



Universidad Autónoma del Estado de México
Centro Universitario UAEM Texcoco

Doctorado en Ciencias de la Computación

“Sistema de medición de desplazamiento relativo de entrepiso en edificios de varios niveles con control mediante FPGAs”

TESIS

Que para obtener el grado de Doctor en Ciencias de la Computación

Presenta:

Félix Ramírez Cervantes

Tutor académico:

Dr. Farid García Lamont

Tutores adjuntos:

Dr. Joel Ayala De la Vega

Dr. Rodolfo Zola García Lozano

Texcoco, Estado de México.

Noviembre de 2022.

Índice general

Capítulo 1. Introducción.....	8
1.1 Planteamiento del problema	8
1.2. Justificación	10
1.3. Objetivos	12
1.3.1. Objetivo general.....	12
1.3.2. Objetivos específicos.....	12
1.4. Hipótesis.....	13
Capítulo 2. Estado del arte	14
Capítulo 3. Marco teórico	21
3.1. Lógica programable.....	21
3.2. Diseño de sistemas digitales con VHDL.....	25
3.2.1. Integración de entidades.....	26
3.2.2. Diseño jerárquico	27
3.3. Monitoreo de Salud Estructural (SHM)	29
3.4. Consideraciones para la revisión y el diseño sísmico de edificios	32
Capítulo 4. Metodología.....	36
4.1. Identificación de variables	36
4.2. Modelado	36
4.3. Desarrollo mediante Lógica programable.....	44
4.3.1. Sistema Sensor de Desplazamiento Relativo Ultrasónico en Péndulo SSDRUP.....	46
4.3.1.1. Medición de desplazamiento relativo de entrepiso de un punto.....	48
4.3.1.2. Medición de desplazamiento relativo de entrepiso de varios puntos.....	52
4.3.1.3. Implementación del sistema de medición	55
4.3.2. Sistema basado en reglas aplicado para SHM.....	60
4.3.2.1. Metodología de desarrollo del SBR.....	62
Capítulo 5. Pruebas experimentales y resultados.....	76
5.1. Sistema SSDRUP	76
5.2. Sistema SBR para SSDRUP	81
5.3. Discusión	87

Capítulo 6. Conclusiones y Trabajo futuro	89
6.1. Conclusiones.....	89
6.2. Trabajo futuro	90
Referencias.....	91

Índice de Figuras

Figura 3.1. Flujo CAD de Lógica programable en FPGA.....	24
Figura 3.2. Integración de entidades: Diseño individual.....	26
Figura 3.3. Integración de entidades: Asignación de señales.....	27
Figura 3.4. Modelo de estructuras jerárquicas.....	28
Figura 3.5. Zonificación geotécnica de la Ciudad de México.....	33
Figura 3.6. Esquema de ubicación de sensores.....	34
Figura 4.1. Diagrama de bloques del sistema.....	38
Figura 4.2. Diagrama de procesos del sistema.....	39
Figura 4.3. Diagrama de clases del sistema.....	40
Figura 4.4. Diagrama de objetos del sistema.....	41
Figura 4.5. Diagrama de transición de estados del sistema.....	42
Figura 4.6. Diagrama de módulos del sistema.....	44
Figura 4.7. Arquitectura del Diseño jerárquico.....	45
Figura 4.8. Laboratorios de instrumentación.....	47
Figura 4.9. Implementación del sistema de medición de desplazamiento lateral.....	48
Figura 4.10. Elementos para calcular la distorsión de entrepiso.....	49
Figura 4.11. Ubicación del sensor.....	50
Figura 4.12. Medida de los desplazamientos relativos de una estructura.....	53
Figura 4.13. Esquema por bloques del sistema de medición.....	59
Figura 4.14. Funciones de membresía de la variable de entrada en el rango [0,70].....	64
Figura 4.15. Diagrama de flujo de la primera etapa.....	66
Figura 4.16. Simulación del sistema con entrada de valor 37.....	68
Figura 4.17. Superficie <i>DESP_REL - A_ACUSTICO</i>	69
Figura 4.18. Superficie <i>DESP_REL - A_MENSAJE</i>	70
Figura 4.19. Superficie <i>DESP_REL - A_VISIBLE</i>	70
Figura 4.20. Esquema por bloques del sistema SBR.....	72
Figura 4.21. Esquema general del sistema.....	73
Figura 4.22. Instrumentación con sensores <i>HC-SR04</i>	74
Figura 4.23. SBR para SDRUP embebido en la FPGA <i>EP2C5T144C8</i>	75
Figura 5.1. Medidas de desplazamiento relativo de entrepiso obtenidas en el experimento 1.....	77
Figura 5.2. Medidas de desplazamiento relativo de entrepiso obtenidas en el experimento 2.....	78
Figura 5.3. Medidas de desplazamiento relativo de entrepiso obtenidas en el experimento 3.....	80
Figura 5.4. Diagrama de tiempos Prueba 1.....	81
Figura 5.5. Diagrama de tiempos prueba 2.....	82
Figura 5.6. Diagrama de tiempos Prueba 3.....	83
Figura 5.7. Diagrama de tiempos Prueba 4.....	84
Figura 5.8. Diagrama de tiempos Prueba 5.....	85
Figura 5.9. Diagrama de tiempos Prueba 6.....	86

Índice de Tablas

Tabla 4.1. Rangos de la variable DESP_REL.....	65
Tabla 4.2. Reglas de producción.....	67
Tabla 5.1. Datos obtenidos en el experimento 1.	76
Tabla 5.2. Datos obtenidos en el experimento 2.	78
Tabla 5.3. Datos obtenidos en el experimento 3.	79
Tabla 5.4. Valores lógicos presentes en las salidas hacia los actuadores en la prueba 1.	81
Tabla 5.5. Valores lógicos presentes en las salidas hacia los actuadores en la prueba 2.	82
Tabla 5.6. Valores lógicos presentes en las salidas hacia los actuadores en la prueba 3.	83
Tabla 5.7. Valores lógicos presentes en las salidas hacia los actuadores en la prueba 4.	84
Tabla 5.8. Valores lógicos presentes en las salidas hacia los actuadores en la prueba 5.	85
Tabla 5.9. Valores lógicos presentes en las salidas hacia los actuadores en la prueba 6.	86

Resumen

El objetivo de este trabajo fue desarrollar un sistema electrónico capaz de obtener las medidas de desplazamiento relativo de los entrepisos de un edificio de varios niveles para la determinación de salud estructural. En una primera etapa, un grupo de sensores ultrasónicos recogen una medida que se utiliza como dato de entrada a un algoritmo que se encarga de obtener el desplazamiento relativo del entrepiso de cada nivel aplicando relaciones de semejanza del primer teorema de Thales, así mismo determina la mayor de las medidas de desplazamiento relativo. En una segunda etapa, un motor de inferencia realiza la evaluación de la medida obtenida en la primera fase con lo cual el sistema puede determinar los valores hacia los actuadores que permiten proporcionar el estado de salud estructural de la edificación, para lograrlo se implementa un algoritmo de un sistema basado en reglas que evalúa la variable desplazamiento relativo del entrepiso y determina las acciones esperadas de acuerdo con el diseño elaborado. Finalmente, se integran software y hardware, y el sistema se embebe en una FPGA.

Para la implementación de las fases se utilizaron técnicas de descripción de hardware con Lógica programable mediante la Integración de entidades y Diseño jerárquico con programación VHDL. Se presentan los resultados consistentes en conjuntos de experimentos para las dos fases descritas utilizando el modelo de una estructura de seis niveles en los que se comprobó que el sistema era capaz de determinar la estabilidad de la estructura experimental a partir del parámetro de desplazamiento relativo del entrepiso.

Palabras clave: lógica programable, diseño jerárquico, sistema basado en reglas, monitoreo de salud estructural, desplazamiento relativo.

Abstract

The objective of this work was to develop an electronic system capable of obtaining the relative displacement measurements of the mezzanines of a multi-level building for the determination of structural health. In a first stage, a group of ultrasonic sensors collect a measurement that is used as input data to an algorithm that is responsible for obtaining the relative displacement of the mezzanine of each level by applying similar relations of the first Thales theorem, likewise determines the largest of relative displacement measurements. In a second stage, an inference engine performs the evaluation of the measurement obtained in the first phase with which the system can determine the values towards the actuators that allow providing the structural health status of the building, to achieve this implemented an algorithm of a rule-based system that evaluates the relative displacement variable of the mezzanine and determines the expected actions according to the elaborated design. Finally, software and hardware are integrated, and the system is embedded in an FPGA.

For the implementation of the phases, hardware description techniques with Programmable Logic were used through the integration of entities and hierarchical design with VHDL programming. The results are presented consisting of sets of experiments for the two stages described using the model of a six-level structure in which it was verified that the system was able to determine the stability of the experimental structure from the relative displacement parameter of the mezzanine.

Keywords: programmable logic, hierarchical design, rule-based system, structural health monitoring, relative displacement.

Capítulo 1. Introducción

1.1 Planteamiento del problema

Las estructuras de los edificios son afectadas por diversos eventos no deseados como lo son los sismos, las inundaciones, los accidentes industriales y el hundimiento del suelo en su basamento entre otros, que les ocasionan severas afectaciones inclusive el desplome y daño al patrimonio de los ciudadanos inclusive el deceso de estos.

El habitar u ocupar un edificio puede significar en extremo peligroso ya que el estado estructural de este puede no ser visible, siendo esto una gran preocupación para sus usuarios. La Ciudad de México contiene edificios hechos de diversos materiales: por ejemplo, concreto, acero, mampostería, entre otros. El daño en estructuras hechas de los materiales que se mencionan puede representar un peligro latente para la sociedad.

México está ubicado en el denominado cinturón de fuego y esto significa que está en la zona más activa del planeta pues en ella se concentran 90% de los sismos y 80% de los volcanes activos (Blanco, 2018). Esto conlleva la posibilidad de que en cualquier momento se presente un sismo de determinada magnitud que pueda ocasionar daños en edificios, puentes y de más infraestructura urbana, lo que podría ocasionar heridos y decesos de sus ocupantes, así mismo, los fenómenos meteorológicos, los hundimientos, los accidentes industriales y otros eventos no deseados ponen en evidencia nuestra vulnerabilidad al ocupar estas estructuras.

Las investigaciones en el área ingenieril han obtenido buenos resultados ya que han actualizado y/o generado la normatividad expresada en los reglamentos de construcción en la Ciudad de México, en ellos se plasman para el diseño los límites de desempeño que deben cumplir las estructuras.

Ahora bien, existe la tecnología para la instrumentación de los edificios, pero dicha instrumentación solo es empleada para la recopilación de datos acerca del comportamiento estructural de alguna característica dinámica o estática con la finalidad de obtener datos para el análisis post evento, y en las grandes instituciones para la investigación.

La revisión del estado del arte en este campo nos arroja que posiblemente en México se tienen menos de 50 edificios instrumentados (Muriá et al., 2021), el que sólo existan unos cuantos edificios instrumentados o que solo los grandes laboratorios o instituciones de investigación cuenten con esta tecnología es debido al elevado costo de estos.

1.2. Justificación

Los sismos de 1957, 1985 y 2017 produjeron severos daños en la Ciudad de México, los colapsos de estructuras se debieron a diversas causas atribuibles principalmente a vicios en el diseño y construcción, modificaciones de los usuarios y envejecimiento y acumulación de daño de las estructuras (Pérez et al., 2018).

Los habitantes de la Ciudad de México conocen estos riesgos y se manifiesta insegura al ocupar los edificios, sin embargo, la necesidad de habitarlos o de desarrollar sus actividades hace que los ciudadanos los utilicen sin importar estas consideraciones, esto es, desconocen si estas instalaciones son seguras o no lo son.

En la Ley General de Protección Civil de México LGPC (2018) contiene en su artículo cuarto, políticas públicas en materia de protección civil, identifica como prioridad en su párrafo *I. La identificación y análisis de riesgos como sustento para la implementación de medidas de prevención y mitigación.*

Basado en estas premisas, se considera que los usuarios de edificios de la Ciudad de México necesitan una herramienta o mecanismo de señalización que los mantenga informados en todo momento del estado de salud estructural del inmueble que ocupan. Conocer la estabilidad del inmueble al que se ingresa elevará la confianza del ciudadano para ocuparlo y con esto el desarrollo de sus actividades las podría realizar con mayor tranquilidad y seguridad.

El dotar a las edificaciones de un sistema capaz de proporcionar información en tiempo real acerca de su estado de salud estructural puede significar también para los propietarios o los responsables de los inmuebles públicos o privados poder implementar a tiempo, según las normas, procedimientos de mantenimiento, reparación o inclusive demolición y evitar así responsabilidad civil y legal si llegará a ocurrir alguna afectación a la integridad de los ocupantes o sus pertenencias.

La dependencia tecnológica del país ha propiciado que a pesar de los esfuerzos de la investigación en estos campos su implementación se realice de manera rígida y limitada, ya que se debe emplear tecnología no propia que por lo general es poco flexible además de representar una alta inversión económica y significar un gran problema para el mantenimiento, reparación o sustitución. La Lógica programable proporciona un mecanismo de diseño de circuitos integrados de aplicación específica que permiten iniciar el camino al desarrollo de tecnología propia.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

Desarrollar un sistema electrónico de monitoreo del estado de salud estructural que guarda un edificio de varios niveles para la emisión de alertas en tiempo real.

1.3.2. Objetivos específicos

1. Diseñar un sistema electrónico de instrumentación que mida el desplazamiento relativo de entrepiso.
2. Plantear el algoritmo que evalúe el nivel de salud estructural de una edificación de varios niveles.
3. Verificar si la variable desplazamiento relativo de entrepiso es suficiente para determinar las condiciones estructurales de los edificios para obtener el nivel de salud estructural del inmueble.

1.4. Hipótesis

Si la medida desplazamiento relativo de entrepiso es suficiente para evaluar el grado de salud estructural de una edificación, entonces se podrían emitir avisos en tiempo real para informar a los usuarios y responsables. Esto propiciará que incremente el nivel de confianza y seguridad de sus ocupantes.

Capítulo 2. Estado del arte

En la revisión de trabajos relacionados en los ejes marcados se reportan desarrollos y avances en diversos campos orientados principalmente a la detección de daño estructural de las edificaciones con la consideración de sus características dinámicas, estáticas o ambas, la instrumentación de edificios para la obtención de datos para el análisis y la predicción, así mismo de aportaciones para planteamiento de escalas de seguridad y para la normatividad en la construcción.

Chatterjee et. al. (2017) en su trabajo *Red neuronal entrenada con optimización de enjambre de partículas para predicción de falla estructural de edificios de concreto reforzado* (en inglés *Reinforced Concrete, RC*) *de varios pisos*, describen que el uso de métodos tradicionales para predecir fallas estructurales de los edificios de concreto reforzado de varios niveles llevará mucho tiempo y será complejo y que los algoritmos de aprendizaje tradicionales sufren de estar atrapados en óptimos locales con una convergencia prematura. Para resolver este problema, ellos proponen un enfoque basado en la optimización de enjambres de partículas (en inglés *Particle Swarm Optimization, PSO*) para entrenar a la red neuronal (en inglés *Neural Network, NN*) denominada NN-PSO. El PSO se emplea para encontrar un vector de peso con un mínimo de error cuadrático medio (en inglés *Root-Mean-Square Error, RMSE*) para la red neuronal. Emplearon una base de datos de 150 estructuras RC de edificios con varios pisos. Los resultados experimentales establecieron la superioridad del NN-PSO propuesto en comparación con los clasificadores NN y MLP-FFN (en inglés *Multilayer Perceptron Feed-Forward Network*). El NN-PSO logró el 90% de precisión, el 94.74% de recuperación y el 92.31% de *F-Measure* (medida).

En la investigación de Ghasemi et al. (2018), *Método mejorado de detección de daños estructurales basado en la optimización que utiliza energía de tensión y frecuencias modales*, proponen un método de identificación de daños en dos etapas. En la primera etapa, utilizando

el concepto de energía de tensión modal se determinan los elementos dañados más probables. En la segunda etapa para determinar la ubicación y la extensión del daño, para esto se utiliza un algoritmo genético modificado donde la población inicial se genera aleatoriamente. Luego, evalúan los cromosomas creados. El tamaño de la población es 20. La probabilidad de cruce y mutación se establece en 1 y 0.004, respectivamente. En este estudio utilizaron cruce uniforme. El algoritmo genético modificado propuesto determinó la ubicación exacta y la gravedad de los elementos dañados de la estructura.

En el trabajo *Diagnóstico de daños estructurales y simulación de inteligencia de elementos finitos a escala fina de puentes atirantados de cable de largo alcance* de Li et al. (2019), para resolver los problemas de monitoreo de seguridad de puentes atirantados en tiempo real, utilizan un sensor de transmisión inalámbrica para establecer un algoritmo de monitoreo de la estructura de puente de la máquina Boltzmann restringida que denominan SDRBM (en inglés *Sparse-Deep network learning-Restricted Boltzmann Machine*) basada en un factor de penalización de entropía cruzada dispersa, el proceso de aprendizaje profundo de la red se mejora en función del escaso factor de penalización de entropía cruzada y la máquina de Boltzmann restringida (en inglés *Restricted Boltzmann Machine*, RBM), que ha resuelto efectivamente la homogenización. El resultado del experimento muestra que el algoritmo propuesto es superior al algoritmo de comparación (Regresión logística) en términos de precisión de predicción y eficiencia de cálculo de la estructura de seguridad del puente. Sin embargo, el algoritmo propuesto tiene una mayor complejidad de cálculo. Dicha complejidad está relacionada con el entrenamiento de la red de aprendizaje profundo.

Guo et al. (2014) en su trabajo *Monitoreo del estado estructural mediante el uso de un algoritmo de aprendizaje profundo basado en codificación dispersa con redes de sensores inalámbricos*, establecen que los problemas de salud estructural son daños acumulativos, así como leves cambios en las deformaciones estructurales que son muy difíciles de detectar. Además, la complejidad de la estructura real y los ruidos ambientales hacen que el monitoreo de la salud estructural sea más difícil. Y que los métodos existentes utilizan en gran medida varios tipos de sensores para recopilar parámetros útiles y luego capacitar a un modelo de aprendizaje automático para diagnosticar el nivel y la ubicación de los daños, en

los que se necesita una gran cantidad de datos de entrenamiento para el entrenamiento del modelo, mientras que los datos etiquetados son raros en la realidad.

Para superar este problema, emplearon técnicas de aprendizaje profundo combinadas con una red de sensores inalámbricos para monitoreo de salud estructural (en inglés *Structural Health Monitoring* SHM) de modo que se puede usar una gran cantidad de ejemplos sin etiquetar para entrenar un extractor de características basado en el algoritmo de codificación dispersa. A partir de la simulación, las características aprendidas de la codificación dispersa no solo mejoran el rendimiento de la clasificación, sino que también hacen que su enfoque sea más tolerante a los ruidos ambientales.

En la investigación *Predicción de daños en edificios provocados por túneles a través de una red neuronal artificial optimizada* de Moosazade et al. (2019), se plantea que el movimiento de la superficie del terreno debido a la construcción de túneles puede causar daños estructurales. Emplean una red neuronal artificial (en inglés *Artificial Neural Network*, ANN) cuyo proceso de aprendizaje se mejoró al reemplazar el algoritmo de aprendizaje de búsqueda local con el algoritmo PSO para aumentar la precisión y la aplicabilidad de las ANN para la predicción de daños en edificios. Seleccionaron un modelo con una capa oculta y 13 nodos. Se recopiló un conjunto de datos de 44 edificios.

Sus resultados indican que los cálculos obtenidos concuerdan con las mediciones de campo. Sin embargo, la aplicabilidad de este enfoque está limitada por los datos utilizados en la fase de capacitación. A pesar de la limitación mencionada anteriormente, de acuerdo con la consistencia adecuada observada entre los resultados predichos extraídos del modelo y los valores medidos, concluyen que el método ANN propuesto basado en PSO puede usarse para predecir daños en edificios debido a túneles con una precisión relativamente alta.

Arias-Lara and De la Colina (2018) presentan el estudio *Evaluación de metodologías para estimar los desplazamientos de los registros de aceleración*, donde exponen que no existe acuerdo entre los investigadores en relación con la validez/precisión de desplazamientos obtenidos a partir de aceleraciones.

Realizan un análisis comparativo de siete métodos para estimar los desplazamientos de los registros de aceleraciones medidas. Para el cálculo de los desplazamientos, los datos de

entrada (aceleración) se obtuvieron a partir de cuatro tipos de pruebas dinámicas y de un registro sísmico del Tohoku, terremoto de Japón de 2011. Los desplazamientos medidos obtenidos a partir de estaciones de sistema de posicionamiento global (en inglés *Global Positioning System*, GPS) proporcionan la información de los desplazamientos correspondientes para este terremoto.

En sus resultados presentan una tabla donde clasifican los métodos recomendados por cada tipo de forma de onda y concluyen que la frecuencia de excitación no afecta significativamente los resultados.

En el trabajo *Localización y cuantificación de daño en estructuras*, de Guerrero et al. (2006) comentan que el método de la Matriz de Transformación (MT) es capaz de localizar y cuantificar la cantidad de daño en los elementos estructurales, partiendo de un estado inicial sin daño y converge al estado de daño que posee la estructura y sus elementos estructurales.

En el desarrollo de este trabajo lograron obtener una solución más refinada y rápida a la del MMT (Método de la Matriz de Transformación) tradicional que permite localizar elementos estructurales dañados y cuantificar la magnitud de este daño con mayor precisión y rapidez.

Concluyen que contrario a otros métodos de detección de daño, los cuales requieren de un gran consumo de recursos computacionales, sobre todo cuando se tienen estructuras con una gran cantidad de grados de libertad con elementos dañados, el método mostrado en este trabajo (MMT refinado) resulta ser muy adecuado gracias a la velocidad de convergencia que presenta ya que ocupó 10 iteraciones para converger esto en relación con el MMT tradicional que ocupó 100 iteraciones.

El análisis de estructuras sometidas a torsión sísmica se complica cuando se debe considerar la torsión accidental ocasionada por la excentricidad accidental causada por diversas incertidumbres que afectan tanto al movimiento del suelo como a las propiedades y características que conforman a los materiales y elementos que integran a las estructuras. Escobar et al. (2004) en la investigación *Evaluación de criterios de diseño por torsión sísmica estática para edificios de varios pisos*, se propuso y evaluó un nuevo método denominado procedimiento simplificado de diseño (*PSD*), el cual, sin perder precisión,

reduce el número de análisis por lo menos a una tercera parte, con respecto a uno de los métodos más rápidos (método de Ávila).

