag{2.3}$$

donde al término  $p(a|b)$  se le conoce como la probabilidad a *posteriori*, a  $p(b|a)$  se le denomina valor de verosimilitud (o likelihood en inglés),  $p(a)$  es la

probabilidad a priori y  $p(b)$  es una constante de normalización. Para el caso que compete, se tiene:

$$p(\text{objeto}|c) = \frac{p(c|\text{objeto}) \cdot p(\text{objeto})}{p(c)} \quad (2.4)$$

y utilizando las reglas de probabilidad

$$p(c) = p(c|\text{objeto}) \cdot p(\text{objeto}) + p(c|\text{no - objeto}) \cdot p(\text{no - objeto}) \quad (2.5)$$

donde además

$$p(\text{no - objeto}) = 1 - p(\text{objeto}) \quad (2.6)$$

Los histogramas calculados corresponden a las verosimilitudes  $p(c|\text{objeto})$  y  $p(c|\text{no - objeto})$ .

## 2.4 Correlación

La correlación se utiliza medir la similitud entre dos secuencias. La ecuación que permite su cálculo es[6]:

$$r_{fg} = f(t) * g(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} f(k)g(k - t) \quad (2.7)$$

## 2.5 Representación de Imágenes

Para el presente proyecto se utiliza la representación de una imagen bidimensional como una matriz de píxeles. Se utilizarán las coordenadas  $x, y$  para hacer referencia a un píxel en la misma. Estas imágenes son adquiridas de objetos en movimiento por lo que son necesarias traslaciones y rotaciones para inmovilizar cada imagen y así determinar diferencia entre una y otra.

### 2.5.1 Traslación

La traslación es aplicada horizontalmente o verticalmente. Es basada en el movimiento de un punto de referencia a otro. La traslación puede ser aplicada a un conjunto de puntos específicos, y se describe con[7]:

$$X^* = X + X_0 \quad (2.8)$$

$$Y^* = Y + Y_0 \quad (2.9)$$

donde  $X^*, Y^*$  son las coordenadas del nuevo punto en el espacio. Las ecuaciones (2.9) y (2.10) se pueden expresar en forma matricial con:

$$\begin{bmatrix} X^* \\ Y^* \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & X_0 \\ 0 & 1 & Y_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

o de forma compacta

$$c^* = Tc \quad (2.11)$$

donde

$$c = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

$$c^* = \begin{bmatrix} X^* \\ Y^* \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

$$T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & X_0 \\ 0 & 1 & Y_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

## 2.5.2 Rotación

La rotación en dos dimensiones se puede hacer en dos sentidos equivalentes: la rotación de un objeto con respecto a los ejes coordenados fijos, y la rotación de los ejes coordenados manteniendo al objeto fijo.

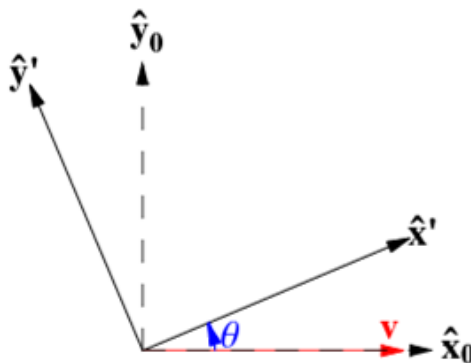


Figura 2.8: Ejes de coordenadas y ángulos de rotación (tomado de: <http://teoria-de-la-relatividad.blogspot.com>).

Matemáticamente la rotación del vector  $v_0 = (x, y)$  se expresa como:

$$v' = R_\theta v_0 \quad (2.15)$$

donde la matriz de rotación se define como:

$$R_\theta = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\text{sen}(\theta) \\ \text{sen}(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

Para el caso de mantener el objeto fijo se puede suponer que se tiene el mismo vector  $v_0$  al cual sin moverlo se le imprime una rotación a los ejes coordenados en los que está especificado, siendo dicha rotación también una rotación en sentido contrario al giro de las manecillas del reloj en un ángulo  $\theta$ , situándolo en su nueva posición como el vector  $v$ . Matemáticamente puede ser expresando con:



### 2.5.3 Umbralización

La umbralización es el proceso de determinar un umbral o límite que define cuando un píxel es objeto o fondo, de acuerdo a si el valor del píxel es menor o mayor al umbral. El uso de probabilidades ayuda a determinar el valor del umbral.

La probabilidad de que un píxel en una imagen de  $N$  píxeles tenga el nivel de intensidad "i" está dada por [7]

$$p_i = \frac{f_i}{N} \quad (2.19)$$

donde  $f_i$  denota el número de píxeles de intensidad "i"

Asúmase que se tiene un umbral  $t$ , que separa las intensidades en dos clases  $C_1$  y  $C_2$  donde  $C_1$  contiene los niveles de gris  $[1, \dots, t]$ ; y  $C_2$  contiene los niveles de gris  $[t+1, \dots, L]$ . Además sea

$$\omega_1(t) = \sum_{i=1}^t p_i \quad (2.20)$$

$$\omega_2(t) = \sum_{i=t+1}^L p_i \quad (2.21)$$

La media para la clase  $C_1$  y la clase  $C_2$  es

$$\mu_1 = \sum_{i=1}^t \frac{i \cdot p_i}{\omega_1(t)} \quad (2.22)$$

$$\mu_2 = \sum_{i=t+1}^L \frac{i \cdot p_i}{\omega_2(t)} \quad (2.23)$$

Sea  $\mu_t$  la intensidad media de toda la imagen. Se cumple:

$$\omega_1 \cdot \mu_1 + \omega_2 \cdot \mu_2 = \mu_t \quad (2.24)$$

$$\omega_1 + \omega_2 = 1 \quad (2.25)$$

$$\{t_1^*, t_2^*, \dots, t_{M-1}^*\} = \max_{t_1, t_2, \dots, t_{M-1}} \{(\sigma_B^2)^2(t_1, t_2, \dots, t_{M-1})\} \quad (2.26)$$

$$\sigma_B^2(t_1, t_2, \dots, t_{M-1}) = \sum_{k=1}^M \omega_k \cdot (\mu_k - \mu_T)^2 \quad (2.27)$$



La probabilidad acumulada es igual a 1 independientemente de la cantidad de clases que se consideren en el proceso de umbralización, y la media de la imagen es igual a la suma del valor de los pixeles en las M clases ponderadas por sus correspondientes probabilidades acumuladas; esto es[7]:

$$\sum_{k=1}^M \omega_k = 1 \quad (2.28)$$

$$\mu_T = \sum_{k=1}^M \omega_k \cdot \mu_k \quad (2.29)$$

Con ayuda de (2.27) se observa que la varianza entre clases en (2.29) puede describirse de la siguiente forma.

$$\sigma_B^2(t_1, t_2, \dots, t_{M-1}) = \sum_{k=1}^M \omega_k \cdot \mu_k^2 - \mu_T^2 \quad (2.30)$$

Debido a que el segundo término en (2.31) depende de la elección de los umbrales  $\{t_1, t_2, \dots, t_{M-1}\}$ , los umbrales óptimos  $\{t_1^*, t_2^*, \dots, t_{M-1}^*\}$  pueden ser elegidos maximizando una varianza entre clase modificada  $\sigma_B'$ , definida como la sumatoria de los términos del lado derecho de (2.30).