Li and Hao (2016), en su trabajo *Monitoreo del estado de las condiciones de las juntas en puentes de armadura de acero con sensores de desplazamiento relativos*, exponen que los métodos para determinar salud estructural tradicionalmente se utilizan tecnologías no destructivas como lo son las ultrasónicas y evaluación visual que requieren de acceso a los expertos a las áreas y de inversión de tiempo y costo muy elevado, también identifican que el principal elemento a determinar es el desplazamiento lateral y que para ello se utilizan dos tipos de sensores de desplazamiento que son los láser y acelerómetro que también requieren de expertos y de costo elevado.

Proponen la utilización de un nuevo sensor de desplazamiento relativo entre dos puntos de la estructura dicho sensor está basado en el principio del circuito de Wheatstone. y obtienen mediciones de desplazamiento en un eje determinado, estas mediciones se analizan mediante la transformada de Wavelet continua (en inglés *Continuous Wavelet Transform, CWT*) para obtener la respuesta de la vibración e identificar un cambio real en el estado estructural, y reportan que en el escenario con daño en una identificación no fue clara cuando el daño es localizado en la cara posterior de las ubicaciones de los sensores ya que el rango de sensibilidad de los sensores es de alrededor de 1m, en los otros escenarios se identificó correctamente el daño estructural.

Un sistema sensor distribuido puede reemplazar muchos sensores de punto. Es el sistema de sensores más rentable y eficiente en cuanto al peso y espacio disponible, ya que solo requiere una fibra capaz de enviar y recibir la señal de la misma fibra y solo un monitor es adecuado para mostrar los cambios locales de temperatura, estrés, vibraciones y ondas acústicas, etc... Estas ventajas hacen que los sensores distribuidos basados en la dispersión de luz en fibra óptica sean la opción de monitoreo más potente incluso en comparación con los sensores de fibra puntual, especialmente para el monitoreo estructural cuando el cambio de distribución es crítico para una estructura civil o aeroespacial. (Bao & Chen, 2012)

Cuando se usa red de sensores inalámbricos (en inglés *Wireless Sensor Network, WSN*) para monitorear estructuras civiles, es necesario para implementar un protocolo de enrutamiento adecuado. Zrelli and Ezzedine (2017) presentan una arquitectura simple del protocolo del

árbol de recolección (en inglés *Collect Tree Protocol*, CTP) y reportan el efecto de la distancia en el indicador de intensidad de la señal de recepción (en inglés *Received Signal Strength Indication*, RSSI) y el rendimiento. Para realizar un sistema SHM basado en WSN, en el caso de enormes y vastas estructuras civiles este algoritmo no será capaz de enrutar paquetes de datos.

Las respuestas relacionadas con la capacidad de servicio se usan para evaluar la deformación, las deflexiones máximas, el nivel de vibración y el agrietamiento del concreto. Las respuestas son monitoreadas principalmente por acelerómetros o un sistema GPS. Los acelerómetros se usan para medir los niveles de aceleración en puntos dados de una estructura. El GPS se usa para medir desplazamientos tanto estáticos como dinámicos.

El uso de un acelerómetro permite una medición muy precisa de los niveles de aceleración de un miembro o estructura en el orden de mg (aceleración mili-gravedad).

Se pueden usar los datos obtenidos de acelerómetros para encontrar los desplazamientos a través de la integración numérica. Este enfoque, sin embargo, tiene una deficiencia debido a los errores de integración numérica resultantes. Se han realizado esfuerzos para mejorar la precisión de la integración numérica. Estos esfuerzos han tenido éxito en la estimación de la variación de los desplazamientos a lo largo del tiempo, pero no el desplazamiento estático basal (Tamura et al., 2002) porque los acelerómetros miden solo los componentes de fluctuación de desplazamientos.

Los GPS se han utilizado para medir el historial completo de desplazamiento de una estructura. Sin embargo, el GPS tiene dos limitaciones principales. Primero, debido a que se reciben señales de los satélites, los desplazamientos no pueden medirse en interiores o a través de obstáculos. Segundo, los niveles actuales de precisión del GPS están limitados a ± 1 cm horizontalmente y ± 2 cm verticalmente (Breuer et al., 2002).

El escaneo láser terrestre (en inglés *Terrestrial Laser Scanning*, TLS) permite medir el desplazamiento 3D de cualquier elemento particular en una estructura, así como la deformación estática de la estructura.

Park et al. (2013) reportan que las deflexiones máximas estimadas por el modelo TLS son inferiores a 1mm y están dentro del 1.6% de los medidos directamente por transductores

lineales de desplazamiento variable (en inglés *Linear Variable Displacement Transducers*, LVDT). Los desplazamientos medidos directamente con LVDT pueden ser utilizados como una medida precisa para la evaluación de la capacidad de servicio de una estructura. Los LVDT, sin embargo, tienen que estar unidos a la estructura, lo que puede ser costoso y poco práctico para grandes estructuras.

Un algoritmo genético modificado propuesto por Ghasemi et al. (2018) procedió con éxito y determinó la ubicación exacta y la gravedad de los elementos dañados de una estructura, siendo que, en una primera etapa utilizaron el concepto de energía de tensión modal para determinar los elementos dañados más probables.

El sensor de desplazamiento láser puede construirse según el método de triangulación láser usando un detector sensible a la posición (en inglés *Position Sensitive Detector*, PSD) y un diodo láser (en inglés *Laser Diode*, LD). Cuando no hay luz incidente en la superficie sensible de PSD, la corriente de salida en los electrodos se llama corriente oscura. La corriente oscura cambia con el voltaje inverso y la temperatura afecta la precisión de la medición con luz ambiental dispersa. Cuando la corriente oscura es muy pequeña, se puede usar un filtro de corte de luz para eliminar la mayor parte de la luz dispersa del ambiente.

Song et al. (2006) presentan los métodos: Método de detección de modulación y Método de detección de retención de muestra, para eliminar los efectos causados por la corriente oscura y la luz parásita ambiental.

Capítulo 3. Marco teórico

3.1. Lógica programable

Los dispositivos lógicos programables (en inglés *Programmable Logic Devices*, PLD) favorecen la integración de aplicaciones y desarrollos lógicos mediante el empaquetamiento de soluciones en un solo circuito integrado, se trata de dispositivos totalmente fabricados y verificados que se pueden personalizar desde el exterior mediante diversas técnicas de programación.

Los PLDs son utilizados para reemplazar circuitos de integración de baja escala (en inglés *Small-Scale Integration*, SSI), Integración a Media Escala (en inglés *Medium-Scale Integration*, MSI) e incluso la integración a muy gran escala (en inglés de *very large-scale integration*, VLSI) ya que ahorran espacio y reducen de manera significativa el número y costo de los diseños. Estos dispositivos se clasifican de acuerdo con su arquitectura, es decir, la forma funcional en que se encuentran ordenados los elementos internos que proporcionan al dispositivo sus características específicas, se consideran PLDs:

- Las memorias programables de solo lectura (en inglés *programmable read-only memory*, PROM).
- Los arreglos lógicos programables (en inglés *Programmable Logic Array*, PLA).
- Los dispositivos de lógica de arreglos programables (en inglés *Programmable Array Logic*, PAL).
- Los dispositivos de lógica de arreglos genéricos (en inglés *Generic Array Logic*, GAL).
- Los dispositivos lógicos programables Complejos (en inglés *Complex Programmable Logic Devices*, CPLD).

- Los arreglos de compuertas programables en campo (en inglés *Field Programmable Gate Arrays*, FPGA).

Los dispositivos PROM, PLA, PAL y GAL son conformados por arreglos programables, los CPLDs y FPGAs están constituidos por bloques lógicos configurables y celdas lógicas de alta densidad, respectivamente.

Los circuitos integrados de aplicación específica (en inglés, *Application-Specific Integrated Circuits*, ASIC) son tendencia en el diseño de aplicaciones, y para su desarrollo se cuenta principalmente con dos alternativas (Maxinez y Alacalá, 2007):

1. Diseño totalmente a medida (en inglés *Full-custom design*). Total libertad de diseño, para su desarrollo se requiere de todas las etapas del proceso de fabricación a partir de obleas de silicio *Si* o germanio *Ge* por lo que solo se puede ejecutar en laboratorios altamente especializados. Presenta riesgos y costos elevados, recomendable en proyectos de grandes volúmenes o con restricciones de espacio.
2. Lógica programable. Libertad de diseño, para su desarrollo se emplean PLDs a los cuales se les transfiere la síntesis del diseño que se personaliza mediante diversas técnicas de programación. Riesgos y costos aceptables, recomendado para cualquier tipo de proyecto.

Para implementar Lógica programable se requieren los siguientes elementos: un dispositivo lógico programable, un equipo de cómputo, una plataforma de desarrollo y un lenguaje de descripción.

El lenguaje de descripción de hardware (en inglés *Hardware Description Language*, HDL) más utilizado es VHDL (conjunción de los vocablos VHSIC-LDH) el cual es capaz de soportar el proceso de diseño de sistemas electrónicos complejos, creado por el Departamento de Defensa de los Estados Unidos, como parte del programa para el desarrollo de circuitos integrados de muy alta velocidad, VHSIC (en inglés *Very High Speed Integrated Circuits*). La IEEE (en inglés *Institute of Electrical and Electronics Engineers* IEEE) publicó en 1987

el estándar IEEE Std 1076-1987 y en 2019 la revisión IEEE Std 1076-2019, en 1993 el estándar adicional de VHDL IEEE Std 1164 (IEEE Std 1076, 2019).

Es entonces VHDL un estándar para la descripción, modelado y síntesis de sistemas electrónicos. La capacidad para describir y sintetizar circuitos y sistemas digitales en el diseño de soluciones de aplicación inmediata hacen que VHDL sea el HDL más utilizado.

La metodología para diseño asistido por computadora (en inglés *computer aided design*, CAD) para Lógica programable con FPGA representada en el esquema de la Figura 3.1, inicia con el ingreso del diseño el cual parte de una representación esquemática del circuito que se requiere realizar y luego se abstrae el comportamiento o funcionalidad en ecuaciones booleanas, tablas de verdad, diagramas de estado, etc., se programa la solución y al compilar se sintetiza la lógica requerida, esto es, procesa y traduce el archivo fuente y minimiza las ecuaciones booleanas para la FPGA determinada. Una vez superada la compilación se procede a someter a simulación el diseño donde es posible alimentar un conjunto de entradas con lo que se puede comprobar que la solución funcione correctamente antes de introducirlo a la FPGA.

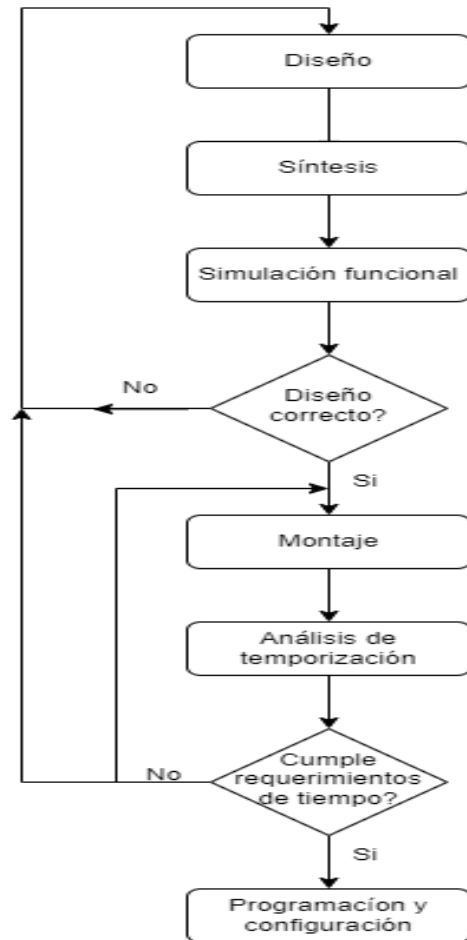


Figura 3.1. Flujo CAD de Lógica programable en FPGA.

Se trata de los siguientes pasos básicos:

- Entrada diseño. El circuito deseado es especificado ya sea mediante el uso de un lenguaje de descripción de hardware, tales como Verilog o VHDL, o por medio de un diagrama esquemático.
- Síntesis. Se sintetiza el diseño ingresado a un circuito que consiste en elementos lógicos (en inglés *logical elements*, LE) y las conexiones entre estos LE previstos para el PLD y que son necesarios para realizar la tarea programada.
- Simulación funcional. El circuito sintetizado se prueba para verificar su correcta funcionalidad; la simulación no tiene en cuenta las cuestiones de temporización.

- Montaje. La herramienta *Fitter CAD* del software *Intell Quartus II* determina la ubicación de los LE del diseño en los LE en un chip FPGA real, y elige cables de enrutamiento en el chip para hacer las conexiones requeridas entre LE.
- Análisis de temporización. Los retardos de propagación a lo largo de los diversos caminos en el circuito se analizan para proporcionar una indicación del rendimiento esperado del circuito.
- Simulación de sincronización. El circuito montado se prueba para verificar tanto su correcta funcionalidad como su sincronización.
- Programación y configuración. El circuito diseñado se implementa en un PLD físico mediante programación de los interruptores que configuran los LE y establecen las conexiones de cableado requeridas.

Para ciertos PLDs como: PROM, PLA, PAL y GAL se transfiere la síntesis de los diseños mediante un grabador de dispositivos lógicos. Algunos otros como los CPLD y FPGA presentan la característica de ser programables dentro del sistema (en inglés *In-System Programmable, ISP*), es decir, no hay que introducirlos a un grabador, ya que por medio de elementos auxiliares se pueden programar dentro de la tarjeta que lo contiene.

3.2. Diseño de sistemas digitales con VHDL

Normalmente surge la necesidad de diseños extensos que podrían contener más de un módulo sistema digital entonces es necesario contar con técnicas de desarrollo para su realización, es quizá la verdadera fortaleza de VHDL el que permita integrar sistemas digitales que contienen una gran cantidad de subsistemas electrónicos.

Para desarrollar soluciones para este tipo de diseños la Lógica programable ofrece dos alternativas:

1. Integración de entidades
2. Diseño jerárquico

3.2.1. Integración de entidades

La Integración de entidades soluciona el problema de sistemas que contienen más de una entidad mediante dos esquemas (Maxinez, 2013):

- Diseño individual. Se diseña individualmente cada bloque lógico a través de varios procesos internos que posteriormente pueden unirse mediante un programa común (ver Figura 3.2). Se da manejo de señales intermedias y que no tienen comunicación con el exterior con el modo entrada/salida (*INOUT*) y se declaran en la entidad.

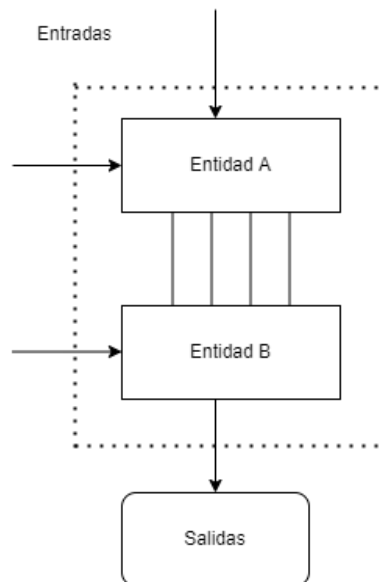


Figura 3.2. Integración de entidades: Diseño individual.

- Asignación de señales. El problema complejo se observa y analiza como un todo. El sistema es evaluado mediante su comportamiento sólo a través de sus entradas y salidas, y también se integran las entidades individuales mediante procesos internos en un programa común (ver Figura 3.3). El manejo de las señales internas (aquellas que no tienen comunicación con el exterior) se realiza mediante la asignación de señales (*SIGNALS*) las cuales se declaran en la arquitectura antes de iniciarla.

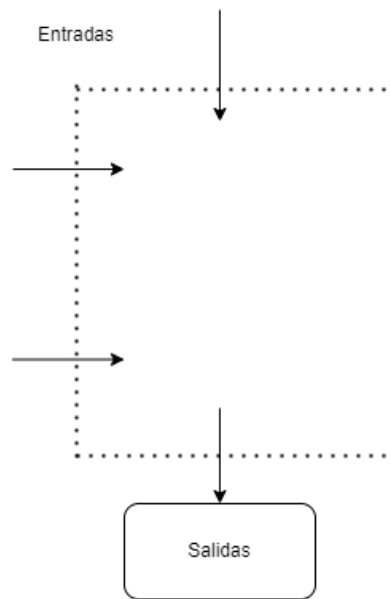


Figura 3.3. Integración de entidades: Asignación de señales.

3.2.2. Diseño jerárquico

El Diseño jerárquico permite la programación de diseños extensos mediante una descripción estructural que consiste en la unión de pequeños bloques; es decir, este diseño agrupa varias entidades electrónicas, las cuales se pueden analizar y simular de manera individual con facilidad, para luego relacionarlas a través de un algoritmo de integración llamado de Alto Nivel (en inglés *Top-Level*) como se muestra en la Figura 3.4.

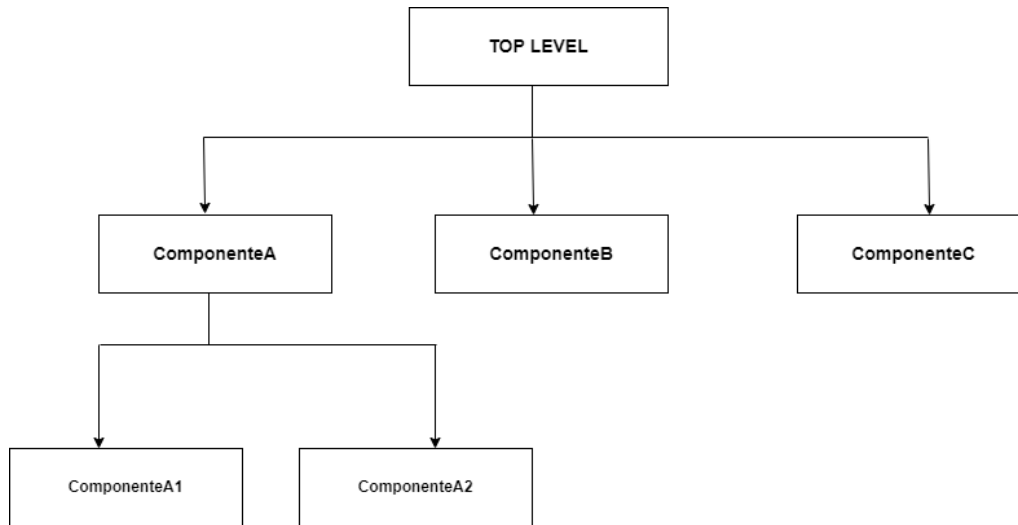


Figura 3.4. Modelo de estructuras jerárquicas.

Metodología de diseño de estructuras jerárquicas con VHDL:

- a) Analizar con detalle el problema y descomponer en bloques individuales la estructura global.
- b) Diseñar, programar, simular y verificar funcionalidad correcta de los módulos individuales.
- c) Crear el paquete de componentes que integra los puertos de todas las entidades.
- d) Creación de la biblioteca (*library*) que contenga el acceso a los elementos de las entidades diseñadas y funcionalidad adicional (opcional).
- e) Diseñar y programar el programa de alto nivel (*Top Level*) que se encarga de enlazar a todas las entidades a través del mapeo de las señales declaradas.
- f) Simular y verificar funcionalidad correcta del programa de alto nivel (*Top Level*) para comprobar que la funcionalidad del sistema global funciona a nivel de entradas salidas, esto se realiza introduciendo datos al flujo de manera manual o por programa.

3.3. Monitoreo de Salud Estructural (SHM)

En materia de Ingeniería Estructural se reporta la generación de varios algoritmos que plantean el procedimiento para la identificación de daño estructural post evento sísmico por medio de características dinámicas y estáticas incluso para la ubicación de sensores para la instrumentación sísmica de edificios.

Todos estos esfuerzos son orientados para la identificación de los mecanismos que ayudan a determinar daño estructural pero una vez ocurrido un evento sísmico, esto es, los especialistas llegan a revisar y de acuerdo con los datos sísmicos y de características estructurales de los elementos que conforman el edificio, determinar el grado de daño de la estructura y así concluir lo referente a la seguridad del inmueble.

Así mismo, la normatividad indicada en el reglamento de construcciones y Norma Técnica Complementaria para la Revisión de la Seguridad Estructural de las Edificaciones (NTC-RSEE) de la Ciudad de México proporciona la información necesaria para extraer los límites del comportamiento que las estructuras deben cumplir para el diseño sísmico.

Por lo anterior resulta imprescindible revisar toda esta teoría para identificar tanto las características dinámicas, estáticas, de resistencia y de estabilidad para verificar si la variable: Desplazamiento relativo de entrepiso, proporciona los elementos necesarios para nuestro fin.

Por lo general, cuando se habla de diseño de estructuras y su normatividad vigente se refiere a su aplicación en estructuras nuevas, sin embargo el número de éstas es muy pequeño en comparación con la totalidad existentes en una urbe como lo es la Ciudad de México. Para prevenir daños y afectaciones importantes a las estructuras debidas a los sismos y a otros eventos no deseados es necesario revisar y reforzar el comportamiento de las estructuras nuevas y sobre todo de las ya existentes, esta necesidad ha hecho que los esfuerzos en investigación en ese campo se orienten principalmente a la vulnerabilidad sísmica de las estructuras y tratan de pronosticar daños en las estructuras ante un sismo de determinadas características. La prevención de daños es importante ya que se pueden identificar los elementos con vulnerabilidad estructural y se pueden plantear los mecanismos para su

atención para evitar los desprendimientos de los elementos no estructurales, el deterioro de los elementos estructurales, inclusive el desplome con lo que se evitaría las consecuentes pérdidas materiales y humanas.

Barbat et al. (2005) definen que *la acción está directamente relacionada con el tipo de análisis estructural que se pretende realizar*. Para las estructuras con comportamiento lineal deben analizarse desde el desacoplamiento modal de las ecuaciones del movimiento y aplicar espectros sísmicos de respuesta, con lo que se obtiene la respuesta máxima de la estructura que es el dato más importante en el que se fundamenta el diseño estructural. Para las estructuras con comportamiento no lineal se emplean procedimientos de integración numérica de las ecuaciones diferenciales del movimiento, con la necesaria obtención de información por medio de acelerogramas para la obtención de la acción sísmica. Estos procedimientos de integración proporcionan el cálculo de la historia completa de la respuesta estructural, pero la aplicación práctica es poco empleada ya que el proceso en el análisis de esta información es de alta complejidad. Esta complejidad representa mayor inversión en recursos y tiempo de cómputo, conocimiento completo de las características de la estructura y conocimiento técnico para la obtención de datos por medio de los acelerogramas.

La identificación de los daños a las estructuras debido a diversas causas como lo son el envejecimiento, los accidentes industriales y la aplicación de diversas cargas a lo largo de su ciclo de vida se puede utilizar para evaluar la seguridad y determinar las acciones de mantenimiento de un edificio.

El monitoreo de salud estructural (en inglés *Structural Health Monitoring*, SHM) basado en la tecnología de sensores ha sido aceptada como un método importante para las evaluaciones de seguridad de estructuras en ingeniería.

En SHM, las respuestas de una estructura se miden utilizando diversos sensores, y los datos medidos se transfieren a un servidor de monitorización utilizando un método de transferencia por cable o inalámbrica para el análisis y la evaluación por los administradores. Las características de la estructura y de diversas cargas (carga de viento, carga de terremoto, y carga de servicio) determinan los elementos objetivo, los tipos de respuesta, y los sensores de medida necesarios. Por lo tanto, la selección de un índice de respuesta que puede evaluar con precisión el daño a una estructura es crucial, y los dispositivos de medición

convencionales tales como acelerómetros, medidores de deformación, y transductores de desplazamiento se han aplicado ampliamente para este propósito. Las mediciones del acelerómetro se utilizan para estimar el daño mediante el análisis de los cambios en las características dinámicas de la estructura. Sin embargo, además de los factores estructurales, los elementos no estructurales y los factores ambientales pueden influir significativamente en los cambios en las características dinámicas de una estructura, que es un problema crítico (Park et al., 2013).

Un medidor de tensión puede identificar con precisión daño local, se requiere la instalación de numerosos indicadores de tensión para evaluar la seguridad de todos los elementos estructurales o la seguridad de toda una estructura. Por lo tanto, la medición directa del desplazamiento o desviación como un índice de respuesta que puede representar efectivamente daños en una estructura es crítica.

Aunque los requerimientos de medición de experimentos de laboratorio pueden ser controlados fácilmente, diversas características de campo deben ser considerados durante la selección y la instalación de dispositivos de medición para mediciones *in situ* de los desplazamientos reales de construcción. En el caso de sensores de contacto o invasivos, es decir, acelerómetros y medidores de deformación, las mediciones se llevan a cabo por contacto directo con los elementos a medir.

Debido a estos desafíos y la importancia de las mediciones de desplazamiento, las aplicaciones de SHM utilizan sistemas de posicionamiento global (en inglés *Global Positioning System, GPS*), vibrómetros de láser Doppler, escáneres láser terrestres, y los métodos basados en la visión, los transductores de desplazamiento existentes se han propuesto como posibles métodos de medición de desplazamiento. Sin embargo, estas técnicas no pueden satisfacer todos los requisitos de rentabilidad, exactitud, medición a largo plazo, y la monitorización en tiempo real cuando SHM se aplica a las estructuras reales.

Silva et al. (2016), describen que las presiones que se generan en la corteza terrestre liberan energía en forma de ondas que inducen vibraciones en las estructuras a través de sus bases, originando desplazamientos de cada una de las masas de la edificación con respecto a su posición de equilibrio estático proporcionales al producto de una función de la posición de la

masa por una función del tiempo, que constituyen la respuesta de la estructura al movimiento de inducido.

3.4. Consideraciones para la revisión y el diseño sísmico de edificios

Zonas geotécnicas de la CDMX. La Ciudad de México se divide en tres zonas geotécnicas, según NTC-RSEE 2017 con las siguientes características generales:

- a) Zona I. Lomas, constituida por rocas o suelos generalmente firmes que fueron depositados fuera del ambiente lacustre.
- b) Zona II. Transición, conformada por depósitos profundos que se encuentran a 20 m de profundidad, o menos, y que está constituida predominantemente por estratos arenosos y limo arenosos intercalados con capas de arcilla lacustre.
- c) Zona III. Lacustre, por lo general cubierta superficialmente por suelos aluviales, materiales desecados y rellenos artificiales; el espesor de este conjunto puede ser superior a 50 m.

En la Figura 3.5 se muestran las porciones de la Ciudad de México cuyo subsuelo se conoce aproximadamente en cuanto a la zonificación anterior.

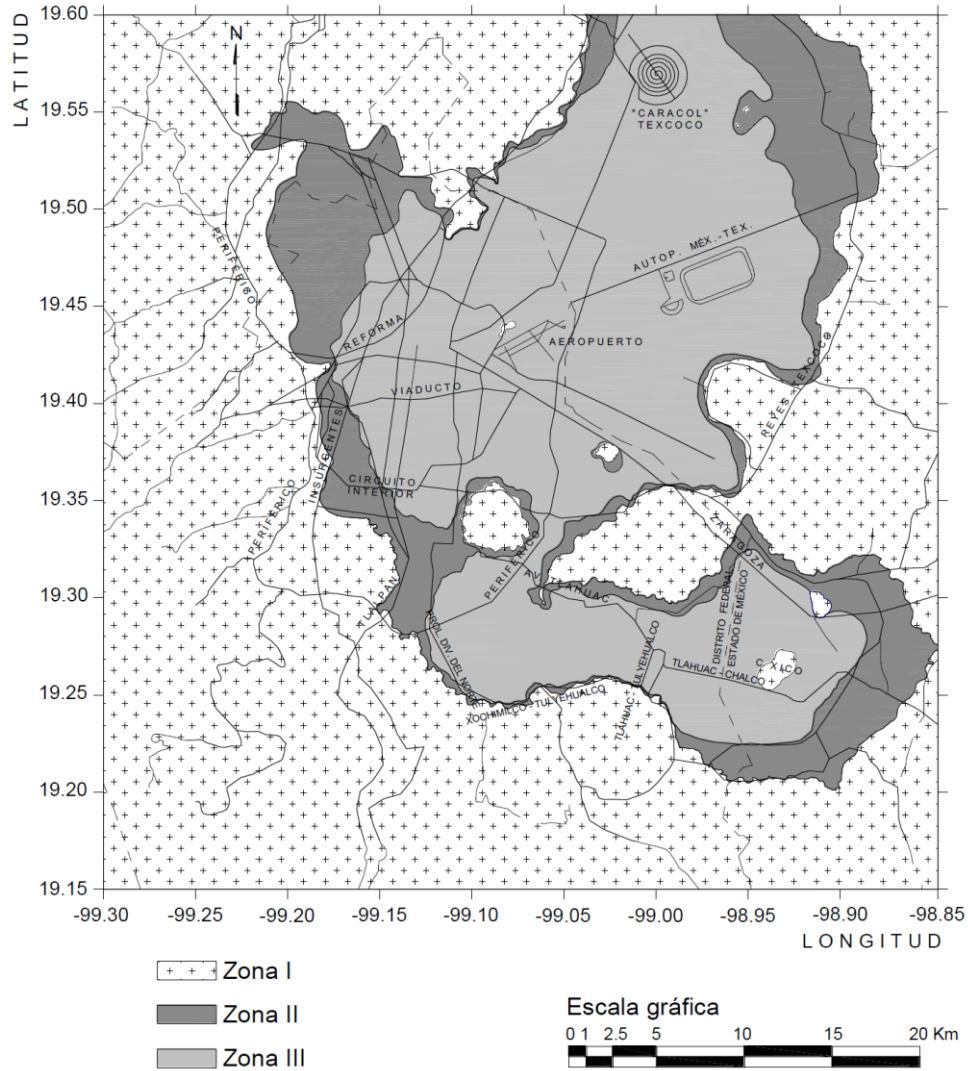


Figura 3.5. Zonificación geotécnica de la Ciudad de México.
Tomada de (NTC-RSEE, 2017)

Clasificación de las estructuras. Para fines de diseño sísmico las construcciones se clasifican en los grupos y subgrupos (NTC-RSEE, 2017):

Grupo A. Edificaciones cuya falla estructural podría tener consecuencias particularmente graves.

Grupo B. Edificaciones comunes destinadas a viviendas, oficinas y locales comerciales, hoteles y construcciones comerciales e industriales no incluidas en el Grupo A.

La NTC también proporciona límites máximos para movimientos y deformaciones originados en la cimentación, donde se verifica que:

Inclinación media de la construcción (NTC-RSEE, 2017):

Tipo de daño	Límite	Observaciones
Inclinación visible	$100 / (100 + 3hc)$ por ciento	hc = altura de la construcción en m

Por otro lado, para la obtención de datos de las características dinámicas (frecuencias y configuraciones modales en traslación) de estructuras que pueden tener diafragmas de piso flexibles se determina la colocación de sensores para puntos de observación por planta, colocando un número de puntos intermedios en función de los modos de vibración que se pretendan identificar, es suficiente analizar dos niveles intermedios ubicados aproximadamente a un tercio y dos tercios de la altura total del edificio, adicionalmente a los de la azotea y la base como se muestra en la Figura 3.6, para obtener los modos torsionales de vibración se recomienda colocarlos en los extremos de cada nivel elegido (Vila y Alcorta, 1995).

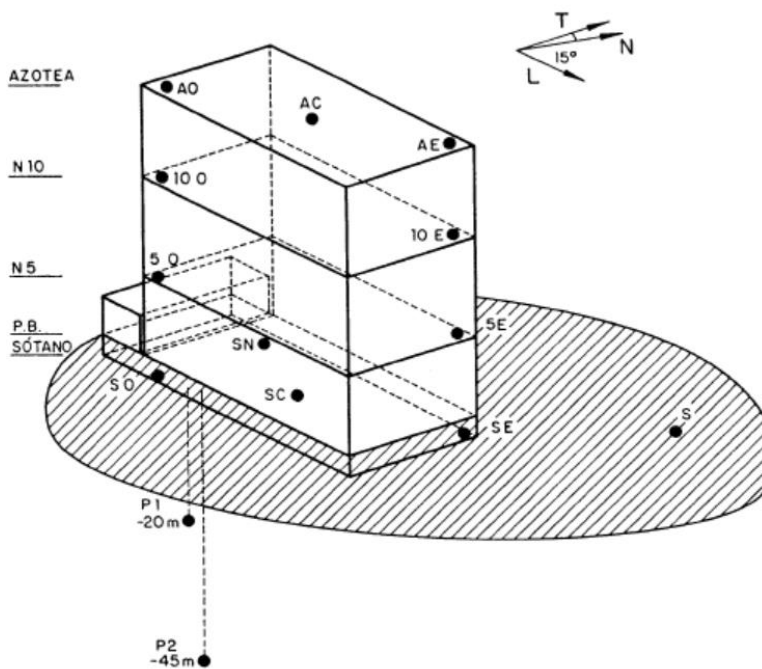


Figura 3.6. Esquema de ubicación de sensores.
Tomada de (Vila y Alcorta, 1995)

Ahora bien, basado en la presentación de algunos conceptos principalmente para ayudar a una mejor comprensión del comportamiento de torsión de los sistemas dúctiles, Paulay (2001) expone: El objetivo principal en el diseño sísmico de edificios debe ser abordar los desplazamientos correspondientes a los criterios de desempeño estipulados. Las consideraciones relevantes para el estado límite final se rigen por las capacidades de ductilidad de desplazamiento que se pueden proporcionar de manera confiable para componentes y elementos resistentes a la fuerza lateral. Para el caso de otras capacidades, incluida la capacidad de servicio, los estados límite requieren una evaluación realista de las magnitudes absolutas de los desplazamientos.

El desplazamiento de la base generado por la fuerza de desplazamiento que la afecta, genera por lo tanto el desplazamiento de la edificación y consecuentemente la afectación a las variables estáticas y dinámicas de la estructura. La ductilidad impuesta a los componentes o elementos del sistema estructural se relaciona con los desplazamientos laterales.

En NTC-RSEE, 2017 se define la distorsión de entrepiso como *la diferencia entre los desplazamientos laterales de los pisos consecutivos que lo delimitan dividida entre la diferencia de elevaciones correspondiente*. Esta norma establece obligatorio la revisión de los límites establecidos de los desplazamientos laterales para las condiciones que deberá observarse en el diseño de edificios.

Entonces de la revisión de la Norma Técnica Complementaria para la Revisión de la Seguridad Estructural de las Edificaciones (NTC-RSEE) para la Ciudad de México se abstrae: Primero, los desplazamientos laterales se deben obtener del análisis realizado con las fuerzas sísmicas de diseño; Segundo, se deben analizar principalmente los elementos estructurales verticales (paredes, muros, marcos, etc..) y considerar para cada elemento solo la mayor distorsión de las que se calculan.

Ahora bien, para la evaluación las magnitudes de desplazamiento medio de los últimos entre pisos, que se esperan en lugares remotos del centro de masas, no deben exceder las que se consideran aceptables para el edificio, típicamente del 2 al 2.5% de la altura del piso (Paulay, 2001).

Capítulo 4. Metodología

4.1. Identificación de variables

Partimos de la identificación de las variables físicas representativas suficientes que determinan las condiciones estructurales de los edificios para obtener el nivel de estabilidad del inmueble.

De la revisión de la teoría en el campo ingenieril y de la Norma Técnica Complementaria para la Revisión de la Seguridad Estructural de las Edificaciones (NTC-RSEE) de la Ciudad de México se determina considerar la variable: Desplazamiento relativo de entrepiso, como suficiente para determinar el estado de salud estructural de las edificaciones de varios niveles.

4.2. Modelado

Los sistemas complejos se pueden descomponer en porciones más pequeñas en los que se pueden analizar su funcionalidad de una manera más sencilla y práctica. El criterio orientado a objetos ayuda para organizar la complejidad inherente de la descripción de hardware. Siendo que los sistemas orientados a objetos son más resistentes al cambio y por tanto están preparados para evolucionar en el tiempo de forma incremental partiendo de sistemas más pequeños en los que ya se tiene control, a través de la reutilización de mecanismos comunes, proporcionando así una importante economía de expresión (Booch et al., 2007).

Entonces podemos considerar nuestro gran problema como una colección de objetos que cooperan y realizamos un análisis orientado a objetos que se centra en el comportamiento dinámico como fuente primaria de clases y objetos, tratando los objetos individuales como instancias de una clase que está dentro de una jerarquía de clases, dicho concepto lo aplicaremos en la metodología planteada en el Diseño jerárquico de la Lógica programable para el diseño de ASICs.

En la Figura 4.1 se presenta el diagrama de bloques del sistema para determinar salud estructural de edificios de varios niveles. El bloque *Entrepiso(X)* contiene el objeto *Sensor Ultrasónico*, se encarga de obtener la medida $M(X)$ que es la distancia del emisor del sensor suspendido en el techo del entrepiso al elemento estructural vertical (marco o pared del lado de la fuerza entrante), esta medida es recolectada de cada uno de seis entrepisos, las medidas $M(X)$ son enviadas al bloque principal: Sistema Sensor de Desplazamiento Relativo Ultrasónico en Péndulo (SSDRUP) donde se interpretan y se calcula la medida desplazamiento relativo de *entrepiso(X)*; el bloque *Panel de Control* contiene el Switch del sistema y es el encargado de desplegar las medidas de desplazamiento relativo de los seis entrepisos calculadas por SSDRUP; el bloque Sistema Basado en Reglas (SBR) recibe la mayor de las medidas de desplazamiento relativo determinada por SSDRUP, la evalúa y determina el estado de los valores hacia el bloque de *Actuadores* por medio del cual se ejecutan las acciones establecidas para los actuadores.

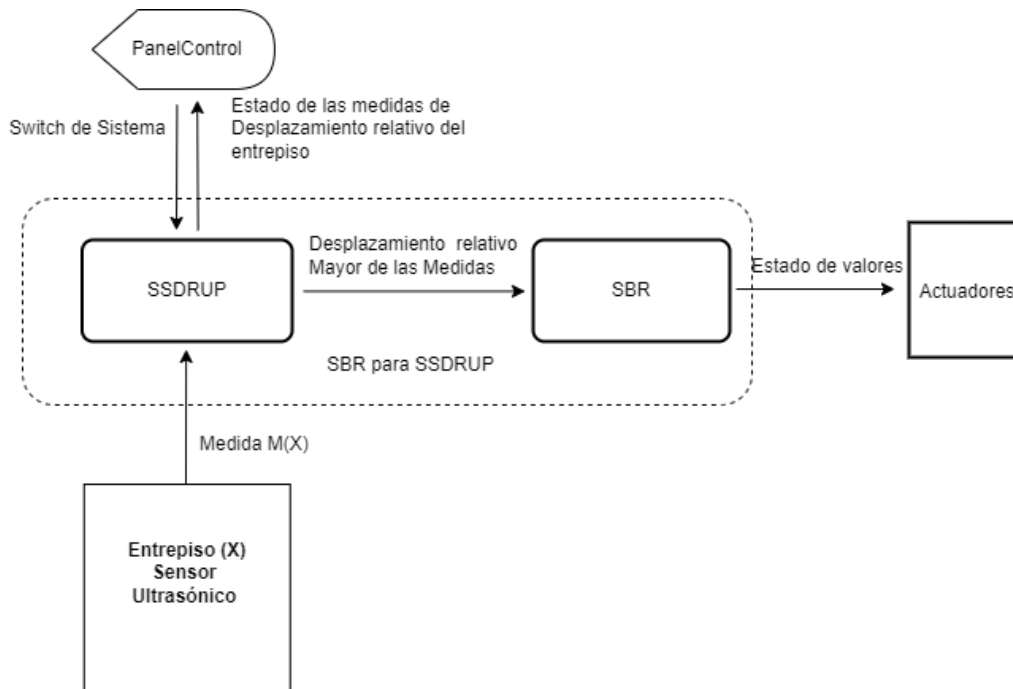


Figura 4.1. Diagrama de bloques del sistema.

La Figura 4.2 proporciona el diagrama de procesos donde se muestra el hardware del sistema. El procesador *Embebido* es el encargado de ejecutar los programas diseñados para la adquisición de datos, interpretación de medida, evaluación de datos y determinación de estado de actuadores. Los dispositivos *Nivel1*, *Nivel2*, *Nivel3*, *Nivel4*, *Nivel5* y *Nivel6* contienen, como se observa en el esquema a los dispositivos de entrada *Sensor1*, *Sensor2*, *Sensor3*, *Sensor4*, *Sensor5* y *Sensor6* los cuales recolectan los datos y envían los datos al procesador para su evaluación; *ActuadorVisible*, *ActuadorAudible* y *ActuadorMensaje* son los dispositivos de salida que se encargan de realizar las acciones programadas.

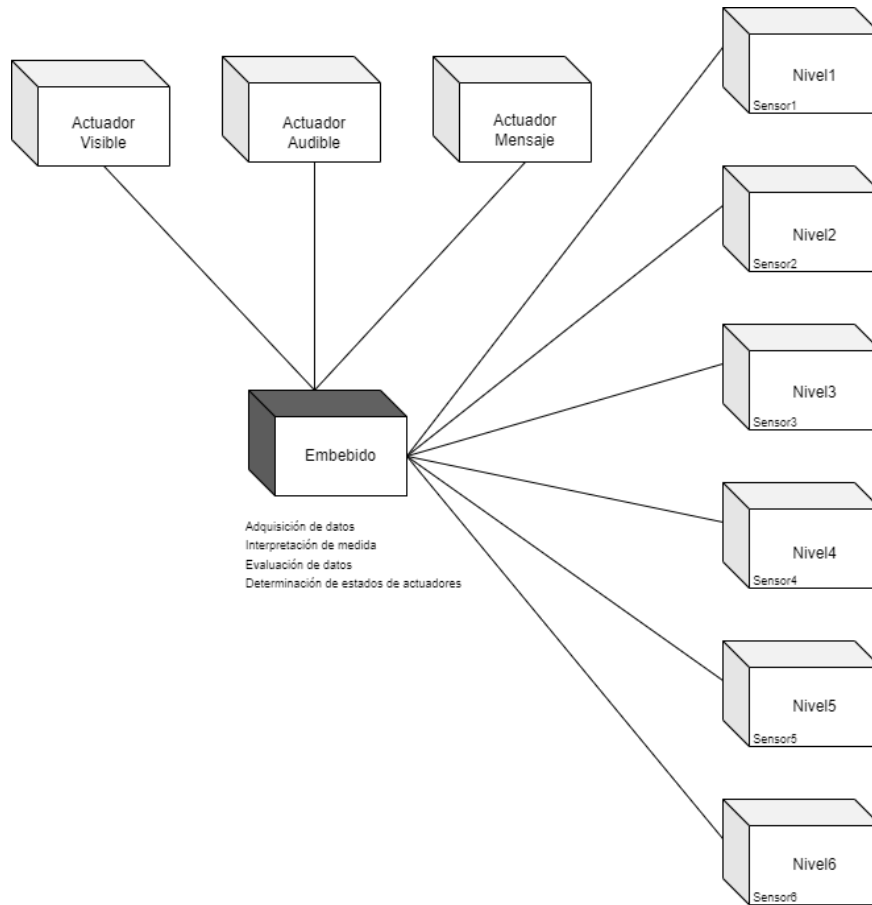


Figura 4.2. Diagrama de procesos del sistema.

Ahora bien, empleemos un diagrama de clases para mostrar la estructura de las clases que conforman la arquitectura del sistema, así como las misiones y responsabilidades comunes de las entidades que caracterizan el comportamiento del sistema. En la Figura 4.3 observamos que la clase *SistemaEvaluacionEstabilidadTop* utiliza como parte de su implementación las clases *PanelControl*, *Edificio*, *Actuador* y *EvaluadorEstabilidad*, ninguna de estas clases tiene visibilidad para *SistemaEvaluacionEstabilidad* ya que está en un nivel de abstracción más alto que todas los demás.