En otras palabras, los valores de los umbrales óptimos  $\{t_1^*, t_2^*, \dots, t_{M-1}^*\}$  se eligen por

$$\{t_1^*, t_2^*, \dots, t_{M-1}^*\} = \max_{t_1, t_2, \dots, t_{M-1}} \{(\sigma_B')^2\{t_1, t_2, \dots, t_{M-1}\}\} \quad (2.31)$$

$$1 \leq t_1 < \dots < t_{M-1} < L \quad (2.32)$$

donde,

$$(\sigma_B')^2 = \sum_{k=1}^M \omega_k \cdot \mu_k^2 \quad (2.33)$$

En la figura 2.1 se ilustra que para encontrar los umbrales óptimos, el campo de búsqueda para el máximo  $\sigma_B^2$  y para el máximo  $(\sigma_B')^2$ , es  $1 \leq t_1 < L-M+1$ ,  $t_1+1 \leq t_2 < L-M+2$ , ..., y  $M-1 \leq t_{M-1} < L-1$ .

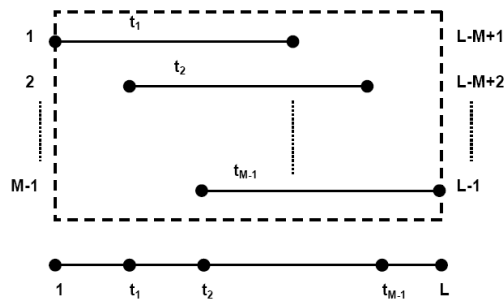


Figura 2.10: Campo de búsqueda de campo  $\{t_1, t_2, \dots, t_{M-1}\}$ [8]

### Capítulo 3: Sistema de rastreo de estructura

Para el sistema de rastreo de estructura se plantea un esquema basado en el procesamiento digital de imágenes, que tiene como primer paso la captura y almacenamiento de una secuencia de imágenes que siga el movimiento de un modelo estructural de edificio en la presencia de un sismo simulado, esto con ayuda de una cámara web. Como segundo paso se establece y valida un modelo digital de estructura, que logre seguir al modelo estructural físico, y por último determinar el tipo de modo de vibración presente en la simulación y parámetros estructurales como lo es la deriva.

Para aclarar más el panorama la figura 3.1 detalla la solución escogida

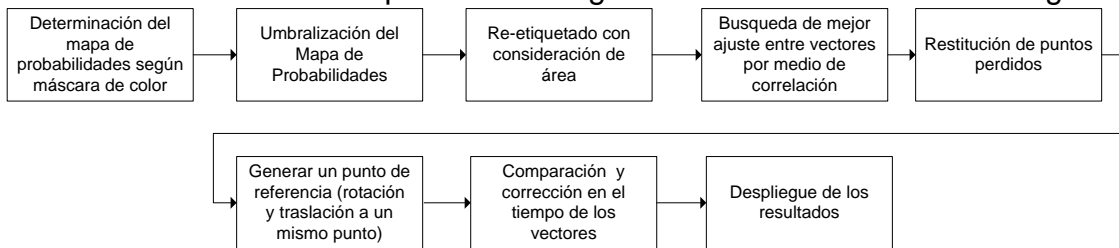


Figura 3.1: Diagrama general del programa

En las siguientes secciones se describe en detalle cada uno de los bloques.

#### 3.1. Requisitos de funcionamiento

La estructura que se utiliza está compuesta por varios pisos, los cuáles deben ser demarcados en los vértices con marcas de color sobresaliente, evitando que se confunda con el fondo o con alguna otra parte de la estructura.

La figura 3.2 ilustra una imagen utilizada como entrada del algoritmo. Los colores por los que está compuesta dicha fotografía son principalmente dos, que se escogieron y colocaron en las esquinas de cada uno de los pisos de la estructura, tratando de que el fondo fuera contrastante. Estos colores fueron el rojo para las marcas y verde para el fondo, colores opuestos que dan máximo contraste facilitan su diferenciación por medio de la segmentación de color.



Figura 3.2: Imagen sin modificaciones, utilizada como entrada

### 3.2. Modelos de estructura

La estructura puede ser analizada desde dos puntos de vista: uno físico documentado y medido en centímetros como se muestra en la figura 3.3 y el otro virtual o digital medido en píxeles, mostrado en la figura 3.4. El modelo digital debe reconocer cada una de las marcas y asumir los enlaces horizontales y verticales. La proporcionalidad entre ambos modelos la dicta la proyección de la cámara utilizada.

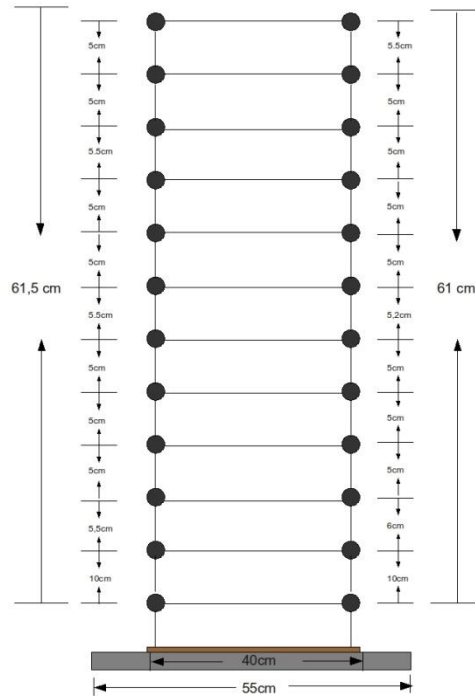


Figura 3.3: Modelo físico de la estructura del edificio utilizada, medidas en centímetros

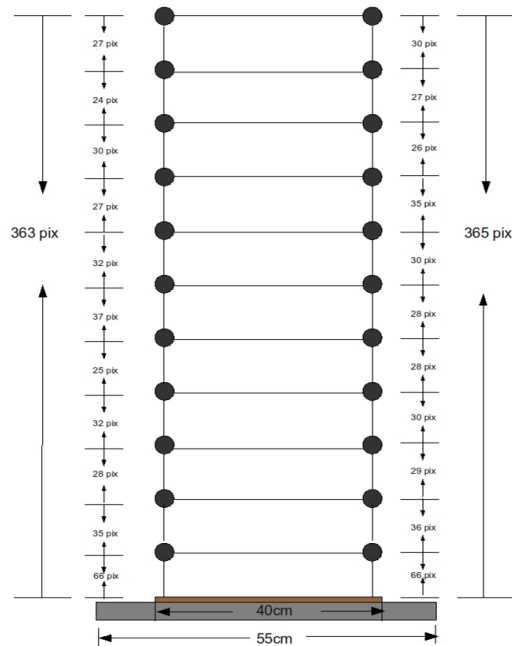


Figura 3.4: Modelo digital de la estructura del edificio utilizada, con medidas en píxeles.

### 3.3. Simulación sísmica

En esta etapa se utiliza una estructura metálica con una palanca lateral que desplaza un sobre de madera de un lado a otro, y ayuda así a simular un sismo (figura 3.5).



Figura 3.5: Fotografía de estructura metálica utilizada

La creación de la estructura del edificio es parte de las funciones encomendadas a estudiantes de la escuela de ingeniería en construcción y la simulación certifica si la estructura cumple con los estándares nacionales.

En la figura 3.6 se observa el diagrama de bloques utilizado para esta etapa.

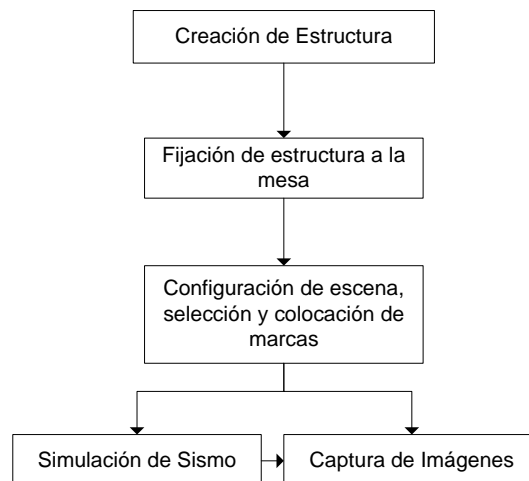


Figura 3.6: Diagrama de flujo de la simulación sísmica sobre estructura

### 3.4. Adquisición y almacenamiento de imágenes

La adquisición y almacenamiento consiste en la captura y el respaldo de las imágenes, a partir de las cuales se estima el movimiento seguido por la estructura del edificio.