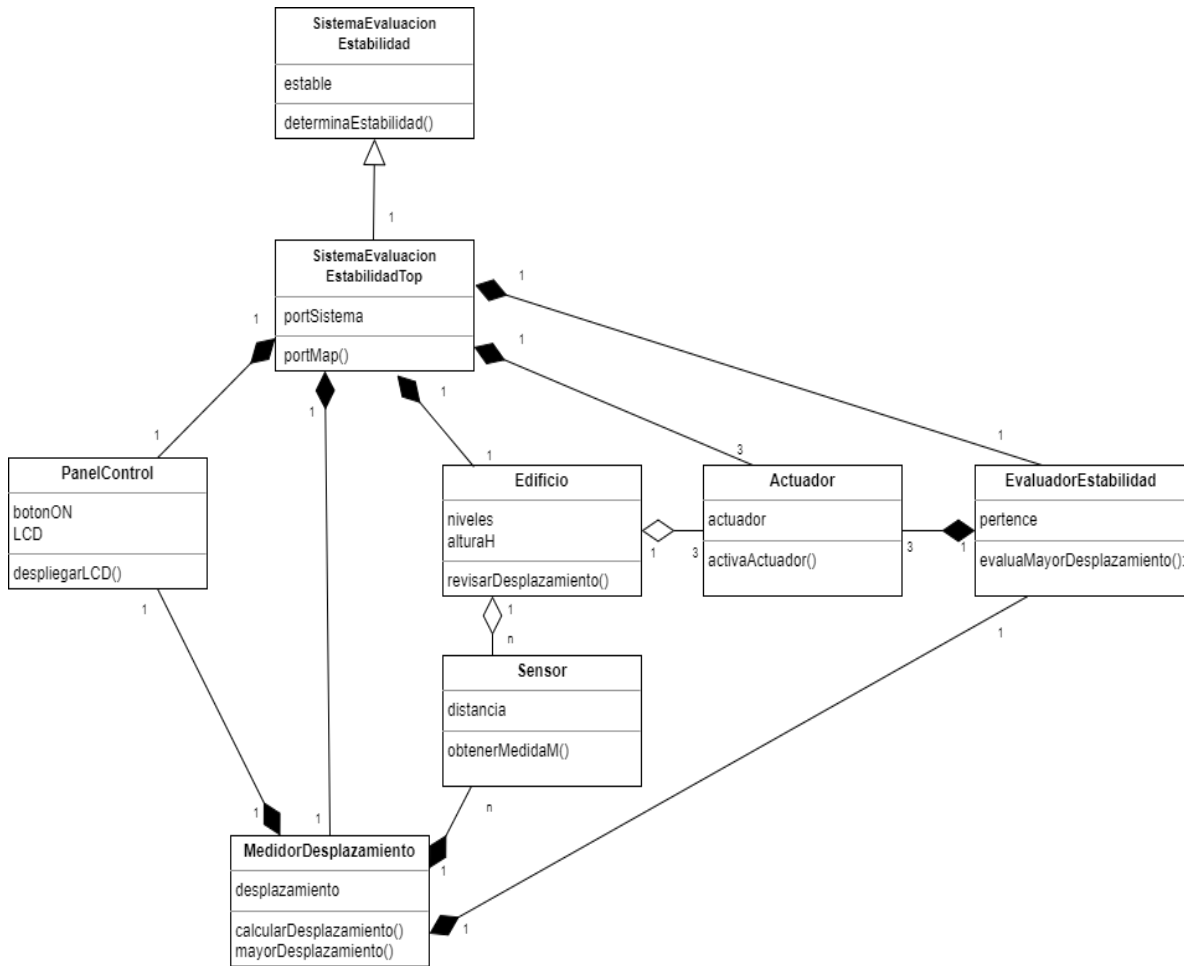


Figura 4.3. Diagrama de clases del sistema.

En la Figura 4.4 se muestra los objetos y sus relaciones en el diseño lógico del sistema. El sistema se centra en el objeto *medidorDesplazamiento* que recibe los datos de los objetos *edificio* y *entrepiso*, así como la respuesta del switch proveniente del objeto *panelControl*. *medidorDesplazamiento* envía información por un lado al objeto *panelControl* para visualizar las medidas de desplazamiento y al objeto *evaluadorEstabilidad* para que este a su vez envíe el estado de los actuadores al objeto *actuador*.

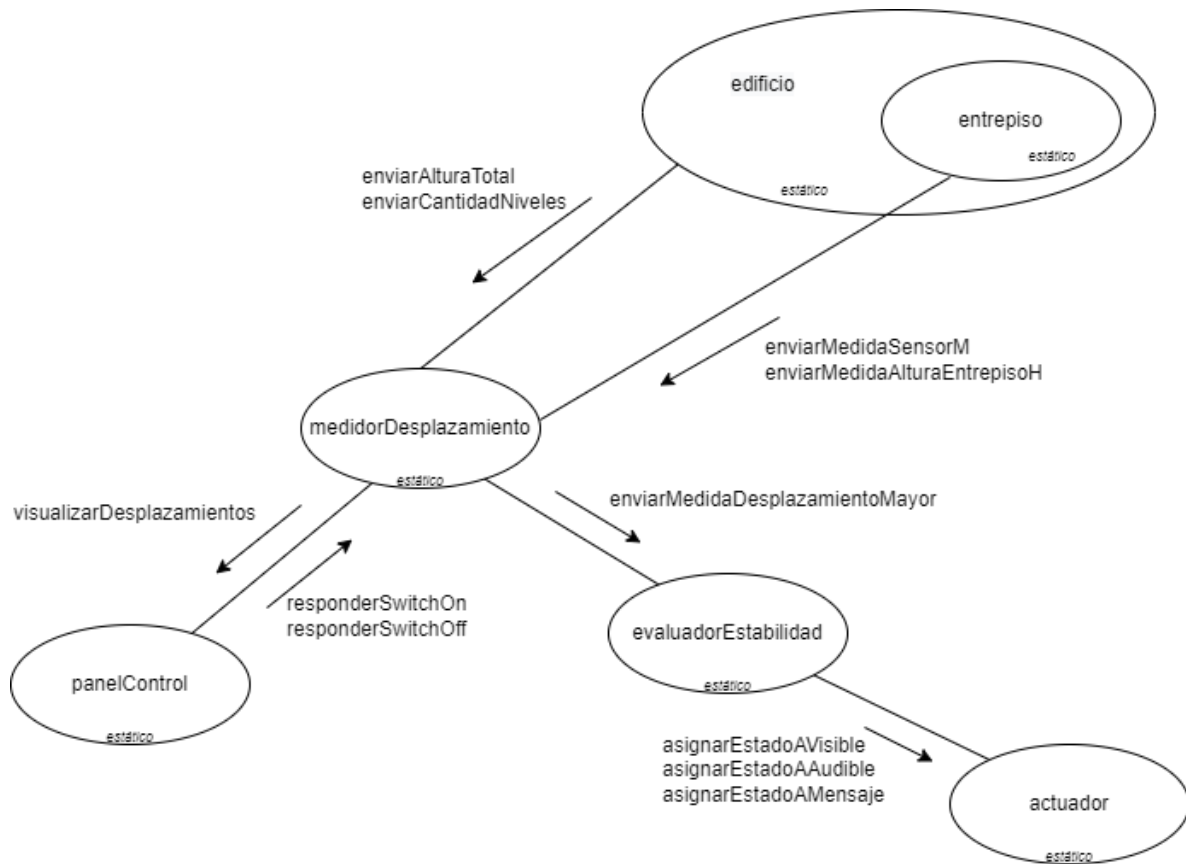


Figura 4.4. Diagrama de objetos del sistema.

Como hemos establecido, el sistema es dinámico y podemos representar la transición entre sus diferentes estados, en la Figura 4.5 se muestra la transición de estados que inicia con *Switch Inicio* en *ON* con el cual se realiza la transición al estado *sensado*, siendo estado actual *sensado* con el evento *ecoON* genera la acción *datoListo* y se mantiene en el mismo estado, esto es, siempre estará *eco* habilitado recibiendo datos y activando a *datoListo*, así mismo cada que ocurra flanco de subida en la señal de sincronía entonces envía *medidaM* al estado siguiente *midiendoDesplazamiento*; cuando estado actual es *midiendoDesplazamiento* cada flanco de subida en la señal de sincronización deriva en dos transiciones: envía medidas de desplazamiento a siguiente estado *desplegando* y ahí se permanece ya que con cada flanco de subida se ejecuta el evento *despliegaDesplazamientos*; y paralelamente envía medida mayor de desplazamiento a estado siguiente *evaluando*. En estado actual *evaluando*, se

produce un evento que es valor de actuador y corresponderá salida hacia los actuadores en los estados *AVisible*, *AAudible* y *AMensaje*.

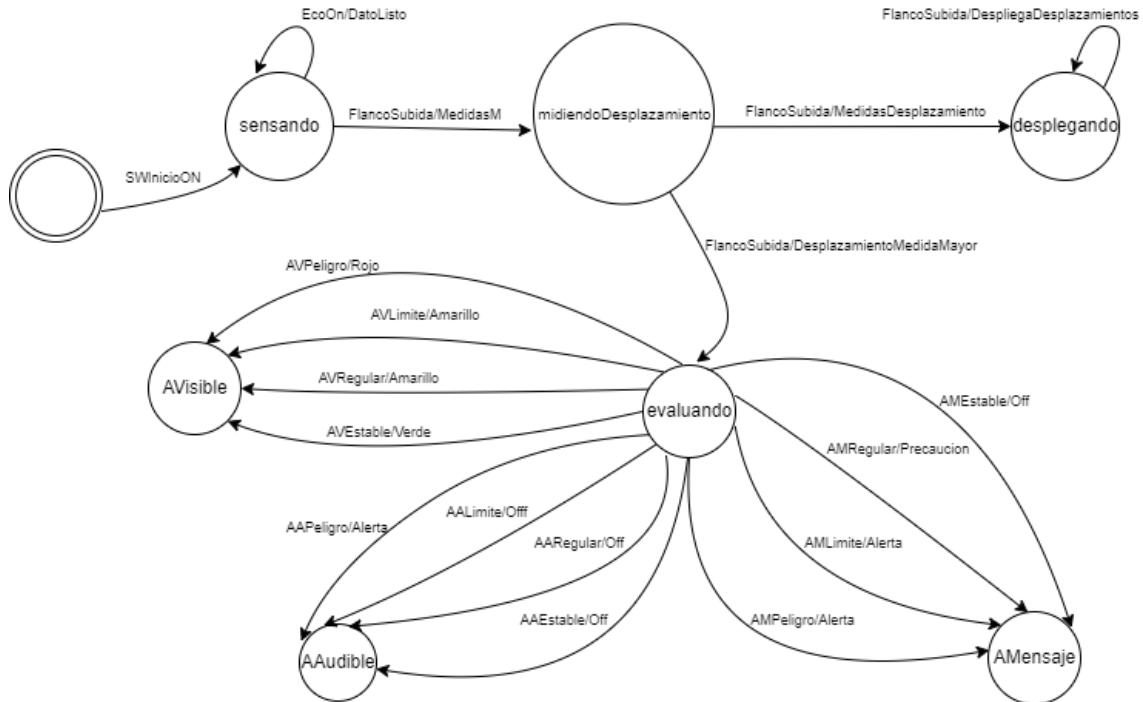


Figura 4.5. Diagrama de transición de estados del sistema.

En el diagrama de módulos de la Figura 4.6 se muestra la asignación de clases y objetos a módulos en el diseño físico del programa del sistema, muestra las relaciones entre módulos las cuales representa únicamente las dependencias de compilación. Se ve un módulo principal *Top* el cual representa la raíz del sistema, en el Diseño jerárquico de la Lógica programable será el programa de programa de alto nivel (*Top Level*) que realizará el enlace con los programas individuales diseñados y compilados según indica su metodología; así mismo, se observan tres módulos los cuales en el Diseño jerárquico serán los programas individuales de las entidades en las que se divide el sistema global y que también se les denomina componentes; un paquete de componentes denominado *componentes* el cual contendrá las señales de los componentes declaradas en cada una de las entidades de diseño individual; y

también seis submódulos los cuales se implementarán por medio de procesos contenidos en los programas de los módulos de los que dependen esta implementación y se realizará con la técnica de Integración de entidades de la Lógica programable. Entonces, el módulo *Calcula_Desp* que se encarga de calcular las medidas de desplazamiento relativo depende de la compilación del módulo *Adquiere*, el cual implementa los mecanismos para leer los datos entregados por los sensores y los traduce en una distancia. Podemos identificar que el módulo *Calcula_Desp* presenta también relación con los submódulos *Codificador* y *Procesador_LCD*, de modo que *Procesador_LCD* despliega las medidas de desplazamiento relativo de las medidas realizadas pero depende de la compilación de *Codificador* que se encargará de adaptar los datos para el despliegue en un panel LCD 16x2, a su vez, *Codificador* depende de la compilación y cálculo de datos (medidas de desplazamiento relativo) por *Calcula_Desp*. Por último el módulo *Evalua* también depende de los datos que procesa *Calcula_Desp*, y a su vez el submódulo *salida* interpreta los valores para las salidas hacia los actuadores determinados y entregados por *Razón*, que también a su vez depende de *pertenencia* y de *pendiente* que determinan el grado de pertenencia y el valor de la pendiente de la recta en los intervalos de tiempo en los que se dividan las funciones de membresía; ambas *pertenencia* y *pendiente* dependen del valor de *Evalua* que a su vez depende del valor entregado por *Calcula_Desp*.

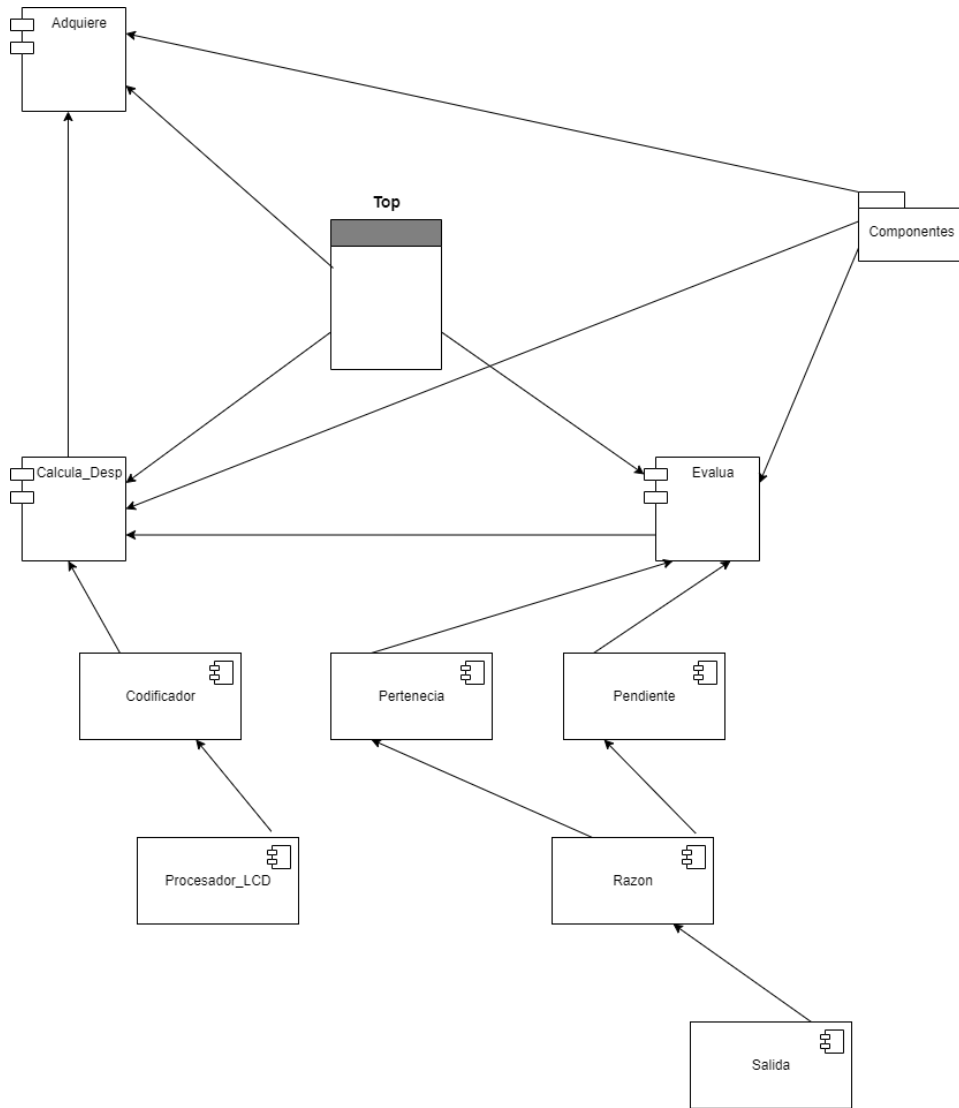


Figura 4.6. Diagrama de módulos del sistema.

4.3. Desarrollo mediante Lógica programable

El Diseño jerárquico de la Lógica programable permite proyectar diseños extensos separándolos en bloques, como lo presentamos en la Figura 3.4 en el nivel superior se encuentra el programa *Top Level* que se encarga de realizar el enlace entre los bloques

individuales y así hasta llegar al nivel más bajo que incluso puede llegar al nivel de estructuras lógicas básicas.

Los bloques se diseñan y programan como entidades individuales y recibe el nombre de componentes, los componentes constan de entidad y arquitectura y representan objetos físicos, por lo tanto se pueden utilizar en otros diseños. En la Figura 4.7 podemos observar cómo se integran los componentes en el Diseño jerárquico, las entradas y salidas al sistema se declaran en el programa de Alto Nivel, los componentes se comunican entre ellos por medio de señales, el enlace entre componentes lo realiza el programa *Top Level* mediante mapeo directo que asocia y sincroniza las entradas/salidas del sistema con las de los componentes individuales, así como las señales que se deben declarar para el manejo de aquellas que no tienen comunicación con el exterior del sistema.

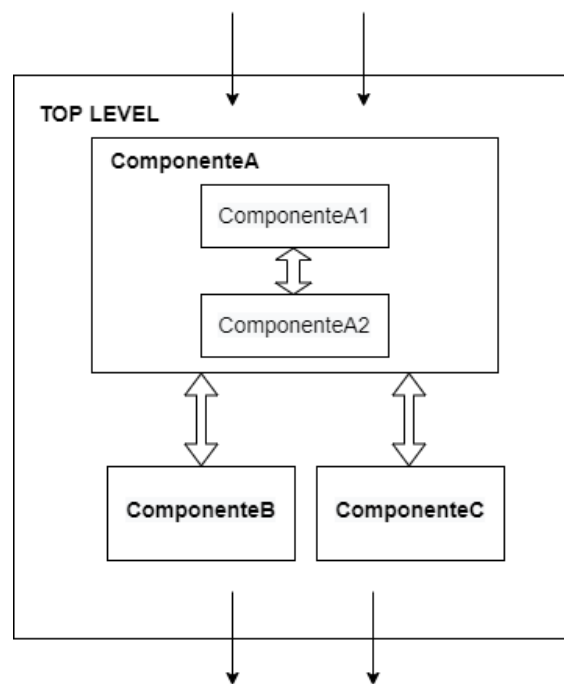


Figura 4.7. Arquitectura del Diseño jerárquico.

Entonces basado en el modelado orientado a objetos descrito con antelación y que aplicado al Diseño jerárquico de la Lógica programable iniciamos con el desarrollo.

Primeramente se plantea y desarrolla la función principal del sistema que se basa en el diseño de un sistema electrónico de instrumentación que extrae y determina la información de la variable determinada: Desplazamiento relativo de entrepiso.

Segundamente se desarrolla el sistema que se encarga de realizar la evaluación de la variable obtenida y determinar el estado de salud estructural de una estructura modelo.

4.3.1. Sistema Sensor de Desplazamiento Relativo Ultrasónico en Péndulo SSSDRUP

Iniciamos, como se observa y describe en la sección de modelado con la obtención de los datos para el cálculo de la variable identificada, con lo que se plantea desarrollar el bloque principal: Sistema Sensor de Desplazamiento Relativo Ultrasónico en Péndulo (SSDRUP) en el cual se calcula la medida desplazamiento relativo de entrepiso, para esto se diseñó un sistema que integra una red de sensores ultrasónicos *HC-SR04* de alta capacidad colocados suspendidos en el techo del entrepiso para obtener la medida de desplazamiento relativo en puntos específicos de una edificación, los sensores son los elementos capaces de obtener el parámetro de una señal física que se acondiciona en una señal conveniente para su interpretación, y así integrar estas a un sistema de adquisición de datos (en inglés *data acquisition*, DAQ) para adecuar las señales obtenidas en datos que podamos procesar en la etapa de análisis.

Entonces se diseñan los sistemas digitales para conseguir un primer objetivo:

Determinar la medida de desplazamiento lateral en un plano mediante la utilización de sensores ultrasónicos.

Como ya hemos explicado, ajustamos el modelado orientado a objetos al Diseño jerárquico de la Lógica programable, para implementar las fases planteadas se empleó software especializado, módulos y laboratorios de instrumentación:

- Software: *Intel Quartus Prime Lite Edition 13.0sp1*
- Laboratorio de instrumentación con *CPLD MAX II EPM240*
- Laboratorio de instrumentación con FPGA *CYCLONE II EP2C5T144C8*
- Módulo sensor ultrasónico *SEN-HCSR04*

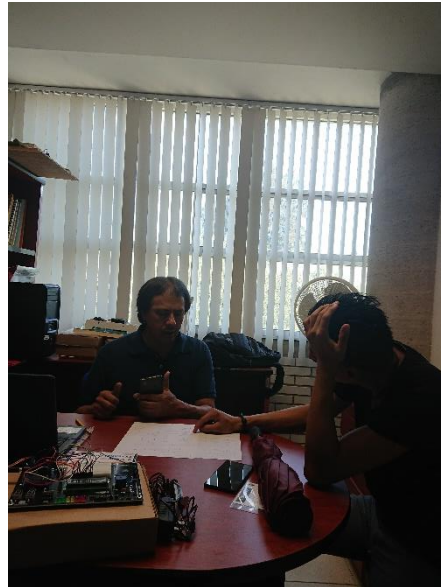
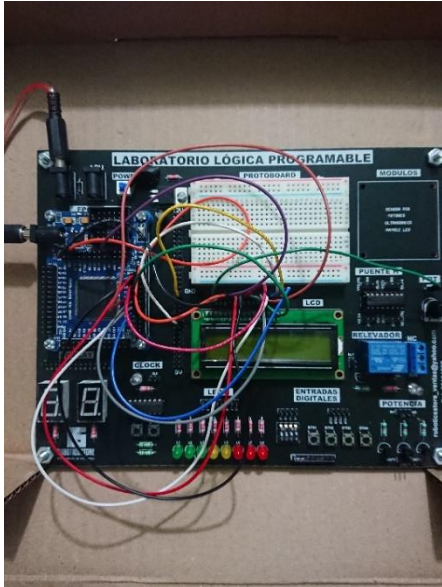


Figura 4.8. Laboratorios de instrumentación.

Y se diseña el sistema capaz de visualizar los datos de las medidas recolectadas por los sensores ultrasónicos en pantalla LCD del laboratorio de instrumentación, con lecturas correctas de hasta cuatro metros de distancia.

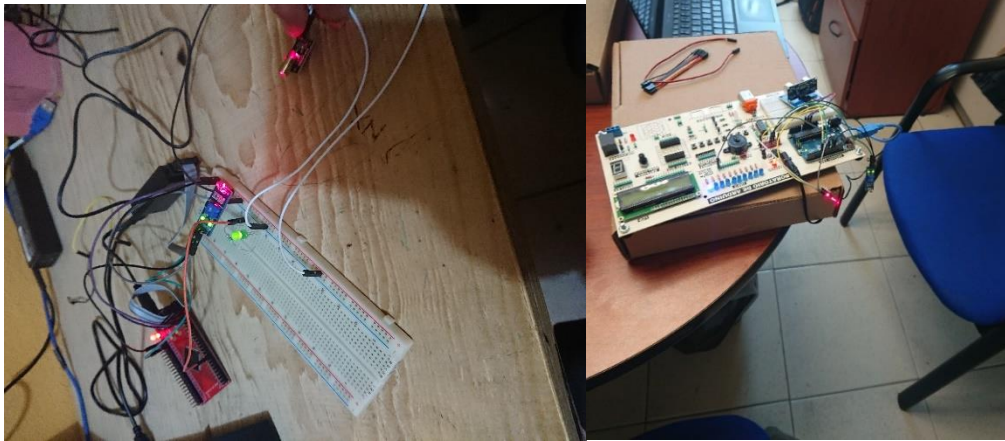


Figura 4.9. Implementación del sistema de medición de desplazamiento lateral.

4.3.1.1. Medición de desplazamiento relativo de entrepiso de un punto

Ahora que ya se cuenta con el sistema de medición de desplazamiento lateral se plantea adicionar un módulo que se encargará de calcular el desplazamiento relativo de entrepiso, en el esquema de la Figura 4.6 se identifica como el módulo *Calcula_Desp*.

Para realizar esto debemos identificar los elementos que se deben considerar para realizar dicho cálculo.

Primeramente, sabemos que la estructura de un edificio puede sufrir desplazamientos horizontales o laterales. Como ya revisamos, en el diseño sísmico un objetivo fundamental consiste en limitar los desplazamientos horizontales en la estructura. El índice más importante para la determinación de la magnitud de los posibles daños es la distorsión de entrepiso γ , o sea el desplazamiento relativo entre dos pisos sucesivos Δ , dividido entre la altura de entrepiso H .

$$\gamma = \frac{\Delta}{H} \quad (1)$$

En la *Ecuación 1* se puede observar que la distorsión de entrepiso es un parámetro adimensional, pues tanto Δ como H tienen dimensiones de longitud, y se puede usar en términos porcentuales.

En la Figura 4.10 podemos identificar los elementos que se deben considerar para obtener la medida de distorsión de entrepiso en un punto, la altura H es la medida entre pisos contiguos la cual es conocida y como tal se verifica entonces para tomarla como un parámetro conocido, dicho dato según el esquema lo podemos ubicar paralelo al eje de las ordenadas, así mismo ubicamos a Δ perpendicular a H .

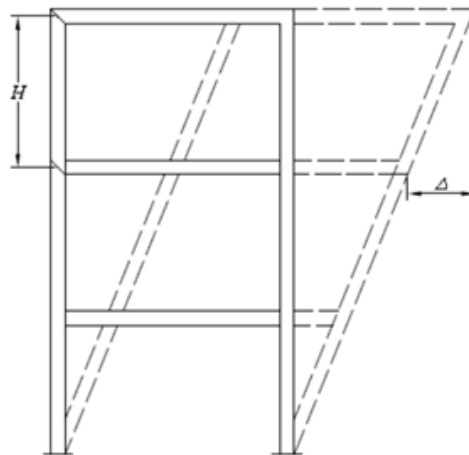


Figura 4.10. Elementos para calcular la distorsión de entrepiso.

Para obtener la medida del desplazamiento relativo de entrepiso Δ se plantea colocar un sensor ultrasónico suspendido en el techo a una distancia X del elemento estructural vertical limitante ubicada en la entrada de la fuerza lateral y a una distancia Y del techo del entrepiso (ver Figura 4.11), la razón de suspender el sensor en el techo del nivel a analizar es generar un efecto de péndulo cuando la inclinación se produzca, al realizar la proyección de la inclinación y trasladamos las referencias de los ejes coordenados podemos observar que

dicha proyección describe dos triángulos, siendo la base del triángulo del lado derecho identificado como Δ que representa la medida del desplazamiento relativo de entrepiso.

Al trazar una línea paralela a la base del triángulo del lado derecho se contendrían a su vez dos triángulos semejantes que cumplen con el primer teorema de Tales, entonces, empleando las relaciones de semejanza podemos obtener el valor de sus bases, recordando que la base del triángulo original del lado derecho es Δ . Se puede observar también que las líneas de las medidas M y m son las que describen las líneas paralelas a las bases y con esto se describen los triángulos semejantes.

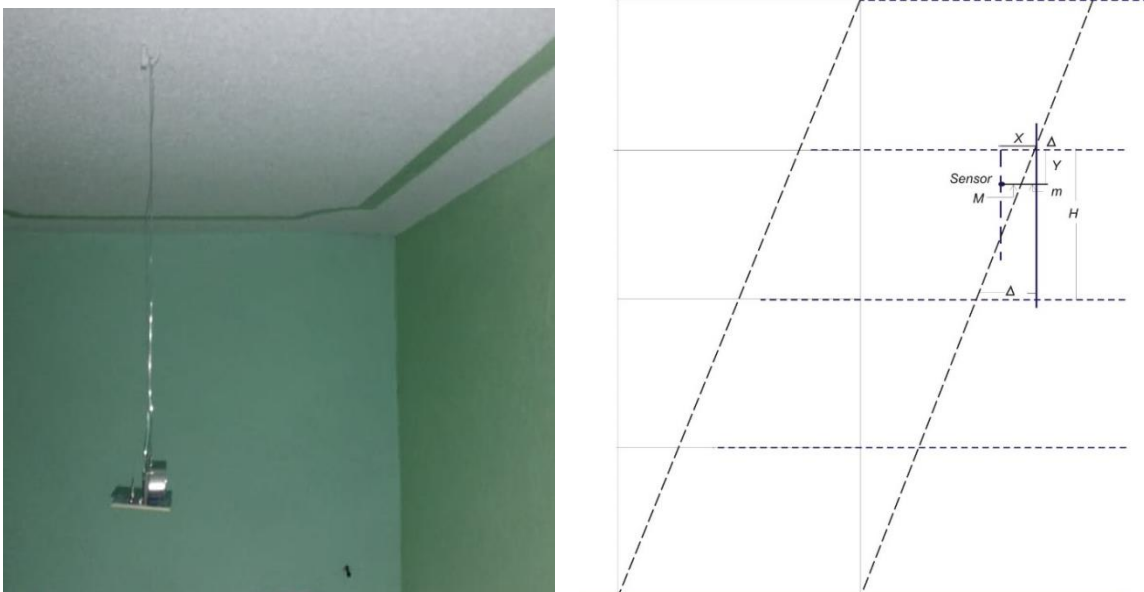


Figura 4.11. Ubicación del sensor.

Para el triángulo del lado derecho y como ya se explicó podemos basarnos en el primer teorema de Tales y plantear una relación para triángulos semejantes:

$$\frac{AB}{AB'} = \frac{AC}{AC'} = \frac{BC}{B'C'} \quad (2)$$

Identificando elementos tenemos que:

$$AB = H \quad (3)$$

$$B'C' = m \quad (4)$$

$$m = X-M \quad (5)$$

$$BC = \Delta \quad (6)$$

Entonces de la *Ecuación 2* tomamos:

$$\frac{AB}{AB'} = \frac{BC}{B'C'} \quad (7)$$

Sustituyendo obtenemos:

$$\frac{H}{AB'} = \frac{\Delta}{m} \quad (8)$$

Despejamos para Δ y obtenemos la expresión:

$$\Delta = \frac{Hm}{AB'} \quad (9)$$

Y como ya lo habíamos puntualizado Δ nos proporcionará la medida de desplazamiento relativo de entrepiso.

4.3.1.2. Medición de desplazamiento relativo de entrepiso de varios puntos

El objetivo de esta implementación es abordar los medios por los cuales los criterios de desempeño, que se ajustan al estado límite apropiado, pueden ejecutarse racionalmente. Por lo tanto, la atención se centra en los desplazamientos inducidos por diversas fuerzas en edificios con la resistencia adecuada.

Para obtener la medida del desplazamiento relativo del entrepiso de una estructura modelo de seis niveles, como se muestra en el diagrama de módulos (Figura 4.6), el módulo *Adquiere* debe implementar los mecanismos para leer los datos entregados por los sensores y traducirlos en una distancia. Para lograr esto, se implementa un sistema con seis sensores, uno en cada entrepiso, para ello se coloca un sensor ultrasónico *HC-SR04* suspendido del techo del entrepiso a una distancia de 50cm del muro límite ubicado en la entrada de la fuerza lateral y a 45cm del techo del entrepiso, el motivo de suspender el sensor en el techo del nivel a analizar es generar un efecto péndulo cuando se produce la inclinación.

En la Figura 4.12 se observan los parámetros a considerar: medida obtenida por el sensor M_i , medida de la base del triángulo semejante que se genera en el triángulo del lado derecho m_i , desplazamiento relativo de entrepiso Δ_i y la altura del entrepiso H_i , que es un dato conocido. Cuando la estructura sufre una inclinación, los sensores para M_i por efecto de la gravedad permanecerán en la vertical original del eje de las ordenadas, la pared del entrepiso seguirá la inclinación del entrepiso, con lo cual al realizar la proyección de la inclinación debemos considerar que las referencias de los ejes coordenados se trasladan y que dicha proyección describe dos triángulos, podemos proponer que ambos triángulos contienen dos triángulos semejantes que cumplirían con el primer teorema de Tales, luego, aplicando las relaciones de semejanza para triángulos semejantes podemos obtener el valor de las bases, nos interesa el triángulo del lado derecho ya que, como lo representamos en el diagrama, lo identificamos como el desplazamiento relativo de entrepiso Δ_i . La medida M_i que obtiene cada sensor varía sufriendo una disminución que se utilizará para que, mediante la relación de similitud aplicable al caso, se pueda obtener la longitud de la base del triángulo de la derecha, que,

como se indica, corresponde al desplazamiento relativo de entrepiso Δi . Con estos datos se calcula la distorsión de entrepiso de cada nivel y se determina cuál de las medidas es la mayor para entrar en la evaluación de estado límite.

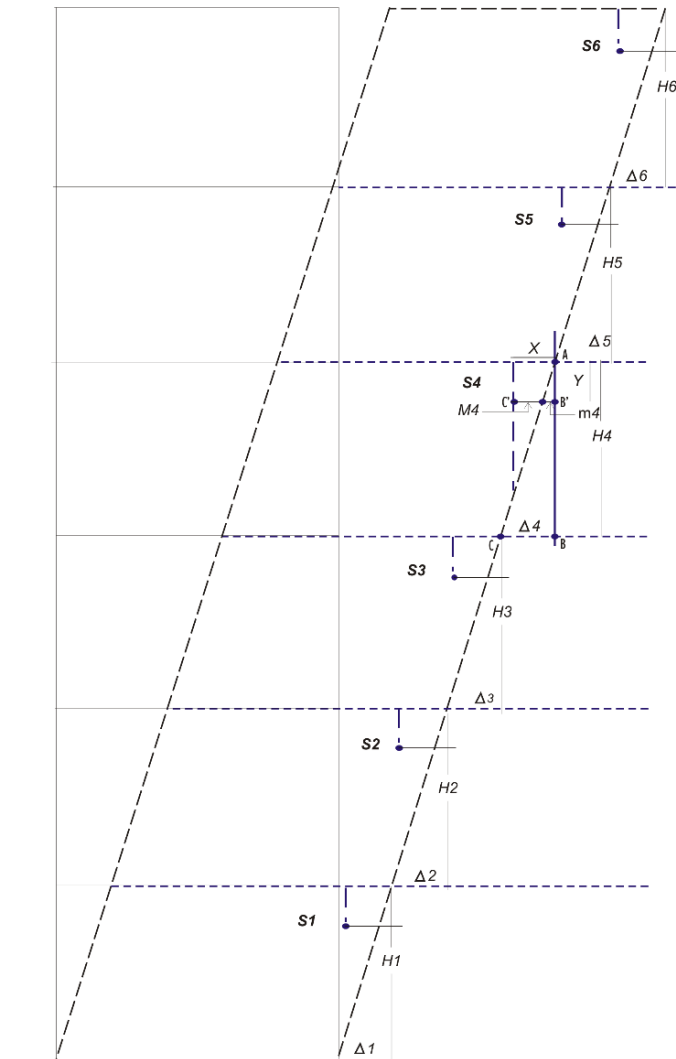


Figura 4.12. Medida de los desplazamientos relativos de una estructura.

La estructura modelo se construyó para la experimentación en esta investigación, para alimentar los parámetros al sistema y para realizar las evaluaciones se considera una sección del edificio E (Extensión Universitaria) de la Facultad de Estudios Superiores Aragón de la UNAM.

Parámetros que considerar para una estructura modelo en la ubicación seleccionada:

Niveles:	6
Altura de cada nivel (H):	3.5m
Altura total de la edificación:	21m
Zona geotécnica:	III Lacustre
Clasificación de la estructura:	B2

Ahora, para evaluar retomamos que debemos considerar que las magnitudes de desplazamiento medio permisible no deben exceder las que se consideran aceptables para un edificio de varios niveles, típicamente del 2 al 2.5% de la altura H (Paulay, 2001).

El caso práctico no es de aplicación general, se considera una estructura con geometría rectangular bien definida y para lo cual se construyó el modelo de una estructura de seis niveles con altura de cada entrepiso $H_i = 3.5$ m, con vértices flexibles en cada nivel para la generar inclinaciones de manera independiente. La finalidad de utilizar este modelo es la recolección de medidas para la obtención del desplazamiento relativo de entrepiso, siendo que los esfuerzos analizados son de carácter unidimensional, ya que, si fuesen de otra manera, habría que realizar un análisis general con esfuerzos de carácter vectorial y que por lo tanto podrían provocar desplazamientos en más de una dirección, modos de vibración, etcétera. Entonces, el análisis queda acotado al esfuerzo unidimensional en la estructura rectangular bien definida y libre de vibraciones.

Con esta consideración ahora podemos verificar los parámetros obtenidos con el modelo utilizado.

$$2.0\% \text{ de } H: \quad 0.07 \quad (10)$$

$$2.5\% \text{ de } H: \quad 0.0875 \quad (11)$$

Tomamos la *Ecuación 1* y planteamos para el 2.0% de H :

$$\gamma = \frac{\Delta}{H} \leq 0.02H \quad (12)$$

Para el caso:

$$0.02H = 0.07m \quad (13)$$

Entonces:

$$\frac{\Delta}{H} \leq 0.07 \quad (14)$$

Obtenemos el máximo desplazamiento medio permisible de la estructura completa, empleando el desplazamiento medio multiplicado por el número de niveles y obtenemos el desplazamiento relativo de entrepiso del estado límite inferior:

$$\Delta \leq 0.42m = 42cm \quad (15)$$

Correspondientemente para el 2.5% de H planteamos y obtenemos el desplazamiento relativo de entrepiso del estado límite superior:

$$\Delta \leq 0.525m = 52.5cm \quad (16)$$

4.3.1.3. Implementación del sistema de medición

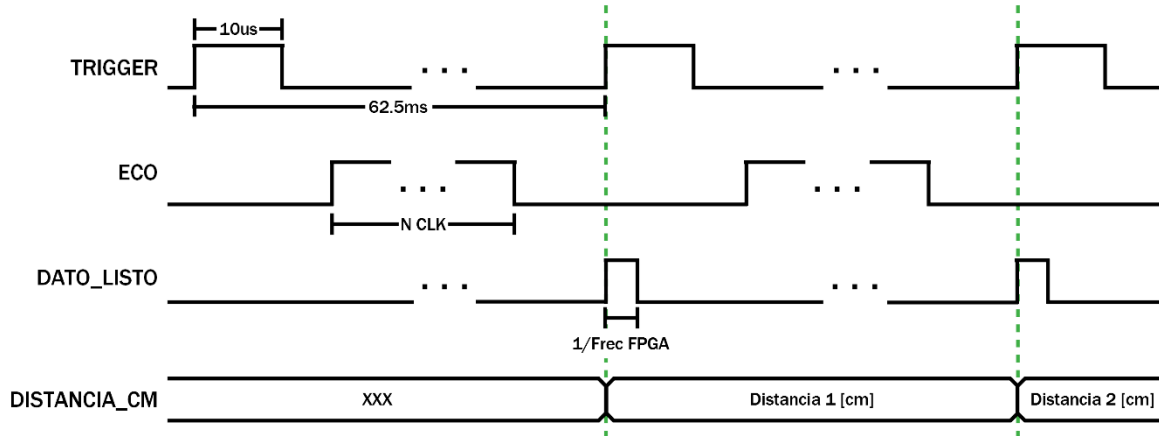
Entrada del diseño. Se introduce el diseño de SSDRUP. Partimos de la representación esquemática del circuito que conforma el bloque *Entrepiso* del diagrama de bloques del sistema (ver Figura 4.1) y que se encarga de obtener las medidas de desplazamiento relativo del entrepiso de una estructura modelo de 6 niveles, la solución del sistema se define mediante programación VHDL, el programa contiene los datos que le permitirán al

compilador sintetizar la lógica requerida como lo marcan los diagramas de estados, de módulos, de objetos y de clases, es decir, procesa y traduce el archivo fuente y minimiza las ecuaciones para la FPGA *CYCLONE II EP2C5T144C8*. Una vez finalizada la compilación se simula el diseño y aquí es posible someterlo a un conjunto de entradas con las que se puede verificar que la solución funciona correctamente antes de ingresarla en la FPGA.

Entonces, aplicamos el modelado Orientado a Objetos realizado a la técnica Diseño jerárquico de la Lógica programable y partimos del diseño de los elementos necesarios para ejecutar el diseño robusto en su conjunto planteando una descripción estructural, para ello se procedió a programar las clases *MedidorDesplazamiento* y *PanelControl* como lo marca el diagrama de clases diseñando (ver Figura 4.3), y ajustado al Diseño jerárquico iniciamos programando las entidades individuales que conformarán las clases arriba mencionadas:

- *DIV_SENS*. Realiza divisiones mediante sumatorias, el algoritmo cuenta el número de iteraciones que fueron necesarias para que el divisor sea igual o mayor al dividendo.
- *ADQUIERE*. Controla un sensor ultrasónico *HC-SR04*. Se utiliza el componente que genera la división y obtiene los valores de la distancia. Utiliza el método de aproximación mediante sumatorias y comparaciones.
 - a) Se genera un pulso de disparo (*trigger*) en el *HC-SR04* con un tiempo de $10\mu\text{s}$ en nivel lógico 1 con un periodo de 62.5ms , el pulso retorna al sensor en el receptor denominado *eco* y el tiempo total de ida y regreso del tren de pulsos se adquiere para obtener la distancia entre el sensor y el objeto. El resultado aparecerá en la salida *DIST_CM* y se activará *D_LISTO* un ciclo de reloj.

El diagrama de tiempos es el siguiente:



- b) Se detecta el regreso del pulso y se responde con un pulso en *ECO* este tiempo se mide y se obtiene un valor *ESCALA_TOTAL* para después convertir ese valor en tiempo de duración *TIEMPO_MICROSEGUNDOS*. Para ello se hace un muestreo de la señal a la frecuencia de reloj de la FPGA *CYCLONE II EP2C5T144C8* (50 MHz) obteniendo N número de flancos de subida (*N_CLK*) el cual se divide entre una constante llamada *VAL_FREQ*, el valor de esta constante es el de la frecuencia del reloj de la FPGA y se utiliza para obtener el tiempo de duración del *ECO* en microsegundos.

$$TIEMPO_MICROSEGUNDOS = N_CLK / VAL_FREC$$

- c) Finalmente se hace la conversión de tiempo a distancia cuya fórmula se obtuvo en la hoja de especificaciones del sensor.

Se divide ese tiempo entre 58 para obtener la distancia en centímetros.

$$DIST_CM = TIEMPO_MICROSEGUNDOS / 58$$

- *CODIFICADOR*. Realiza la conversión para interpretar la medida de centímetros *DIST_CM* a *UNIDADES* y *DECIMALES*, separando cada elemento en 4 bits.
- *PROCESADOR_LCD*. Control a 4 bits de la pantalla LCD para visualizar los resultados de las medidas de los seis sensores en cm.
- Creación del paquete de componentes: *COMPONENTES*. Contiene los puertos de las entidades individuales y que se agrega a la biblioteca *Work* en el programa de alto nivel para que sus componentes estén disponibles.
- Diseño del programa de alto nivel: *TOP*. Programa que vincula todas las entidades mapeando las señales y hace que el sistema funcione como un todo.

Síntesis de diseño. Usando la herramienta *EDA Synthesis*, la plataforma *Intel Quartus II* sintetiza el circuito en una lista de conexiones que proporciona los elementos lógicos necesarios para realizar el circuito y las conexiones entre LEs. En la Figura 4.13 se muestra la síntesis del proyecto reflejada en un diagrama de bloques generado con la herramienta *RTL Viewer* donde podemos revisar cómo el programa de alto nivel vincula todas las entidades individuales anteriormente descritas.