La posición de la estructura y la cámara se seleccionan para capturar la estructura completa del modelo, manteniendo siempre el enfoque de ésta. Además, se procedieron a ajustar los parámetros de la cámara, y la intensidad de luz para mejorar enfoque, contraste y colores de las imágenes.

Con la configuración elegida se procede a simular el sismo y a hacer la captura de una secuencia de imágenes con una tasa de 10 cuadros por segundo que sigue el movimiento de la estructura.

### 3.5. Detección de marcas en la estructura

Para esta etapa se crean manualmente máscaras de color utilizando varias imágenes representativas del total de imágenes tomadas. La máscara ayuda a determinar los histogramas que permiten estimar las probabilidades de encontrar una marca por medio de su color (sección 2.3)

La máscara de color se crea identificando las regiones pertenecientes a marcas en la estructura con píxeles blancos, las regiones del fondo con píxeles negros, y aquellas zonas dudosas con gris (figura 3.7).

Con los histogramas se calculan las posibilidades de que cada pixel pertenezca o no a una marca. Estas probabilidades se almacenan en un mapa del mismo tamaño de la imagen original, donde cada pixel del mapa corresponde al pixel con la misma posición en la imagen.

Se umbraliza el mapa para separar, según el valor de umbral calculado, si la probabilidad de cada pixel corresponde a una marca o no. A partir de la imagen segmentada se realiza la re-etiquetación con consideración del área lo que discrimina áreas 20% por encima o por debajo del promedio, generando en una primera instancia las áreas que representan las marcas en la imagen.

En la figura 3.8 se muestra el diagrama de bloques utilizado para esta etapa.

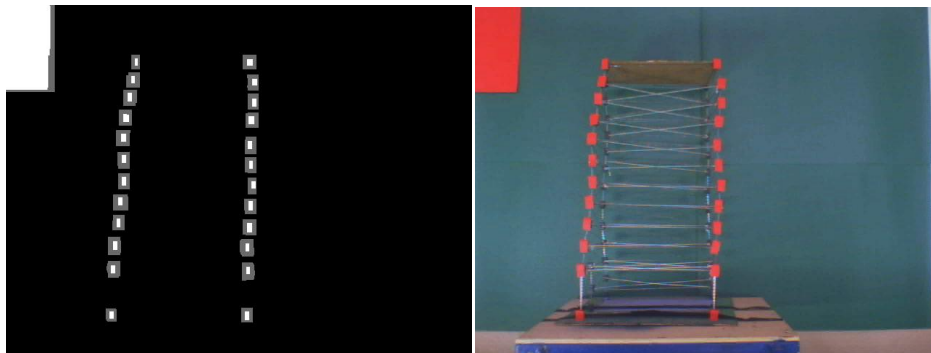


Figura 3.7: Máscara de color sobre imagen

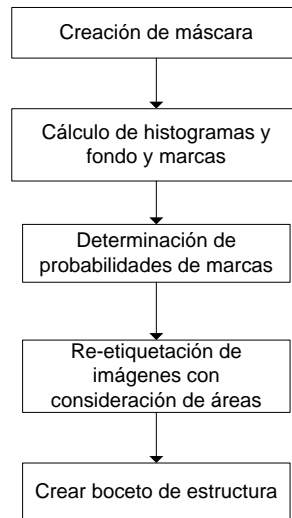


Figura 3.8: Diagrama de bloques de detección de marcas en estructura

Una vez determinadas cada una de las etiquetas y filtradas por tamaño de área, se separan en dos vectores: izquierdo y derecho que con ayuda del diagrama de flujo de la figura 3.9 se logra llevar a cabo.

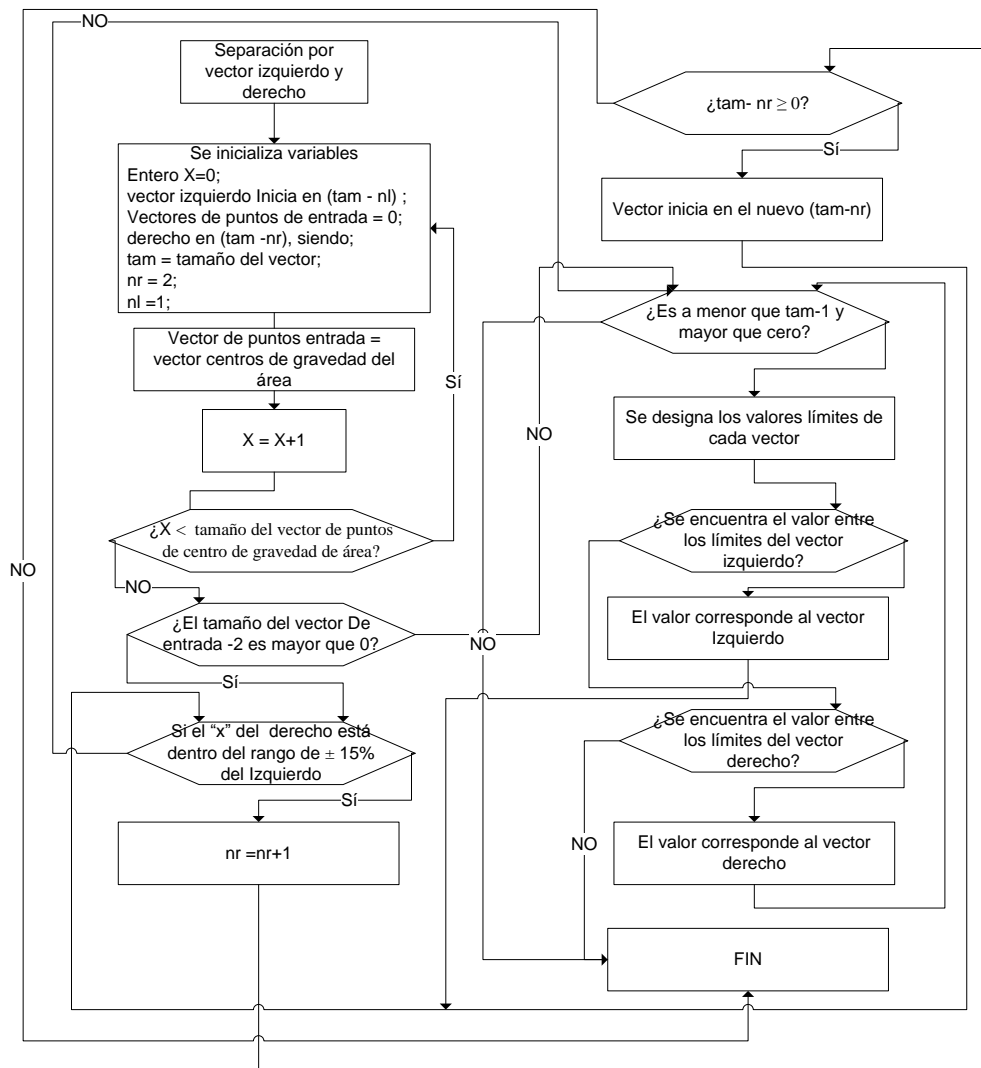


Figura 3.9: Diagrama de flujo del método de separación del vector izquierdo y derecho

### 3.6. Rastreo coherente de estructura

La estimación de las marcas con uso exclusivo de color es propensa a errores como puede ser: la asignación de marcas a píxeles que realmente no lo son, o viceversa. Los errores son producto de las variaciones en la iluminación y en el color capturado de marcas, fondo y estructura.