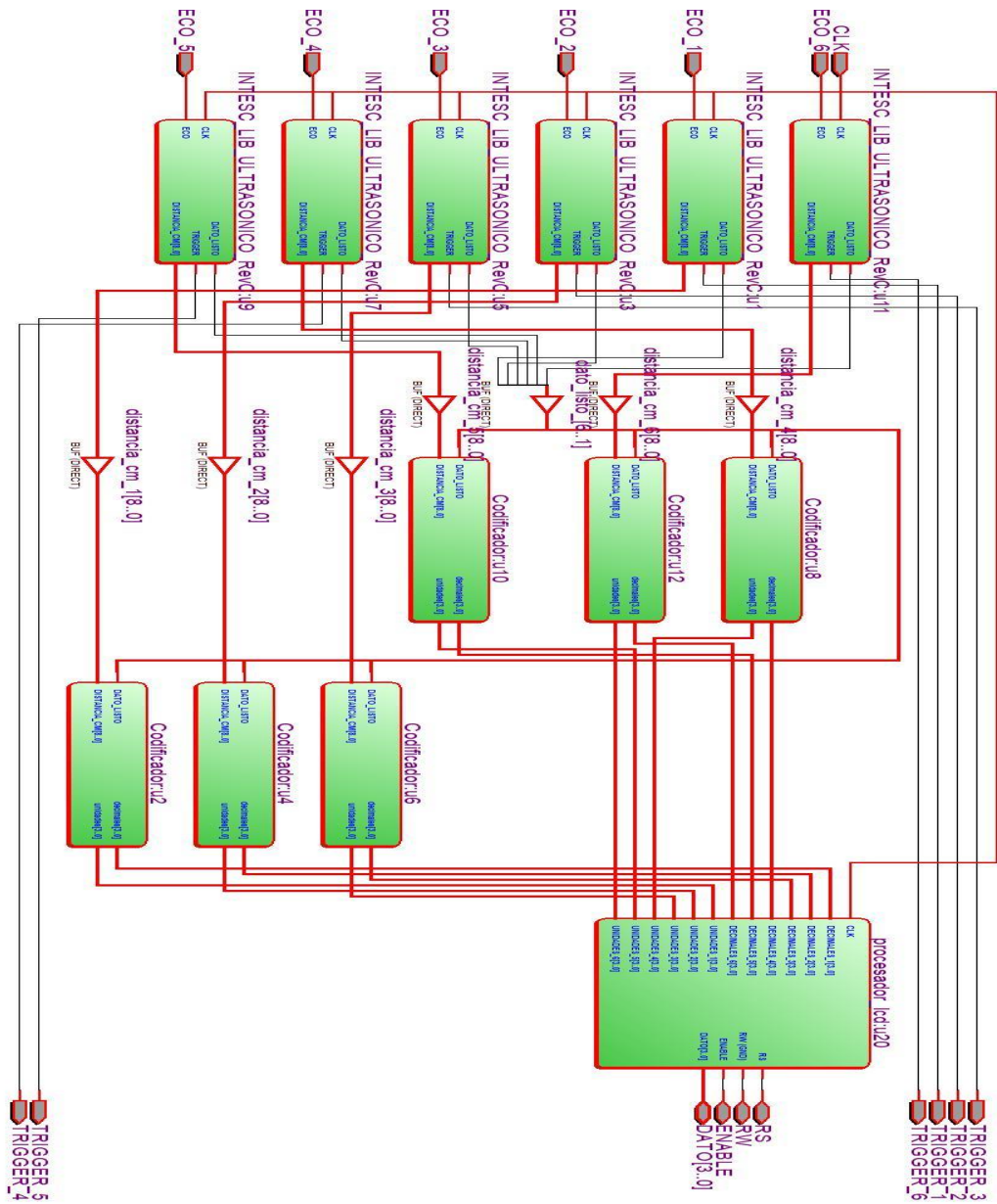


Figura 4.13. Esquema por bloques del sistema de medición.
(Generado con *RTL Viewer, Intel Quartus II*)

Montaje del diseño. La herramienta *Fitter* de *Intel Quartus II* determina la mejor ubicación de los LEs, se define en la lista de conexiones de LEs en este caso para el chip FPGA *CYCLONE II EP2C5T144C8*; También elige cables de enrutamiento en chip para realizar las conexiones necesarias entre los LEs. Entonces se determina el montaje físico de los pines convenientes para dirigir de la mejor ubicación determinada por *Fitter* a la ubicación física que se desea en la FPGA.

Programación y verificación en el dispositivo. Mediante la herramienta *programmer* de *Intel Quartus II*, la lista de conexiones de LEs se convierte en un archivo de configuración que contiene una serie de bits que configuran las conexiones y la lógica para la FPGA, dicho archivo se transfiere a la FPGA para que esta funcione de acuerdo con el diseño.

El sistema se implementa a través de la integración cableada de los sensores en el módulo *Adquiere*, los módulos *Calcula_Desp*, *Codificador* y *ProcesadorLCD*, el diseño es embebido en la FPGA y conectamos con el exterior a las señales internas, entradas y salidas para la verificación de funcionalidad según las especificaciones del diseño señalado en el diagrama de procesos del sistema (ver Figura 4.2) donde establece el hardware que constituye el sistema electrónico, siendo que *Embebido* es el procesador central que se encarga de ejecutar los programas diseñados para la funcionalidad descrita para SDRUP, ya que se encarga de recibir los datos provenientes de los dispositivos *Nivel(X)*, los evalúa y envía al dispositivo *PantallaLCD* para su despliegue.

4.3.2. Sistema basado en reglas aplicado para SHM

Los sistemas basados en reglas (SBR) son eficientes para tratar problemas complejos que por lo general están gobernados por reglas deterministas. Estos sistemas se integran con una base de conocimiento y un conjunto de reglas que definen el problema, así como de un motor de

inferencia que obtiene las conclusiones aplicando la lógica clásica a estas reglas. Una regla es una proposición lógica que relaciona dos o más elementos y consta de dos partes, la premisa y la conclusión. Cada una de estas partes consiste en una expresión lógica con una o más afirmaciones objeto-valor conectadas mediante operadores lógicos. Para representar una regla normalmente se escribe con el siguiente formato: “*Si premisa, entonces conclusión*”.

Planteamos entonces obtener deducciones lógicas a partir de proposiciones. El conocimiento se presentará mediante reglas de la forma *IF- THEN*:

IF x1 is A1 THEN Y is B

Entonces, una vez que hemos logrado diseñar y verificar la funcionalidad del Sistema Sensor de Desplazamiento Relativo Ultrasónico en Péndulo (SSDRUP) desarrollado en la primera fase de esta investigación, y atendiendo lo establecido en el modelado del sistema en esta segunda fase se aumentan las capacidades del sistema SSDRUP dotándolo de una etapa de análisis de los datos obtenidos por medio de un Sistema Basado en Reglas (SBR) que se encargará de inferir y determinar la acción de las salidas hacia los actuadores, esto en base a reglas de inferencia basadas en la condición lógica límite: la medida de desplazamiento medio permisible será entre el 2.0 y 2.5 % de H , a partir de esta premisa se construye la tabla del motor de inferencia del sistema y a partir de esto el sistema reaccionará de una manera predeterminada para activar los actuadores previstos.

La variable de entrada corresponderá a la entregada por la fase final de SSDRUP y que corresponde a la mayor de las medidas de desplazamiento relativo, y las variables de salida corresponderán a las señales de salida para el control de los actuadores.

En el diagrama de objetos del sistema (ver Figura 4.4) indica que el objeto *evaluadorEstabilidad* recibe *MedidaDesplazamientoMayor* del objeto *medidorDesplazamiento* de SSDRUP y asigna los valores de estado de los actuadores al objeto *actuador*.

Para diseñar *evaluadorEstabilidad* implementamos un Sistema Basado en Reglas (SBR) el cual se ha establecido que la representación del conocimiento se realiza mediante reglas *if-then* y un motor de inferencia.

4.3.2.1. Metodología de desarrollo del SBR

En una primera etapa recibe el valor de la medida de desplazamiento relativo cuya magnitud es la mayor de las seis que se determinan por *medidorDesplazamiento* de SDRUP, esta será la variable de entrada al SBR, el análisis se realiza en base a los principios de la lógica difusa en el cual primeramente asignamos un universo de discurso en el rango deseado en este caso de 0 a 70cm ya que 0cm representa el estado inicial y de calibración basado en la perpendicular del edificio y su base en el estado inicial y que se obtiene con la suspensión del sensor en la parte superior del entresuelo y que por efecto de la fuerza de gravedad adquiere de manera natural esa posición, esto es la perpendicular con la base del edificio; El rango de 70cm lo consideramos valor suficientemente permisible ya que de los cálculos obtenidos en la *Ecuación 15* de 42cm y en la *Ecuación 16* de 52.5cm, por lo que determinamos fijar el límite inferior en 39.0cm y el límite superior en 53.0cm, lo cual significa que una medida superior a los 53.0cm representaría que la estructura se encontraría en serio peligro de desplome, por lo cual el rango que planteamos es más que suficiente para permitir que el sistema de inferencia pueda funcionar en un mayor rango y no actuar inmediatamente se exceda los límites determinados.

Con esta consideración determinamos emplear cuatro funciones de membresía: dos trapezoides y dos triangulares, para dar significado a cada variable lingüística. Cada función de membresía identifica el rango de los valores de entrada que corresponden a una variable lingüística, las funciones de membresía mapean a los datos presentes para determinar el grado de membresía. Esto es, los valores físicos de la variable de entrada que es la mayor de las medidas obtenidas por los sensores se convierten en valores lingüísticos.

Utilizamos el editor de variables del software *fuzzyTECH 6.03 IA-S7* el cual permite la definición gráfica de las funciones de pertenencia de cada término.

Definición de las variables lingüísticas.

Los siguientes elementos pertenecen a la definición de la variable lingüística:

1. Número: cinco y Nombre de términos: *DESP_REL*, *ESTABLE*, *REGULAR*, *LIMITE* y *PELIGRO*.
2. Función de membresía de cada término: *ESTABLE* función trapezoide, *REGULAR* función triangular, *LIMITE* función triangular y *PELIGRO* función trapezoide.
3. La variable base de la variable lingüística: Desplazamiento relativo *DESP_REL*. El rango de definición de la variable base: 0 a 70cm.

Aplicamos lo que hemos determinado y alimentamos el software *fuzzyTECH*, en la Figura 4.14 podemos verificar el diseño e identificar cuatro funciones de membresía empleadas que permiten que los rangos límite calculados para el caso práctico no activen el funcionar de los actuadores ya que no será un sistema que active al alcanzar uno de los límites; esto es, el manejar dos funciones de membresía triangulares para los términos *REGULAR* y *LIMITE* permite manejar valores entre 32.0cm y 53.0cm para identificar el valor de membresía de un valor físico de la variable de entrada *DESP_REL* que corresponde a la medida de desplazamiento relativo y con esto poder observar el comportamiento de esta y en este rango se asigne un grado de pertenencia que corresponda a una variable lingüística que nos permita dosificar el funcionar de los actuadores en la fase siguiente.

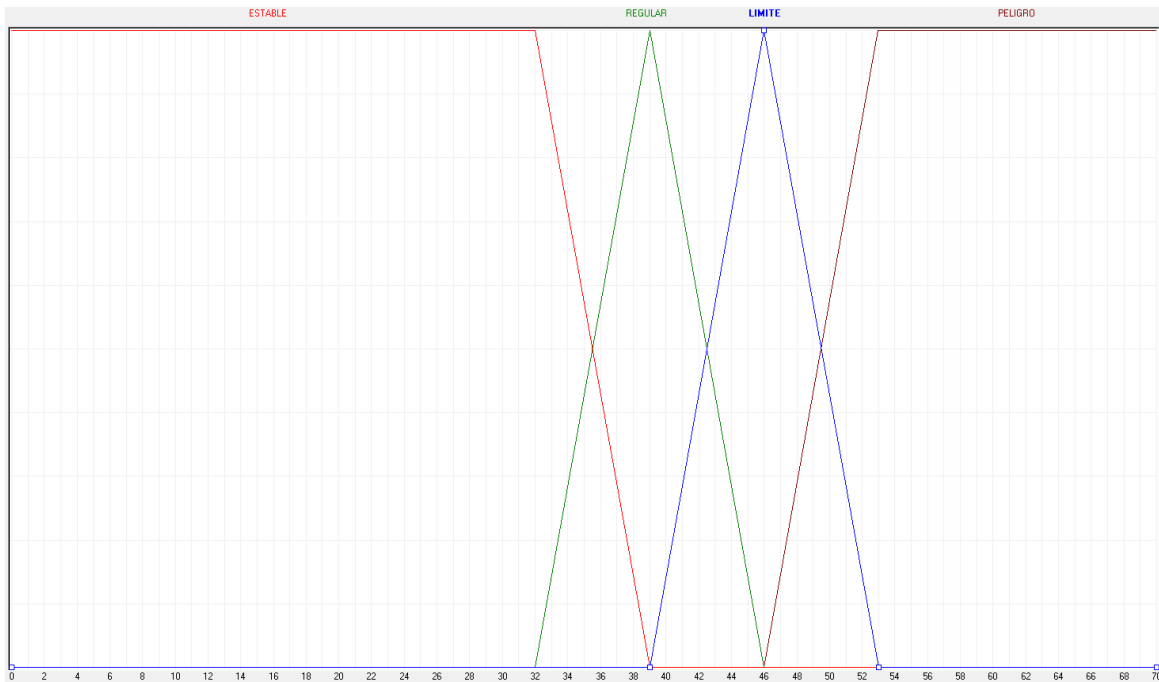


Figura 4.14. Funciones de membresía de la variable de entrada en el rango [0,70].
(Generado con *fuzzyTECH 6.03 IA-S7*)

Entonces las funciones de membresía para la variable de entrada *DESP_REL* que corresponden a cuatro rangos se definen con los términos lingüísticos: *ESTABLE*, *REGULAR*, *LIMITE* y *PELIGRO*, en la Tabla 4.1 mostramos los rangos como queda particionada la variable de entrada, estos rangos se definieron de manera subjetiva para que el comportamiento del sistema al introducir una medida de entrada observe la correcta asignación de membresía a la función en la cual obtuviera el mayor valor.

Tabla 4.1. Rangos de la variable DESP_REL.

Conjunto	Rango (cm)
<i>ESTABLE</i>	0 - 39
<i>REGULAR</i>	32 - 46
<i>LIMITE</i>	39 - 53
<i>PELIGRO</i>	46 - 70

Una vez alimentado y manipulado el software *fuzzyTECH* con los datos determinados, extraemos los rangos correspondientes para cada función de membresía, para describir cada uno de estos empleamos la ecuación de la recta punto pendiente y obtenemos:

$$\left\{ \begin{array}{lll}
 0 < X \leq 32 & \{Y = 10 & \text{Trapecio} \\
 32 < X \leq 39 & \begin{cases} Y = -1.428X + 55.714 \\ Y = 1.428X - 45.714 \end{cases} & \begin{array}{l} \text{Trapecio} \\ \text{Triángulo} \end{array} \\
 39 < X \leq 46 & \begin{cases} Y = -1.428X + 65.714 \\ Y = 1.428X - 55.714 \end{cases} & \begin{array}{l} \text{Triángulo} \\ \text{Triángulo} \end{array} \\
 46 < X \leq 53 & \begin{cases} Y = -1.428X - 75.714 \\ Y = 1.428X - 65.714 \end{cases} & \begin{array}{l} \text{Triángulo} \\ \text{Trapecio} \end{array} \\
 53 < X & \{Y = 10 & \text{Trapecio}
 \end{array} \right. \quad (17)$$

En la Figura 4.15 se muestra el diagrama de flujo para el funcionamiento de esta etapa.

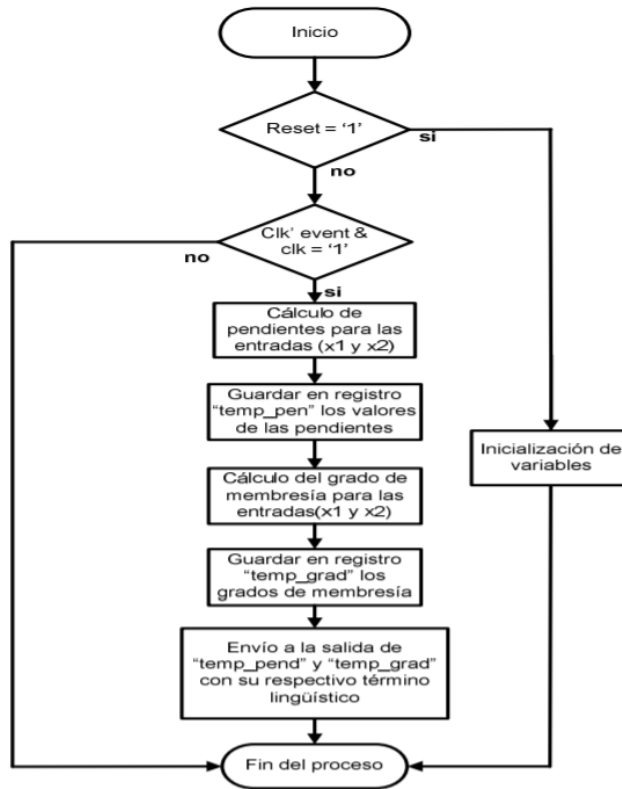


Figura 4.15. Diagrama de flujo de la primera etapa.

En la segunda etapa Razonamiento, un proceso de inferencia determina la salida más adecuada del sistema a partir de dos implicaciones, por un lado, los datos de entrada y por otro la base de conocimiento.

La inferencia es un cálculo que consta de dos pasos principales: agregación y conclusión.

Nos permitirá obtener deducciones lógicas a partir de proposiciones. El conocimiento se presenta mediante reglas de la forma *IF- THEN*:

IF X1 is A1 THEN Y is B and Z is C and W is D

Entonces por ejemplo para nuestro caso:

IF DESP_REL es REGULAR THEN A_ACUSTICO es APAGADO and A_MENSAJE es PRECAUCION and A_VISIBLE es PRECAUCION

El comportamiento real del sistema se define en las reglas individuales del sistema basado en reglas. Para crear el prototipo de un conjunto apropiado de reglas, se comienza por crear reglas que representen estrategias de controlador inequívocas en puntos de operación específicos. Una vez que se han establecido estas reglas, se puede proceder a la construcción paso a paso del conjunto de reglas, ver Tabla 4.2 donde se presentan las cuatro reglas que se establecieron como suficientes para determinar el comportamiento deseado del sistema, esta determinación se realizó mediante la asignación directa del comportamiento para los actuadores.

Tabla 4.2. Reglas de producción.

<i>DESP_REL</i>	<i>A_VISUAL</i>	<i>A_ACUSTICO</i>	<i>A_MENSAJE</i>
<i>ESTABLE</i>	<i>AVVERDE</i>	<i>APAGA</i>	<i>APAGA</i>
<i>REGULAR</i>	<i>AVAMARILLO</i>	<i>APAGA</i>	<i>AMPRECAUCION</i>
<i>LIMITE</i>	<i>AVAMARILLO</i>	<i>APAGA</i>	<i>AMALERTA</i>
<i>PELIGRO</i>	<i>AVROJO</i>	<i>ALERTA</i>	<i>AMALERTA</i>

En la tercera etapa obtendremos el valor exacto de la salida. Entonces solo necesitamos transformar los valores de membresía que entrega el motor de inferencia, en un valor real para fines prácticos a partir de los consecuentes de las reglas que se hayan activado, es necesario obtener una única acción de control, combinando el resultado propuesto por cada una de ellas.

Para la depuración, verificación y optimización del sistema basados en reglas, utilizamos la herramienta *Debug Interactive* de *fuzzyTECH* con el que comprobamos si el sistema actual tiene una estructura de sistema completa, es decir, al menos una interfaz de entrada y salida, cada una de las cuales contiene una variable con al menos un término. Las variables en las interfaces deben estar conectadas a un bloque de reglas que debe contener al menos una regla. Se procedió a depurar el sistema alimentando manualmente el valor de la entrada y se recorre por completo en el rango de 0cm a 70cm obteniendo para cada valor alimentado el valor que correspondería a las salidas. En la Figura 4.16 se observa también el caso cuando se alimenta la entrada con un valor 37 y se puede observar la reacción del sistema verificando los valores para las salidas: el valor que corresponde a la salida *A_ACUSTICO* es de 3.3 unidades y que corresponde a un valor lingüístico *APAGADO*, el valor que corresponde a la salida *A_VISIBLE* es de cinco unidades y que corresponde a un valor lingüístico *AMARILLO*, y por último, el valor que corresponde a la salida *A_MENSAJE* es de cinco unidades que corresponde a un valor lingüístico *PRECAUCION*.

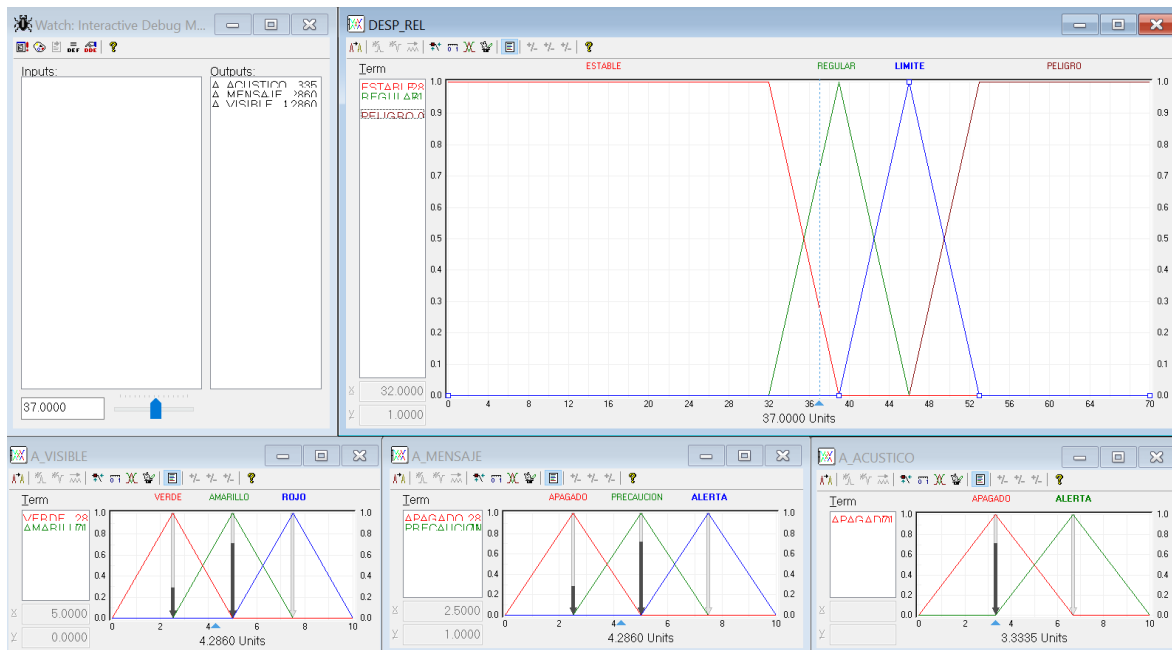


Figura 4.16. Simulación del sistema con entrada de valor 37.
(Generado con *fuzzyTECH 6.03 IA-S7*)

Por último, se empleó la herramienta *3D Plot* de *fuzzyTECH 6.03 IA-S7* que es capaz de mostrar las características de entrada/salida de un sistema o partes de él como un gráfico tridimensional, muestra un plano en el espacio de control. Se trazan dos variables de entrada en los dos ejes horizontales, mientras que el valor de la variable de salida seleccionada se traza en el eje vertical.

A continuación, se muestra la relación de entrada y salida *A_ACUSTICO* en la Figura 4.17, *A_MENSAJE* en la Figura 4.18 y *A_VISIBLE* en la Figura 4.19, expresada por las reglas. En las figuras la superficie curva muestra una relación de entrada y salida altamente no lineal, cuya forma refleja el predominio de cada una de las reglas en su región aplicada y también el conflicto de las reglas en el área traslapada.