En figura 3.10 se muestra el diagrama de bloques utilizado para esta etapa.

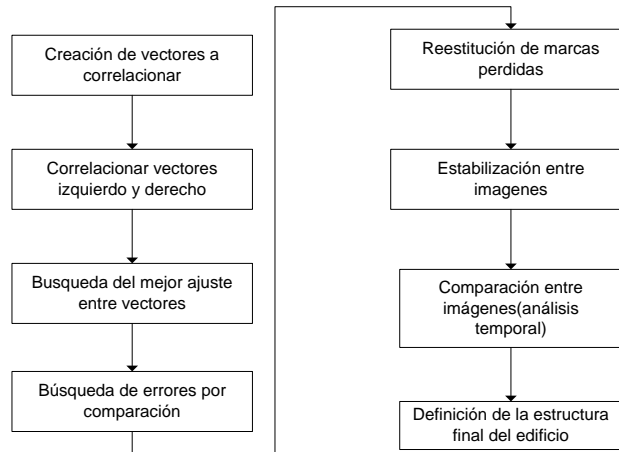


Figura 3.10: Diagrama de bloques de rastreo coherente de estructura

Para verificar y forzar la coherencia en los datos detectados se parte de la suposición de que cada nivel de la estructura tiene dos marcas en sus extremos. Si se separan las marcas en una columna derecha y otra izquierda, es posible comparar la similitud entre ambas partiendo del hecho de que la distribución de marcas en la estructura es simétrica (figura 3.11).

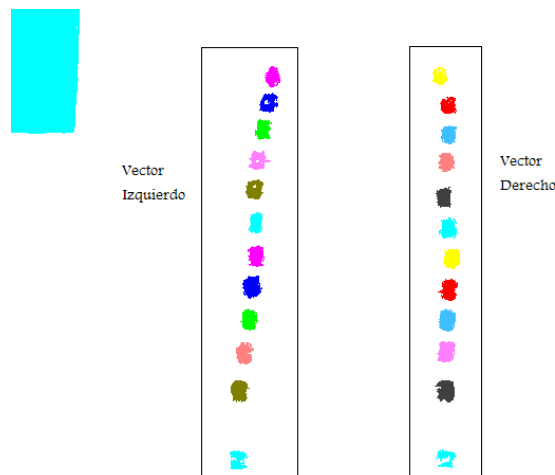


Figura 3.11: Separación de los vectores izquierdo y derecho

Para la comparación de las columnas se ejecuta la correlación (sección 2.4) sobre dos funciones de variable discreta. Esas funciones se generan recorriendo el mapa de probabilidades por una trayectoria recta que pasa por todas las marcas detectadas (figura 3.12). La correlación entre las dos funciones permite calcular el desplazamiento relativo existente entre ellas.

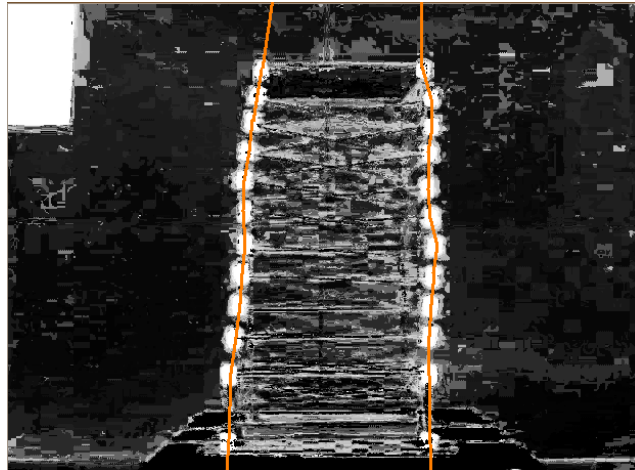


Figura 3.12: Línea utilizada para determinar vectores de correlación

El siguiente diagrama ilustra los pasos a seguir para la determinación del desplazamiento vertical requerido

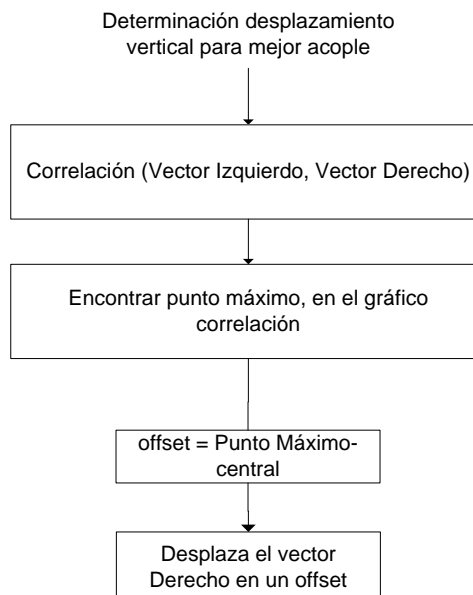


Figura 3.13: Diagrama de bloques del método de determinación de desplazamiento vertical



El diagrama de la figura 3.14 muestra el procedimiento seguido para determinar si hay una marca perdida o no.

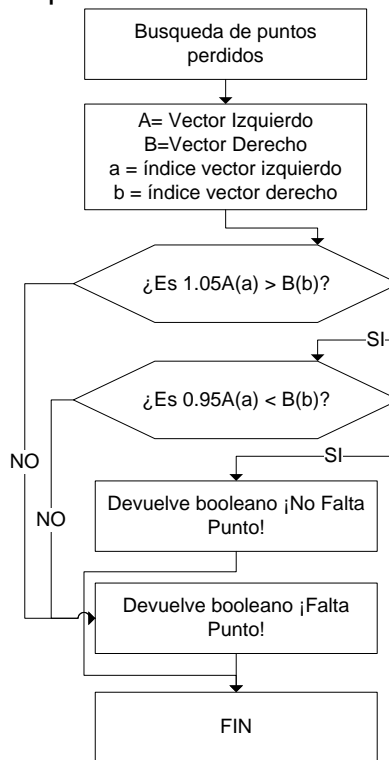


Figura 3.14: Diagrama de bloques del método de búsqueda de puntos perdidos

Una vez determinado el faltante de una marca en alguno de los vectores, se coloca un punto suplente en el cruce de la misma coordenada “y” del punto en el lado opuesto y una línea imaginaria en coordenadas “x” entre los puntos anterior y posterior. Para ejemplificar este método la figura 3.15 señala el lugar donde se encuentra el cruce y se debe colocar el punto según el procedimiento anteriormente mencionado.

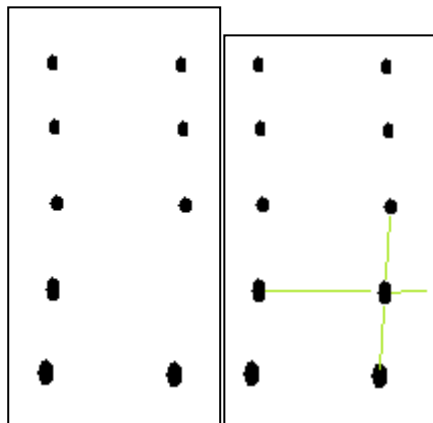


Figura 3.15: Dibujo demostrativo del proceso de colocación de punto

Las imágenes son adquiridas cuando el modelo de estructura se encuentra en movimiento, con la cámara estática, hecho que provoca que la estructura se encuentre en diferente posición comparada a la imagen anterior y posterior. Para alinear las imágenes a un punto de referencia común en la base de la estructura se aplica rotación y traslación de las imágenes con magnitudes estimadas a partir de los pasos anteriores.

Los procesos descritos hasta ahora no logran eliminar todos los errores de la detección de las marcas por lo que se procede a hacer un análisis en el tiempo para determinar si existen pares de puntos erróneos o si hay faltante de pares de puntos tomando como guía el diagrama de flujo de la figura 3.16

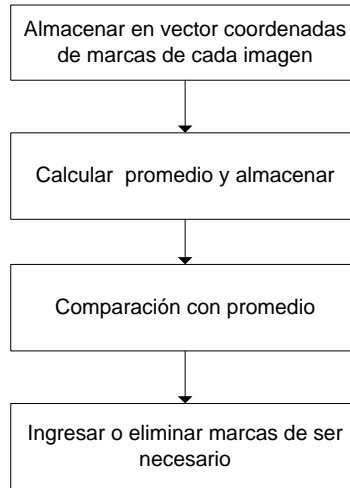


Figura 3.16: Diagrama de bloque de análisis temporal

### 3.7. Cálculo y presentación de resultados

En esta etapa se determinan el promedio de las distancias entre puntos, desplazamientos máximos y mínimos, se calcula el parámetro de deriva de la estructura y se despliegan los resultados solicitados, como lo son el modo o los modos vibración presentes en la estructura.

Para lograr visualizar las imágenes del modelo digital de estructura se utiliza el diagrama de flujo de la figura 3.17.

Para poder llevar a cabo el despliegue de las imágenes se utiliza el siguiente diagrama de flujo.

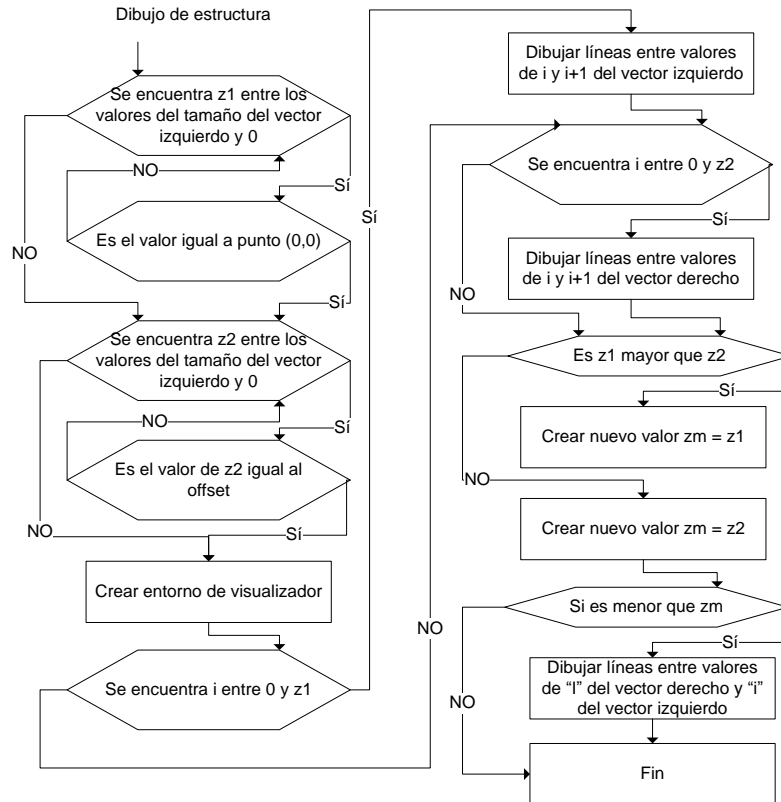


Figura 3.17: Diagrama de flujo del método de dibujo

Para los cálculos de la deriva se utilizó la siguiente fórmula:

$$\gamma = \frac{\Delta_{P2} - \Delta_{P1}}{H_{21}} \quad (3.1)$$

donde

- $\Delta_{P1}$  es el desplazamiento máximo del piso 1 en la horizontal durante un sismo.
- $\Delta_{P2}$  es el desplazamiento máximo del piso 2 en la horizontal durante un sismo.
- $H_{21}$  es la distancia vertical entre en piso 1 y 2, es estado de reposo.

Por último se procede a determinar el modo de vibración, siguiendo el diagrama de flujo mostrado en la figura 3.18

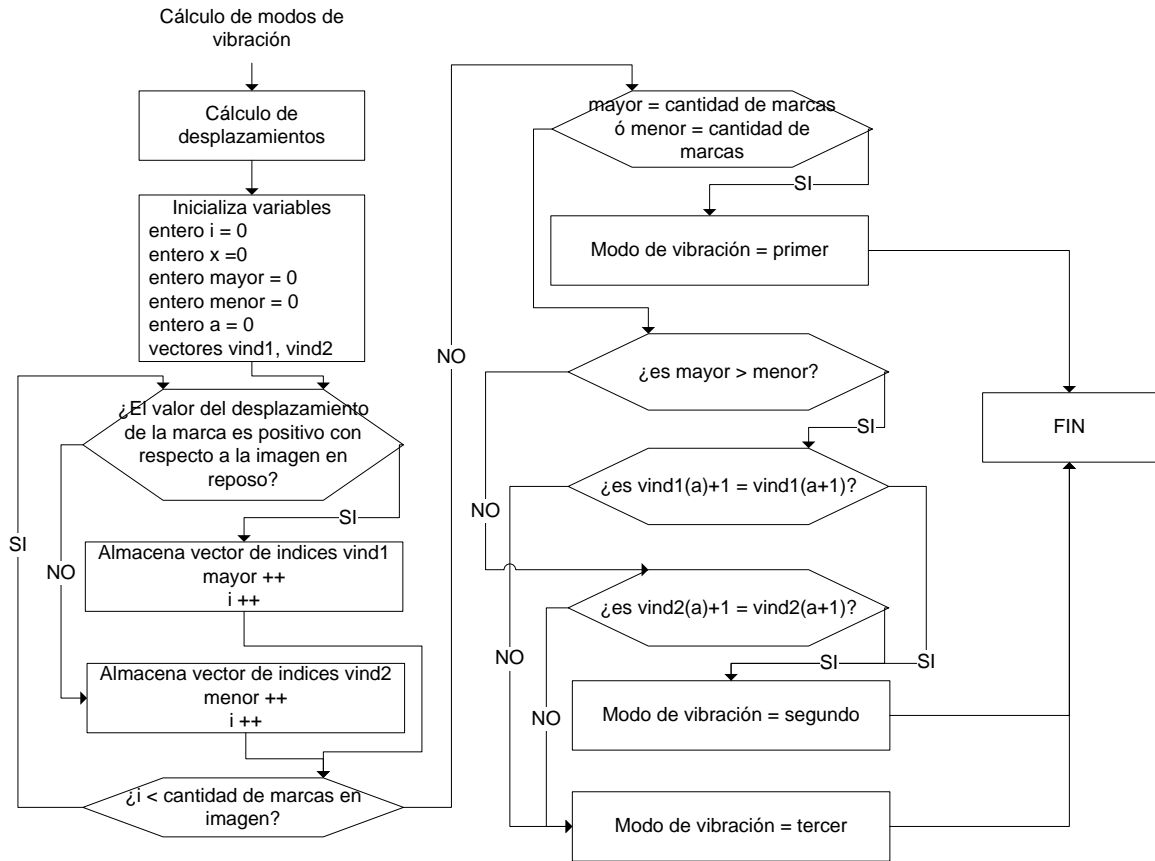


Figura 3.18: Diagrama de flujo para el cálculo de modo de vibración

## Capítulo 4. Resultados Experimentales y Análisis

### 4.1 Determinación de equivalencia de modelos físico y digital

En la tabla 4.1 se presenta los datos obtenidos manualmente de una imagen de la secuencia de imágenes tomadas al edificio. Estos datos se toman como referencia para el cálculo de conversión de pixel-centímetro necesario al realizar la revisión de objetivos cumplidos y de ubicarlo en el espacio real de la estructura.