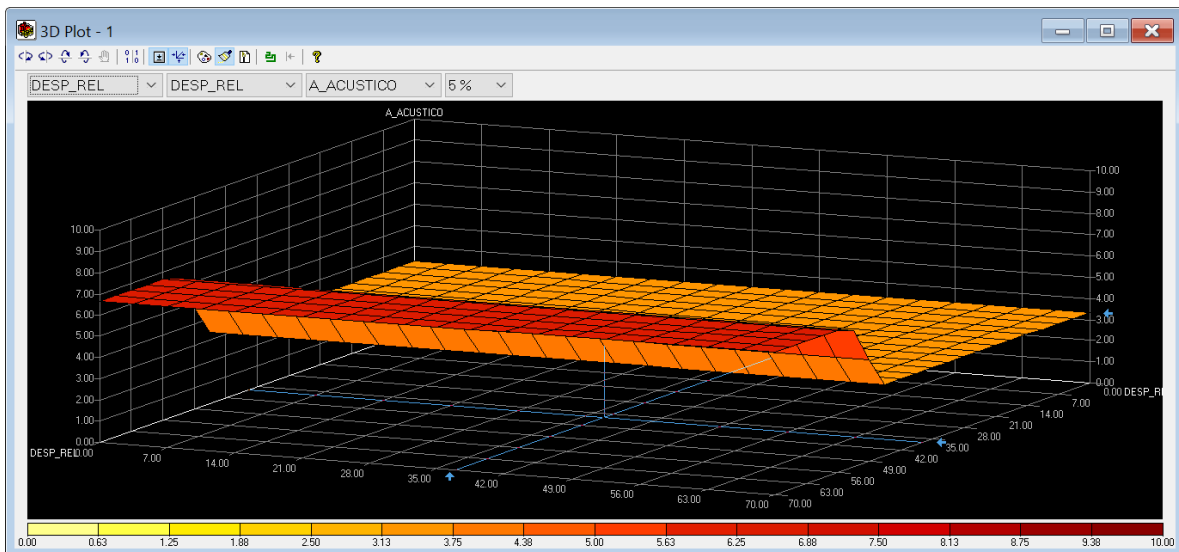


Figura 4.17. Superficie *DESP_REL - A_ACUSTICO*.
(Generado con *fuzzyTECH 6.03 IA-S7*)

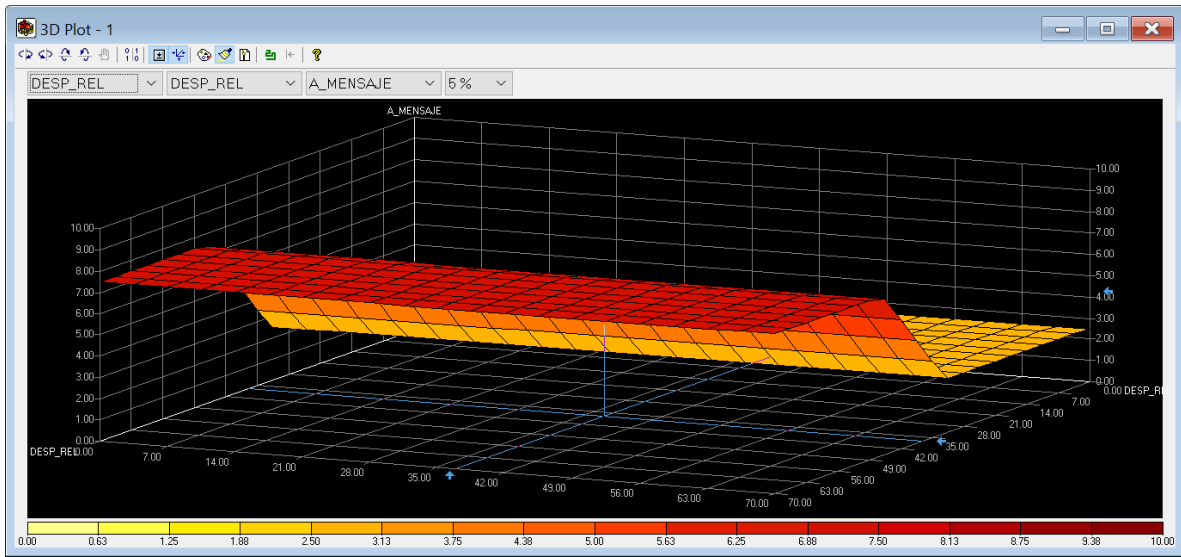


Figura 4.18. Superficie *DESP_REL* - *A_MENSAJE*.
(Generado con *fuzzyTECH 6.03 IA-S7*)

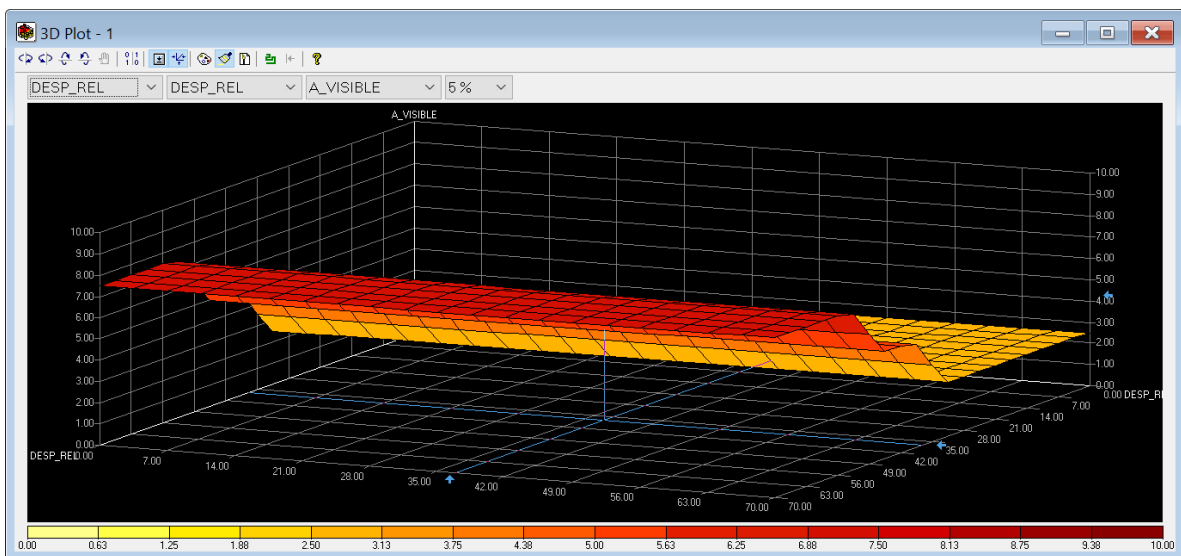


Figura 4.19. Superficie *DESP_REL* - *A_VISIBLE*.
(Generado con *fuzzyTECH 6.03 IA-S7*)

Una vez depurado, verificado y optimizado el sistema podemos agregar mediante programación VHDL los módulos necesarios para implementar el sistema basado en reglas para SSDRUP.

Proponemos proceder de la siguiente manera:

Inicio

Declaración del tipo de dato inferencia (estable, regular, limite, peligro)

Declaración de señales de la arquitectura

Proceso PERTENENCIA

Convierte distancia (BCD) a dis (integer);

Evalua dis

Asigna PendienteNegativa

Asigna PendientePositiva

Asigna PerteneceNegativa

Asigna PertenecePositiva

Fin Evalua

Fin PERTENENCIA

Proceso RAZON

Declaración de variables del proceso

mientras PendienteNegativa < PendientePositiva

resultado = PendientePositiva y pertenece = PertenecePositivo

Si no resultado = PendienteNegativa y pertenece = PerteneceNegativa

Fin Mientras

Fin RAZON

Proceso SALIDA

Si flanco de subida

Evalua Pertenece

Asigna valores a las salidas

Fin Evalua

Fin SALIDA

Algoritmo 1. SBR para SSDRUP.

En la Figura 4.20 se muestra la síntesis del proyecto reflejada en un diagrama de bloques generado con la herramienta *RTL Viewer* de Quartus II, donde podemos revisar cómo el programa de integración de entidades vincula todas las entidades descritas para esta etapa.

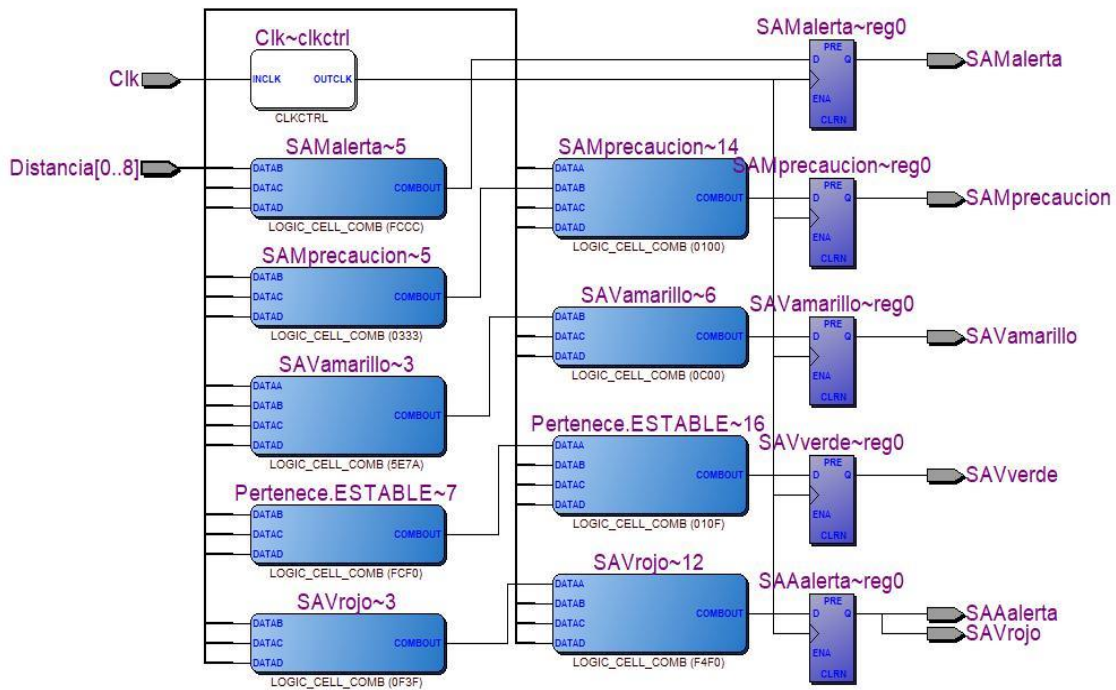


Figura 4.20. Esquema por bloques del sistema SBR.
(Generado con *RTL Viewer*, *Intel Quartus II*)

Finalmente, en la Figura 4.21 se muestra el sistema SBR para SDRUP que como se puede observar en el diagrama de bloques del sistema desarrollado en la etapa de modelado (ver Figura 4.1) se ajusta completamente.

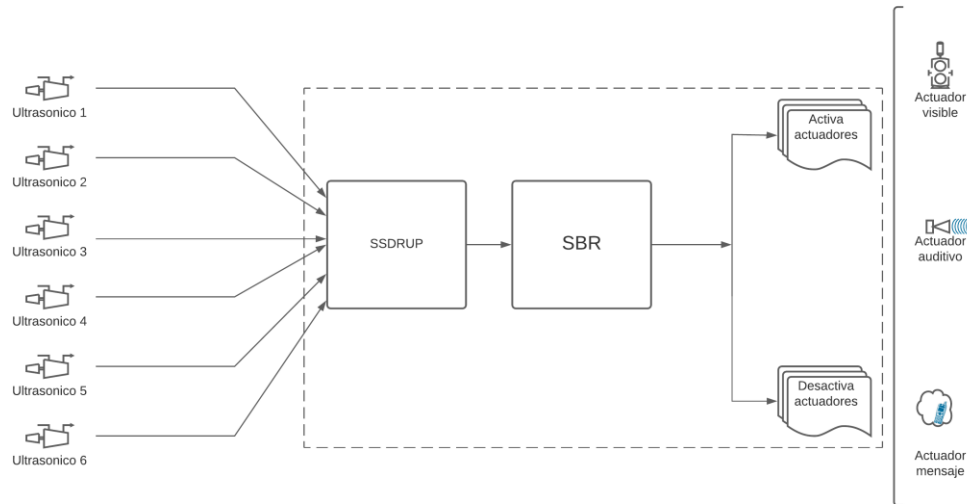


Figura 4.21. Esquema general del sistema.

SBR para SSDRUP embebe el motor de inferencia que se encarga de realizar la evaluación de todas las medidas y establece el estado de salud estructural que se determina con las reglas de inferencia, y genera también las señales que se emitirán para controlar el funcionamiento de los actuadores previstos.

La estructura modelo diseñada para esta fase fue instrumentada con los sensores *HC-SR04* (Figura 4.22) los cuales se conectaron al SBR para SSDRUP embebido en la FPGA *EP2C5T144C8* contenido en el Laboratorio de Lógica programable (Figura 4.23) en el cual se realizó la adaptación de las señales de salida hacia los actuadores.

Reportamos que los sensores no sufrieron rotaciones durante las mediciones, la aproximación de péndulo es para oscilaciones pequeñas, así mismo el ángulo entre el emisor ultrasónico, el punto de contacto en la estructura y el receptor es prácticamente cero. Los sensores conservaron en todo momento la vertical durante las mediciones, de manera que la estructura es la que se mantuvo oscilando sin embargo al emplear el efecto péndulo pueden existir cambios de fase que alteren la medición.

Esto de acuerdo con el diagrama de procesos del sistema (ver Figura 4.2) donde se muestra el hardware del sistema y se observa que *Embebido* es el procesador central que se encarga de ejecutar la funcionalidad establecida en los programas diseñados ya que se encarga de recibir los datos provenientes de los dispositivos *Nivel(X)*, y en esta etapa se evalúan esos datos y resultado de esta evaluación se envían los niveles lógicos asignados a los dispositivos de salida *ActuadorVisible*, *ActuadorAudible* y *ActuadorMensaje* para que se ejecuten las acciones determinadas en esta fase.



Figura 4.22. Instrumentación con sensores *HC-SR04*.

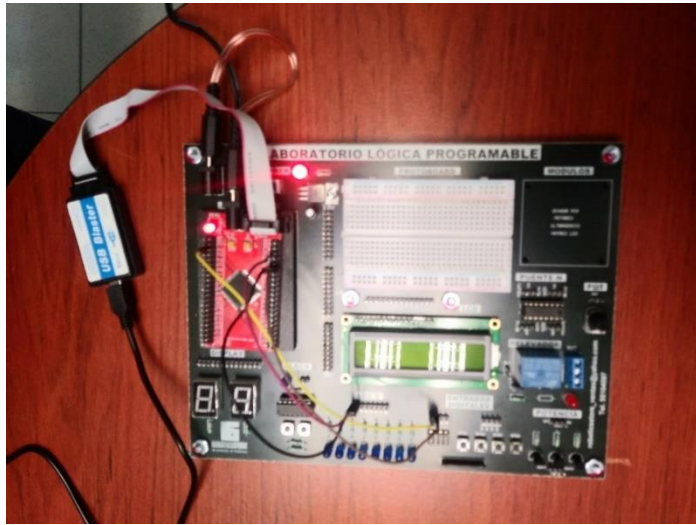


Figura 4.23. SBR para SSDRUP embebido en la FPGA *EP2C5T144C8*.

Capítulo 5. Pruebas experimentales y resultados

5.1. Sistema SDRUP

La estructura modelo utilizada permitió de manera controlada simular los desplazamientos laterales de la base y generar las inclinaciones en los niveles de la estructura.

Con los datos adquiridos por los sensores que corresponden a la medida M_i , se evalúa para obtener Δ por relación de semejanza y con esto se puede tabular a γ .

Medición 1. Se manipuló aleatoriamente el modelo experimental y se obtuvo la medida del desplazamiento relativo de entrepiso de los seis niveles como se registra en la Tabla 5.1.

Tabla 5.1. Datos obtenidos en el experimento 1.

Nivel	$M(\text{cm})$	$m(\text{cm})$	$H(\text{cm})$	$\Delta(\text{cm})$	γ
6	43	7	350	54.4	0.15555556
5	44	6	350	46.6	0.13333333
4	45	5	350	38.8	0.11111111
3	47	3	350	23.3	0.06666667
2	48	2	350	15.5	0.04444444
1	49	1	350	7.7	0.02222222

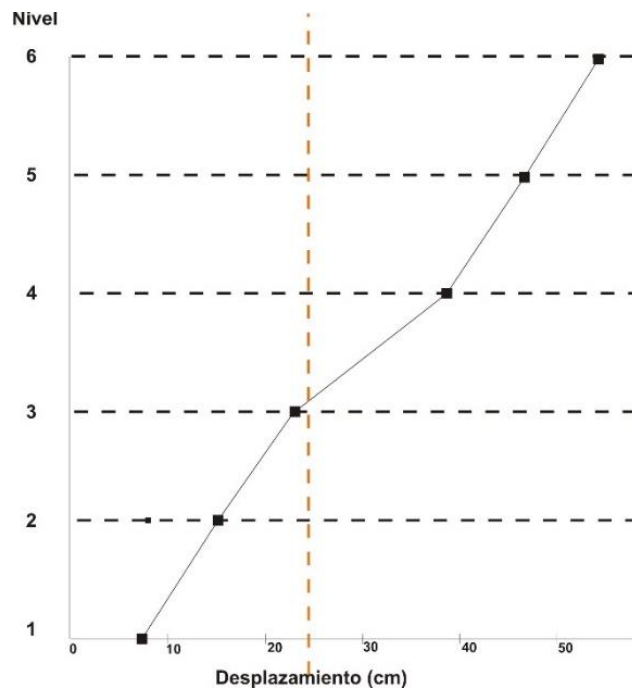


Figura 5.1. Medidas de desplazamiento relativo de entrepiso obtenidas en el experimento 1.

En este ejercicio se manipulo la inclinación vertical de cada nivel de la estructura modelo de tal manera que la inclinación en niveles superiores fuese exagerada y se obtuvieron las medidas indicadas.

En la gráfica de la Figura 5.1 podemos observar que las medidas Δ de los niveles 5 y 6 exceden los límites permisibles calculados. Para las medidas de los niveles 1, 2, 3 y 4 se verifica que las medidas de desplazamiento lateral se encuentran dentro del margen permitido.

Medición 2. Se manipuló aleatoriamente el modelo experimental y se obtuvo la medida del desplazamiento relativo de entrepiso de los seis niveles como se registra en la Tabla 5.2.

Tabla 5.2. Datos obtenidos en el experimento 2.

Nivel	M (cm)	m (cm)	H (cm)	Δ (cm)	γ
6	45	5	350	38,8	0,11111111
5	46	4	350	31,1	0,08888889
4	47	3	350	23,3	0,06666667
3	48	2	350	15,5	0,04444444
2	49	1	350	7,7	0,02222222
1	50	0	350	0	0

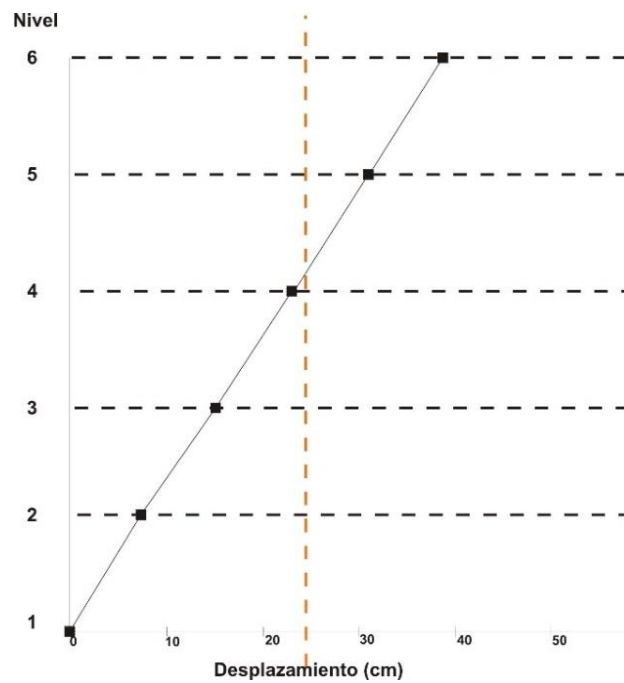


Figura 5.2. Medidas de desplazamiento relativo de entrepiso obtenidas en el experimento 2.

En este ejercicio se manipulo la inclinación vertical de cada nivel de la estructura modelo de tal manera que la inclinación en niveles superiores fuese exagerada y se obtuvieron las medidas indicadas.

En la gráfica de Figura 5.2 podemos observar que las medidas Δ de todos los niveles se encuentran dentro del margen permitido.

Medición 3. Se manipuló aleatoriamente el modelo experimental y se obtuvo la medida del desplazamiento relativo de entrepiso de los seis niveles como se registra en la Tabla 5.3.

Tabla 5.3. Datos obtenidos en el experimento 3.

Nivel	M (cm)	m (cm)	H (cm)	Δ (cm)	γ
6	47	3	350	23,3	0,06666667
5	46	4	350	31,1	0,08888889
4	45	5	350	38,8	0,11111111
3	48	2	350	15,5	0,04444444
2	49	1	350	7,7	0,02222222
1	50	0	350	0	0

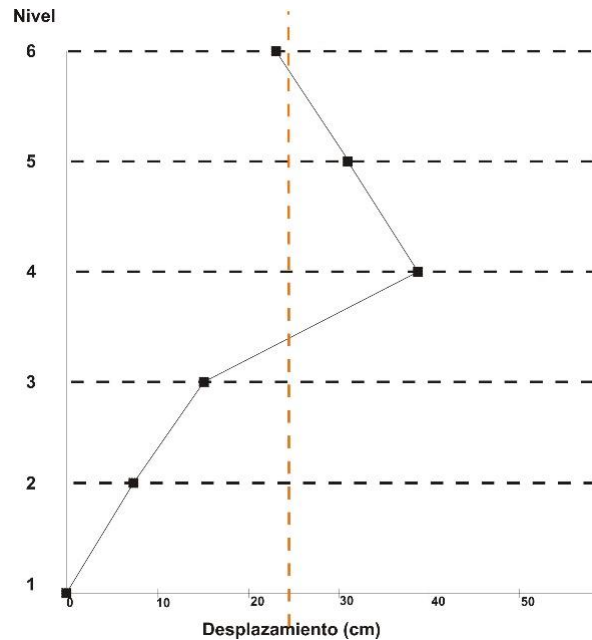


Figura 5.3. Medidas de desplazamiento relativo de entrespisos obtenidas en el experimento 3.