Tabla 4.1: Coordenadas de puntos marcados del edificio en píxeles

Vector Izquierdo		Vector Derecho	
x	y	x	y
244	63	405	61
241	90	413	91
236	114	412	118
231	144	410	144
227	171	409	179
229	203	409	209
228	240	416	237
224	265	412	265
223	297	411	295
217	325	410	324
213	360	409	360
212	426	410	426

En la tabla 4.2 se resumen los datos de distancia entre pisos en centímetros y tomados directamente sobre la estructura, tomando como base las uniones horizontales ubicadas entre los vértices de cada piso. Al igual que para la tabla 4.1 fueron determinados manualmente, por lo que se asumen errores en la toma, entre los que se puede mencionar el error de paralaje y error de escala en la toma de la medida.

Tabla 4.2: Diferencia vertical entre puntos y la equivalencia entre escalas.

Diferencias en "y" Vector Izquierdo(pix)	Diferencias en "y" Vector derecho(pix)	Diferencias en "y" Vector Izquierdo(cm)	Diferencias en "y" Vector derecho(cm)	Equivalencia 1cm = __pix	Equivalencia 1cm = __pix
27	30	5	5,5	0,185	0,183
24	27	5	5	0,208	0,185
30	26	5,5	5	0,183	0,192
27	35	5	5	0,185	0,143
32	30	5	5	0,156	0,167
37	28	5,5	5,2	0,149	0,186
25	28	5	5	0,200	0,179
32	30	5	5	0,156	0,167
28	29	5	5	0,179	0,172
35	36	5,5	6	0,157	0,167
66	66	10	10	0,152	0,152
363	365	61,5	61,7	0,169	0,169

En la tabla 4.2 adicionalmente se presentan las distancias entre pisos en pixeles para poder establecer la relación pixel/centímetro.

En la tabla 4.3 se muestra el resultado del cálculo del promedio, siendo este el dato necesario para el cálculo de la conversión entre pixel y centímetro y viceversa.

Tabla 4.3: Cálculo promedio de conversión de píxeles a centímetros.

Promedio 1pix = .17cm
Promedio 1cm = 5.88pix $\pm$ 1 pixel

## 4.2 Resultados del análisis de imágenes

### 4.2.1 Determinación del mapa de probabilidades

La generación de mapas de probabilidades de color permite detectar cuáles pixeles corresponden a las marcas en el edificio, utilizando como criterio el color. Este mapa de probabilidades tiene valores entre 0 y 1, siendo el 1 una probabilidad del 100% de que pixel pertenezca a una marca y cero una probabilidad del 0%. En la figura 4.1 se presenta un ejemplo de un mapa de probabilidades en donde la probabilidad se representa con grises que van desde negro representado 0 y blanco representado 1.

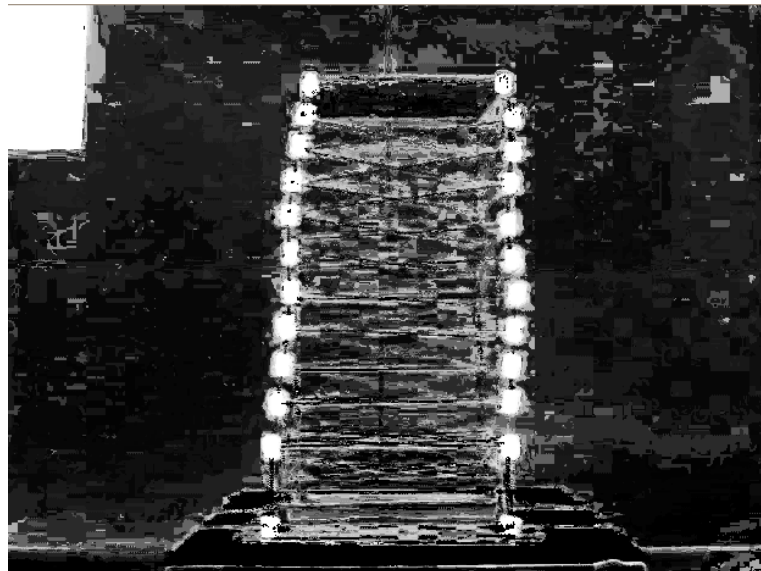


Figura 4.1: Imagen representativa de un mapa de probabilidades

#### 4.2.2 Umbralización del mapa de probabilidades

Una vez determinado el mapa de probabilidades se procede a umbralizar. Este concepto consiste en la búsqueda del mejor nivel de decisión en donde se elimine la mayoría de detecciones espurias de marcas.

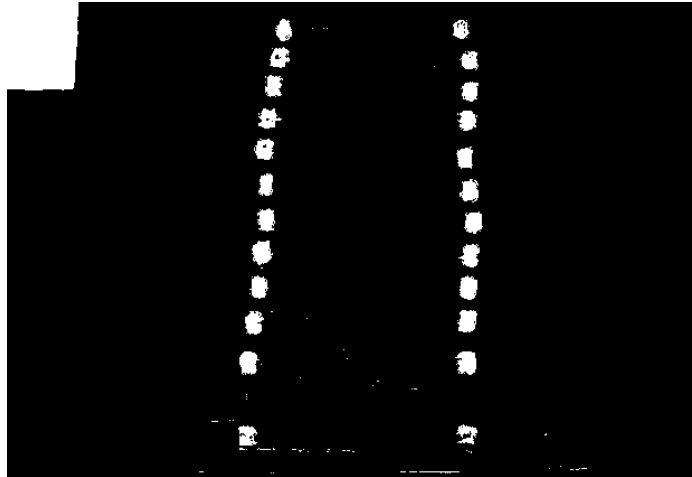


Figura 4.2: Imagen representativa de probabilidades luego de una umbralización

Para el cálculo del umbral se utiliza el algoritmo descrito en el marco teórico, y el valor umbral es calculado para cada una de las imágenes. La tabla 4.4 presenta como umbrales calculados para las primeras diez imágenes de una secuencia, donde la variación es menor del 1% pero significa pixeles de espuria eliminados.

Tabla 4.4: Valores de umbralización obtenidos en una muestra de 10 imágenes.

Imagen	Valor de Threshold
0	0,92524
1	0,926085
2	0,924614
3	0,923663
4	0,924723
5	0,923804
6	0,924321
7	0,923518
8	0,923224
9	0,923344

#### 4.2.3 Re-etiquetación con consideración del área.

Esta parte del sistema es utilizada para terminar de seleccionar regiones en las imágenes correspondientes a las marcas en la estructura física. Esto se lleva a cabo por medio de un proceso similar a la umbralización: se determina la cantidad de píxeles mínima que debe tener cada región, eliminando aquellas fuera del promedio.

La figura 4.3 muestra un ejemplo donde se ha logrado eliminar toda región que no corresponde a una marca, lo que permite distinguir claramente aquellas correspondientes a los lados izquierdo y derecho de la estructura física, por medio del algoritmo descrito en la figura 3.11 de la sección 3.6

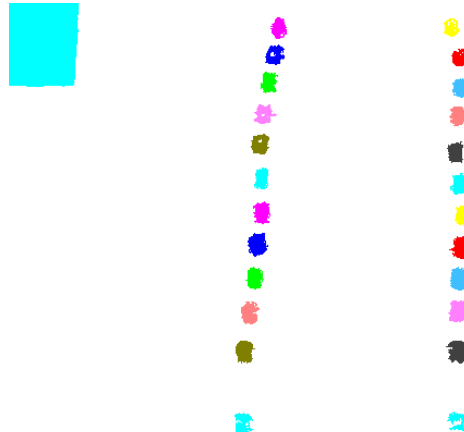


Figura 4.3: Imágenes representativa de diferentes Áreas

#### 4.2.4 Correlación

Continuando con la optimización de los datos se procede a utilizar la correlación, que permite determinar el mejor alineamiento entre los perfiles izquierdo y derecho, aún con pérdidas de puntos o exceso de estos.

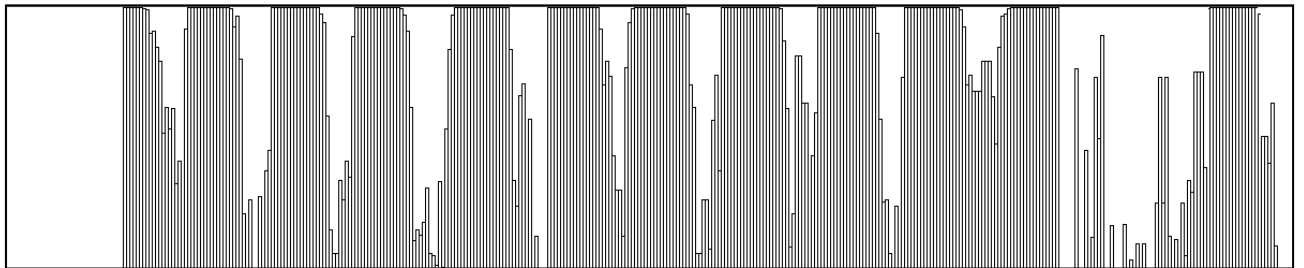


Figura 4.4: Gráfica de probabilidades en la línea trazada sobre los puntos del lado derecho

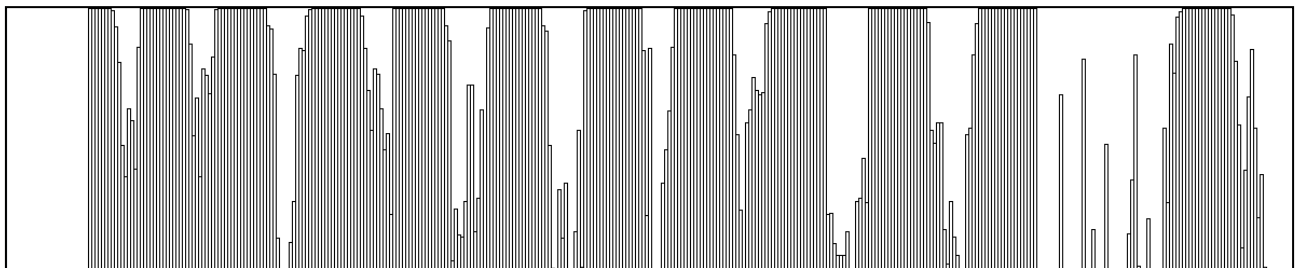


Figura 4.5: Gráfica de probabilidades en la línea trazada sobre los puntos del lado izquierdo



La figura 4.6 ilustra el resultado de correlacionar los perfiles del mapa de probabilidad ilustrados en las figuras 4.4 y 4.5.

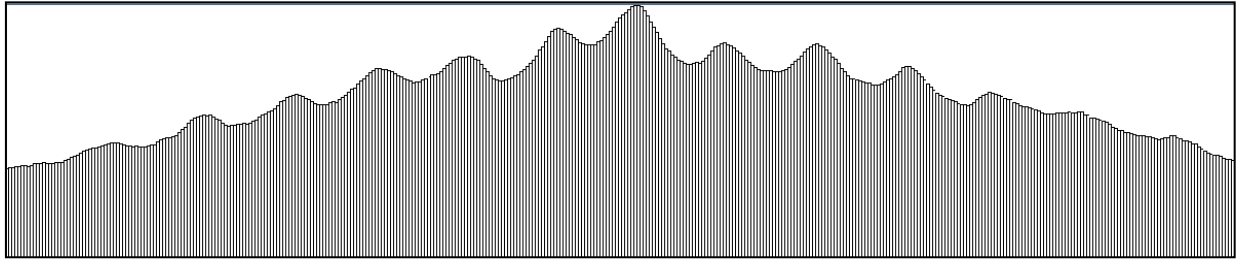


Figura 4.6: Gráfica de correlación de los vectores izquierdo y derecho

El pico máximo representa el mejor acople entre el vector izquierdo y el derecho.

#### 4.2.5 Alineación con puntos de referencia

El desplazamiento máximo horizontal en cada uno de los niveles está referenciado a la posición de los puntos de la imagen de la estructura en reposo, respecto al movimiento de los demás puntos del modelo que se observa en la secuencia de imágenes capturadas, y es a partir de estas condiciones que se logra obtener el desplazamiento en el modelo para el posterior análisis de datos.

Según el instante en que fue capturada la imagen la estructura se encuentra en diferentes sectores, por lo que es necesario realizar una traslación y rotación de ésta a un punto fijo (figura 4.7).

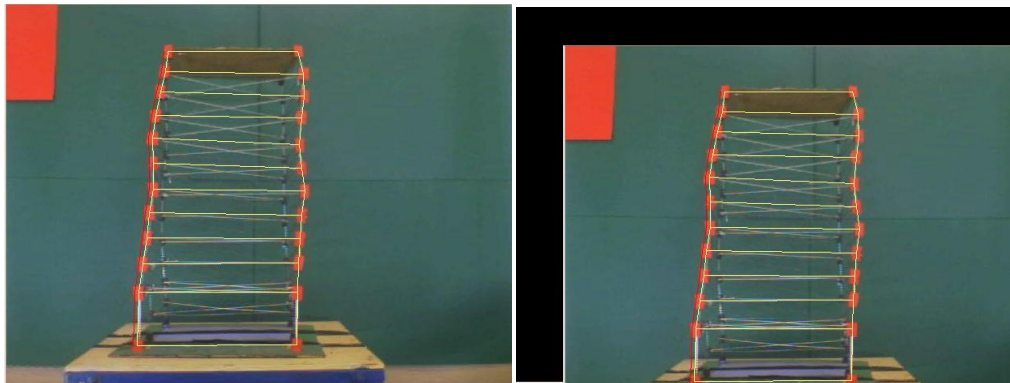


Figura 4.7: (a) Imagen original, (b) Imagen trasladada

#### 4.2.6 Determinación y análisis en el tiempo de la estructura

Una vez corregida la estimación de la posición de las marcas se procede a crear la estructura digital para cada una de las imágenes. Esta estructura se representa a nivel visual con líneas entre los puntos centrales de cada marca, y líneas de enlace horizontal entre los puntos, como se pueden ver en la figura 4.8

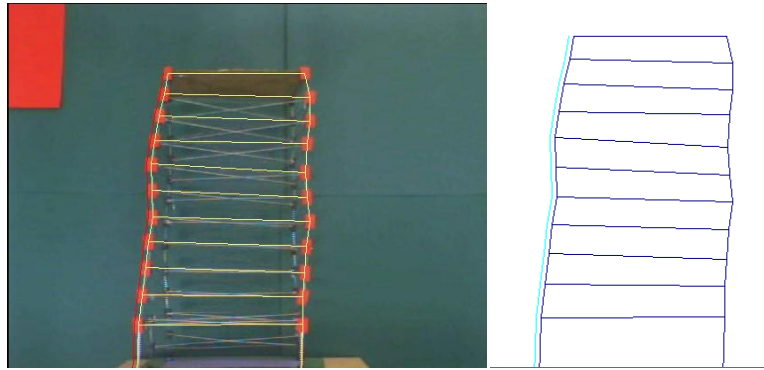
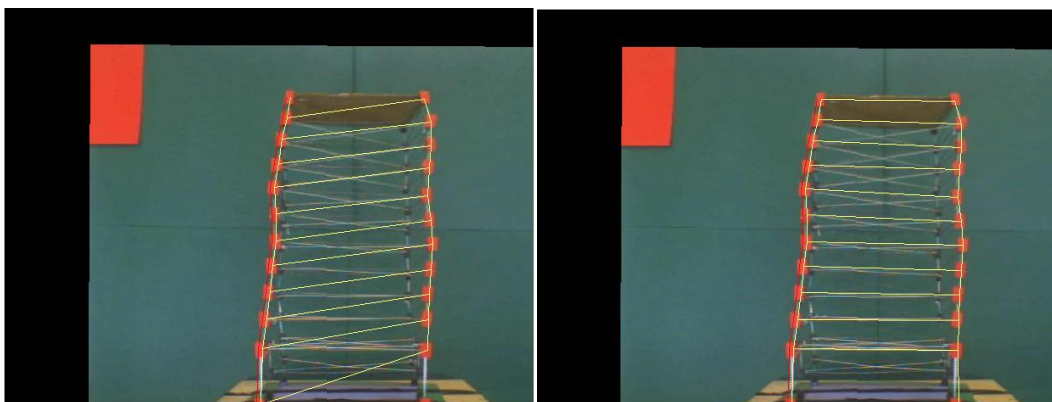


Figura 4.8: Estructura final de una imagen

Una vez obtenido el modelo de estructura se realiza una comparación punto a punto con un vector construido a partir del promedio de posiciones de los puntos en imágenes consecutivas de la secuencia. La comparación permite corregir la estructura en caso de presentarse diferencias con un margen de variación del 10%.

En la imagen 4.9 se ilustra dicha corrección.



(a)

(b)

Figura 4.9: Ejemplo de corrección de punto perdido (a) imagen de estructura con punto faltante, (b) imagen de estructura corregida

#### 4.2.7 Cálculo y despliegue de los resultados

La tabla 4.5 y 4.6 presentan como ejemplo de las coordenadas máximas y mínimas obtenidas de cada marca de la estructura en una muestra de 10 imágenes. Las marcas son numeradas de abajo hacia arriba.

Tabla 4.5: Valores de coordenadas máximas y mínimas de la marcas (1 a la 6).

	Marca 1	Marca 2	Marca 3	Marca 4	Marca 5	Marca 6
X Mayor :	516.8	517.83	518.90	520.21	521.943	525.152
Y Mayor :	480.011	415.922	379.569	349.962	320.351	291.333
X Menor :	317.972	320	324.433	328.863	331.595	336.254
Y Menor :	480	415.213	380.689	348.24	317.049	288.548

Tabla 4.6: Valores de coordenadas máximas y mínimas de la marcas (6 a la 12).

	Marca 7	Marca 8	Marca 9	Marca 10	Marca 11	Marca 12
X Mayor :	521.713	519.17	520.93	523.494	522.917	522.556
Y Mayor :	262.702	233.803	200.12	173.612	146.792	149.866
X Menor :	335.79	334.671	338.014	343.125	346.415	352.097
Y Menor :	256.378	225.805	198.025	168.316	167.797	142.912

La tabla 4.7 y 4.8 muestra el resultado de los desplazamientos máximos obtenidos a partir de los datos anteriores.

Tabla 4.7: Valores de desplazamientos máximos dados en pixeles (marca de la 1 a la 6).

	Marca 1	Marca 2	Marca 3	Marca 4	Marca 5	Marca 6
Desplazamiento máximo horizontal	1.8	2.93	2.991	3.676	2.744	3.296

Tabla 4.8: Valores de desplazamientos máximos dados en pixeles (marca de la 6 a la 12).

	Marca 7	Marca 8	Marca 9	Marca 10	Marca 11	Marca 12
Desplazamiento máximo horizontal	3.442	4.609	4.249	4.342	3.988	11.871

La imagen siguiente muestra un ejemplo de cómo se despliega cuando el modo de vibración es identificado.



Figura 4.10: Estructura final de una imagen

Para el cálculo de deriva de la estructura en la figura 4.10, el máximo desplazamiento es determinado en las primeras 10 imágenes de la secuencia, tomando como imagen en reposo la primera imagen. El valor de la deriva es mostrado en la Tabla 4.9

Tabla 4.9: Resultados de los cálculos de deriva

	Imagen 1 (píxeles)	Imagen 1(cm)
Medida vertical del edificio	361.7290	61.4939
Desplazamiento Máximo Marca 1	11.8710	2.0181
Deriva	0.0328	

## Capítulo 5: Conclusiones y Recomendaciones

Utilizando los cálculos de conversión de píxeles a centímetros se determina que la precisión para el desplazamiento del edificio es de  $\pm 1$  píxel que es equivalente a 1,7mm.

Se logró diseñar un sistema que permite la adquisición de imágenes de una resolución de 640\*480 píxeles, con una definición de color de 8 bits.

Es necesaria la utilización de colores opuestos en marcas y fondo para lograr una segmentación efectiva, facilitando la eliminación de espurias en la determinación de la estructura. Además, es recomendable realizar la captura de las imágenes en lugares bien iluminados, evitando la existencia de sombras, ya que cambian las características de color de algunas marcas en la imagen almacenada.

Se utilizaron varios procesos matemáticos, entre ellos la correlación para el mejor ajuste de las columnas izquierda y derecha, y la umbralización para eliminación de espurias, que ayudaron a llegar a un modelo de estructura del cual se pudo determinar el valor de deriva, que para la estructura tomada de ejemplo es 0,0328 y el primer modo de vibración fue el único identificado.

A la hora de caracterizar la estructura se logra encontrar un modelo digital de estructura, y de cada 10 imágenes 1 pierde al menos una marca de color.

El análisis en el tiempo logra mejorar en la estructura digital el reconocimiento de puntos que por medio de análisis individual de cada imagen no se logra.

Para la siguiente etapa del proyecto se recomienda implementar una interfaz gráfica para facilitar a los usuarios el uso del programa.

## Capítulo 6: Bibliografía

- [1] R. Aguiar, *Evaluación rápida de la deriva máxima de piso para calcular la vulnerabilidad sísmica de estructuras*, Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería, 2006.
- [2] P. Alvarado, “Segmentation of color images for interactive 3D object retrieval,” 2004.
- [3] K. Barnard, V. Cardei, and B. Funt, “A comparison of computational color constancy algorithms--part I: methodology and experiments with synthesized data.,” *IEEE Transactions on Image Processing : a publication of the IEEE Signal Processing Society*, vol. 11, Jan. 2002, pp. 972-83.
- [4] W.K. Pratt, *Digital image processing*, Los Altos, California: Wiley-Interscience, 2001.
- [5] Michael Jones; James Rehg, “Statistical color models with application to skin detection,” *International Journal of Computer Vision*, vol. 46, 2002, pp. 274-280.
- [6] P. Alvarado, *Señales y Sistemas: Fundamentos Matemáticos*, Instituto Tecnológico de Costa Rica, 2008.
- [7] R.C. Gonzalez and R.E. Woods, *Digital Image Processing*, Estados Unidos: Pearson Prentice Hall, 2008.
- [8] N. Otsu, “A Threshold Selection Method from Gray-Level Histograms,” *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, vol. 9, 1979, pp. 62-66.
- [9] T.S.C. Ping-Sung Liao and P.C. Chung, “A fast algorithm for multilevel thresholding,” *Journal of Information Science and Engineering*, vol. 17, 2001, p. 713–727.