En este ejercicio se manipulo la inclinación vertical de cada nivel de la estructura modelo de tal manera que la inclinación en niveles intermedios fuese exagerada y se obtuvieron las medidas indicadas.

En la gráfica de Figura 5.3 podemos observar que las medidas Δ de todos los niveles se encuentran dentro del margen permitido.

Los ejercicios realizados consistieron en realizar la manipulación de la inclinación independiente de cada nivel y ajustar aproximadamente los desplazamientos relativos de los entrespisos para observar las inclinaciones correspondientes, se debe considerar que dicho modelo solo es constituido por módulos independientes para cada nivel.

Las mediciones de desplazamiento obtenidas se consideran con un margen de error de $\pm 3\text{mm}$ o 0.3cm , esto es 0.003m atribuibles a la precisión del sensor ultrasónico según hoja de especificaciones. Esta precisión no afecta al grado de confiabilidad de nuestras medidas de desplazamiento ya que considerando que las alturas de los entrespisos reales oscilan entre los 3 y 10m por lo tanto esperamos un límite mínimo de 0.06 mts. , esto es de 6cm o sea 60mm .

5.2. Sistema SBR para SSDRUP

Para validar SBR en el modelo descrito se diseñó un conjunto de pruebas las cuales reportamos:

Prueba 1. Se manipula el modelo utilizado dando como resultado que SSDRUP determina 21cm como la mayor de las seis mediciones con lo que SBR para SSDRUP determina la pertenencia de la variable de entrada en *ESTABLE*, podemos observar en el diagrama de tiempos de la Figura 5.4 que el sistema establece los niveles lógicos para las salidas de los actuadores.

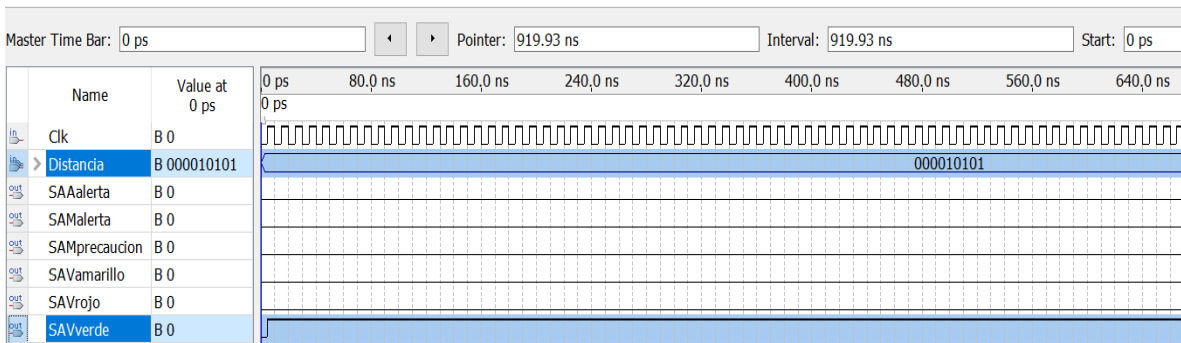


Figura 5.4. Diagrama de tiempos Prueba 1.
(Generado con *Intel Quartus II*)

Estos valores lógicos se verificaron presentes en las salidas hacia los actuadores y se reportan en la Tabla 5.4: encendido actuador visual color verde y apagados los demás actuadores.

Tabla 5.4. Valores lógicos presentes en las salidas hacia los actuadores en la prueba 1.

Prueba	Δ	Pertenece	SAAalerta	SAVverde	SAVamarillo	SAVrojo	SAMprecaucion	SAMalerta
1	21	<i>ESTABLE</i>	0	1	0	0	0	0

Prueba 2. Se manipula el modelo utilizado dando como resultado que SSSDRUP determina 37cm como la mayor de las seis mediciones con lo que SBR para SSSDRUP determina la pertenencia de la variable de entrada en *REGULAR*, podemos observar en el diagrama de tiempos de la Figura 5.5 que el sistema establece los niveles lógicos para las salidas de los actuadores.

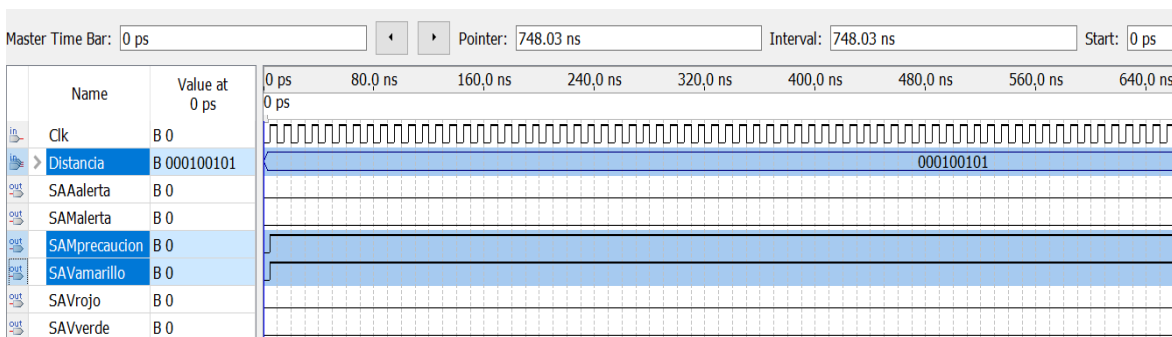


Figura 5.5. Diagrama de tiempos prueba 2.
(Generado con *Intel Quartus II*)

Estos valores lógicos se verificaron presentes en las salidas hacia los actuadores y se reportan en la Tabla 5.5: encendido actuador visual color amarillo, encendido actuador mensaje precaución y apagados los demás actuadores.

Tabla 5.5. Valores lógicos presentes en las salidas hacia los actuadores en la prueba 2.

Prueba	Δ	Pertenece	SAAalerta	SAVverde	SAVamarillo	SAVrojo	SAMprecaucion	SAMalerta
2	37	REGULAR	0	0	1	0	1	0

Prueba 3. Se manipula el modelo utilizado dando como resultado que SSDRUP determina 41cm como la mayor de las seis mediciones con lo que SBR para SSDRUP determina la pertenencia de la variable de entrada en *REGULAR*, podemos observar en el diagrama de tiempos de la Figura 5.6 que el sistema establece los niveles lógicos para las salidas de los actuadores.

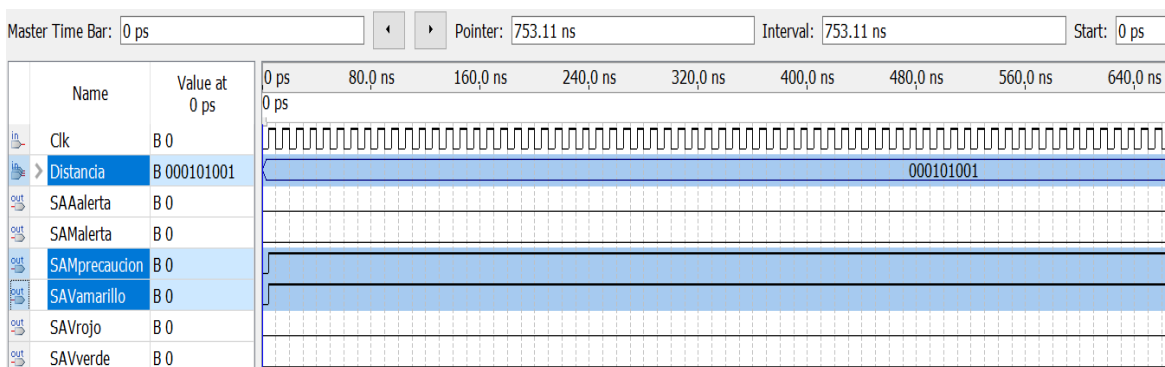


Figura 5.6. Diagrama de tiempos Prueba 3.
(Generado con *Intel Quartus II*)

Estos valores lógicos se verificaron presentes en las salidas hacia los actuadores y se reportan en la Tabla 5.6: encendido actuador visual color amarillo, encendido actuador mensaje precaución y apagados los demás actuadores.

Tabla 5.6. Valores lógicos presentes en las salidas hacia los actuadores en la prueba 3.

Prueba	Δ	Pertenece	SAAalerta	SAVverde	SAVamarillo	SAVrojo	SAMprecaucion	SAMalerta
3	41	REGULAR	0	0	1	0	1	0

Prueba 4. Se manipula el modelo utilizado dando como resultado que SSSDRUP determina 44cm como la mayor de las seis mediciones con lo que SBR para SSSDRUP determina la pertenencia de la variable de entrada en *LIMITE*, podemos observar en el diagrama de tiempos de la Figura 5.7 que el sistema establece los niveles lógicos para las salidas de los actuadores.

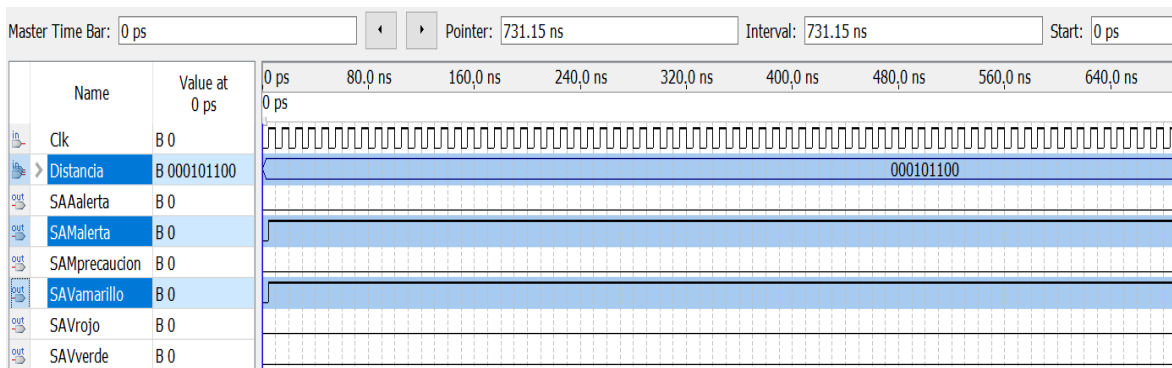


Figura 5.7. Diagrama de tiempos Prueba 4.
(Generado con *Intel Quartus II*)

Estos valores lógicos se verificaron presentes en las salidas hacia los actuadores y se reportan en la Tabla 5.7: encendido actuador visual color amarillo, encendido actuador mensaje de alerta y apagados los demás actuadores.

Tabla 5.7. Valores lógicos presentes en las salidas hacia los actuadores en la prueba 4.

Prueba	Δ	Pertenece	SAAalerta	SAVverde	SAVamarillo	SAVrojo	SAMprecaucion	SAMalerta
4	44	<i>LIMITE</i>	0	0	1	0	0	1

Prueba 5. Se manipula el modelo utilizado dando como resultado que SDRUP determina 49cm como la mayor de las seis mediciones con lo que SBR para SDRUP determina la pertenencia de la variable de entrada en *LIMITE*, podemos observar en el diagrama de tiempos de la Figura 5.8 que el sistema establece los niveles lógicos para las salidas de los actuadores.

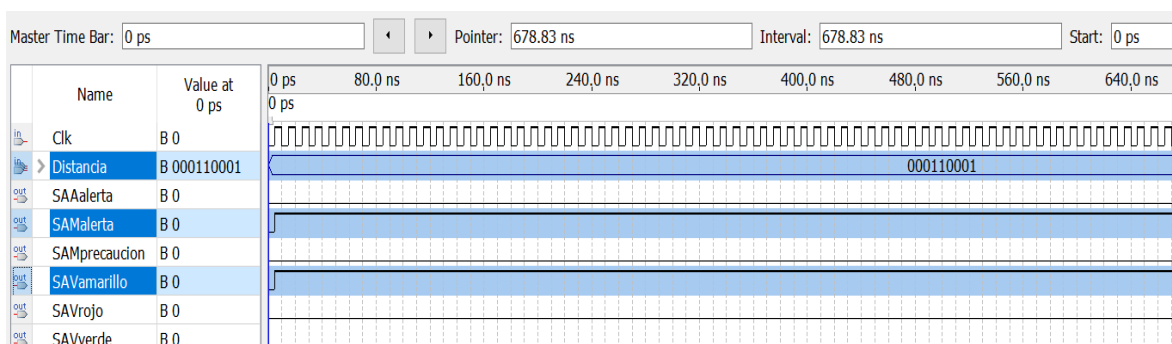


Figura 5.8. Diagrama de tiempos Prueba 5.
(Generado con *Intel Quartus II*)

Estos valores lógicos se verificaron presentes en las salidas hacia los actuadores y se reportan en la Tabla 5.8: encendido actuador visual color amarillo, encendido actuador mensaje de alerta y apagados los demás actuadores.

Tabla 5.8. Valores lógicos presentes en las salidas hacia los actuadores en la prueba 5.

Prueba	Δ	Pertenece	SAAalerta	SAVverde	SAVamarillo	SAVrojo	SAMprecaucion	SAMalerta
5	49	<i>LIMITE</i>	0	0	1	0	0	1

Prueba 6. Se manipula el modelo utilizado dando como resultado que SSSDRUP determina 50cm como la mayor de las seis mediciones con lo que SBR para SSSDRUP determina la pertenencia de la variable de entrada en *PELIGRO*, podemos observar en el diagrama de tiempos de la Figura 5.9 que el sistema establece los niveles lógicos para las salidas de los actuadores.

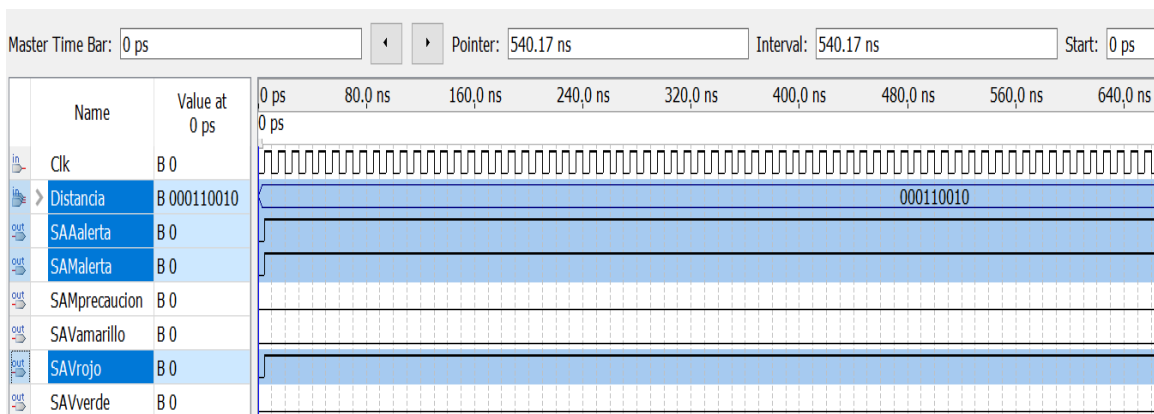


Figura 5.9. Diagrama de tiempos Prueba 6.
(Generado con *Intel Quartus II*)

Estos valores lógicos se verificaron presentes en las salidas hacia los actuadores y se reportan en la Tabla 5.9: encendido actuador acústico de alerta, encendido actuador visual color rojo, encendido actuador mensaje de alerta y apagados los demás actuadores.

Tabla 5.9. Valores lógicos presentes en las salidas hacia los actuadores en la prueba 6.

Prueba	Δ	Pertenece	SAAalerta	SAVverde	SAVamarillo	SAVrojo	SAMprecaucion	SAMalerta
6	50	<i>PELIGRO</i>	1	0	0	1	0	1

5.3. Discusión

La medición del desplazamiento relativo de entrepiso requiere de un sensor capaz de realizar esta medida entre dos puntos, el monitoreo de salud estructural utiliza principalmente sensores de desplazamiento láser y acelerómetros lo cual representa para su manejo un elevado costo y una alta complejidad técnica además de requerir dos puntos fijos para realizar dicha medida.

Li and Hao (2016) reportan el desarrollo de un sensor de desplazamiento relativo que utiliza el principio de un circuito de puente Wheatstone y determinan un índice de daño, con la limitante que el sensor mide el movimiento relativo local y solo es sensible a los cambios de condición localmente.

En Park et al. (2013) emplean un sensor de desplazamiento láser (LDS) y un nodo sensor inalámbrico personalizado que mide el desplazamiento como un índice de daño con el cual implementan SHM para verificar y corregir los parámetros de diseño de una edificación irregular. Este método implica utilizar la técnica óptica LDS para obtener la distancia del objetivo por triangulación con su complejidad inherente.

Nuestra propuesta basada en un sensor de desplazamiento relativo ultrasónico en péndulo (SDRUP) que es capaz de proporcionar la medida del desplazamiento relativo mediante la toma de una sola medida por cada entrepiso, y tan solo requiere que los sensores sean colocados apuntando al elemento estructural vertical del lado de la fuerza horizontal entrante que se identifica y la recolección de la medida se realizará aprovechando el efecto péndulo que se propicia. Nos ajustamos a lo determinado por Paulay (2001) que indica que para evaluar debemos considerar que las magnitudes de desplazamiento medio entre plantas de los últimos entre pisos no deben exceder del 2 al 2.5% de la altura H y con esto establecemos el límite de la medida del desplazamiento relativo y proporcionar nuestro propio índice de daño para el SHM.

En las tres propuestas se desarrollaron diferentes sensores de desplazamiento relativo y se propuso un índice de daño particular para cada caso, por lo que no es posible establecer una comparación de eficiencia.

Las pruebas experimentales y el análisis con los datos obtenidos con nuestro sistema desarrollado proporcionan un excelente beneficio costo desempeño y ventaja al no requerir de puntos fijos para realizar la recolección, además de que se hace en tiempo real y solo requiere de una simple calibración con el eje de referencia. El nivel de confiabilidad de nuestra propuesta es suficiente para que se pueda considerar su utilización como una herramienta en el monitoreo de salud estructural.

Capítulo 6. Conclusiones y Trabajo futuro

6.1. Conclusiones

La propuesta de ubicación y del efecto péndulo propiciado por la colocación suspendida de los sensores resultó la apropiada, ya que las proyecciones geométricas generadas una vez analizadas hicieron posible que a través de la recolección de una sola medida por cada sensor y por medio de la relación de semejanzas que se puede aplicar, como lo es el caso, a triángulos semejantes para lograr obtener por los mecanismos matemáticos correspondientes la medida de desplazamiento relativo de entepiso. El sistema solo requiere de una simple calibración con el eje vertical de referencia.

La aplicación del Diseño jerárquico de la Lógica programable con programación VHDL permitió diseñar un dispositivo electrónico capaz de obtener medidas recolectadas por la red de sensores para ser procesadas por el algoritmo de SSDRUP para entregar medidas de desplazamiento relativo de entepiso, así como identificar la de mayor magnitud con la cual el algoritmo SBR para SSDRUP realiza la evaluación para determinar la estabilidad de la estructura mediante el índice propuesto presentado en este trabajo.

La instrumentación con SBR para SSDRUP del modelo empleado en esta investigación proporciono la información necesaria para la evaluación. En la sección de resultados se puede verificar como el sistema fue capaz de determinar en cada caso salidas hacia los actuadores y que todas las pruebas implementadas correspondieron con exactitud al diseño establecido y definidas las acciones por un experto de esa área ingenieril. Por lo cual podemos concluir que el sistema SBR para SSDRUP es capaz de determinar la estabilidad de una estructura modelo de manera no invasiva, en tiempo real, sin la necesidad de requerir puntos fijos para

la recolección de datos y en base a un parámetro: Desplazamiento relativo de entrepiso, por lo que se puede recomendar como herramienta de apoyo para su utilización en SHM para estimar el daño en edificios de varios niveles.

6.2. Trabajo futuro

Integrar SBR para SSDRUP a un sistema de instrumentación para SHM podría incorporar la evaluación de estabilidad de una estructura mediante el parámetro desplazamiento relativo de entrepiso al conjunto de variables que esos sistemas emplean para el análisis no solo de SHM sino también para la determinación de daño estructural.

Sería conveniente continuar con la integración a un sistema embebido de más módulos que evalúen otras variables ya sea de manera independiente o conjunta al desarrollado en este trabajo para plantear nuevos objetivos encaminados a un análisis de mayor envergadura y la determinación de daño estructural.

Referencias

- Arias-Lara, D., & De la Colina, J. (2018). Assessment of methodologies to estimate displacements from measured acceleration records. *Measurement*, *114*, 261-273. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2017.09.019>
- Bao, X., & Chen, L. (2012). Recent Progress in Distributed Fiber Optic Sensors. *Sensors*, *12* (7), 8601-8639. <https://doi.org/10.3390/s120708601>
- Barbat, H., Oller, S. y Vielma, J. C. (2005). *Cálculo y diseño sismoresistente de edificios. Aplicación de la norma NCSE-02* [Monografía]. Barcelona, España: A. H. Barbat. <https://www.researchgate.net/publication/271505321>
- Blanco, M. E. (10 de junio de 2018). La zona más activa: el cinturón de fuego, región volcánica. *Excelsior*. Recuperado el 3 de enero de 2019, de <https://www.excelsior.com.mx/global/la-zona-mas-activa-el-cinturon-de-fuego-region-volcanica/1244394>
- Breuer, P., Chmielewski, T., Górski, P., & Konopka, E. (2002). Application of GPS technology to measurements of displacements of high-rise structures due to weak winds. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, *90*, 223-230. [https://doi.org/10.1016/S0167-6105\(01\)00221-5](https://doi.org/10.1016/S0167-6105(01)00221-5)
- Chatterjee, S., Sarkar, S., Hore, S., Dey, N., Ashour, A., & Balas, V. (2017). Particle swarm optimization trained neural network for structural failure prediction of multistoried RC buildings. *Neural Computing and Applications*, *28*, 2005–2016. <https://doi.org/10.1007/s00521-016-2190-2>
- Escobar, J. A., Cisneros, C. M. y Gómez, R. (2004). Evaluación de criterios de diseño por torsión sísmica estática para edificios de varios pisos. *Revista de Ingeniería Sísmica*, (71), 63-89. <https://doi.org/10.18867/ris.71.48>
- Ghasemi, M. R., Nobahari, M., & Shabakhty, N. (2018). Enhanced optimization-based structural damage detection method using modal strain energy and modal frequencies. *Engineering with Computers*, *34*, 637–647. <https://doi.org/10.1007/s00366-017-0563-5>

- Guerrero, H., Escobar, J. A. y Gómez, R. (2006). Localización y cuantificación de daño en estructuras. *Sociedad Mexicana de Ingeniería Estructural*. XV Congreso Nacional de Ingeniería Estructural, Puerto Vayarta, Jalisco, México.
- Guo, J., Xie, X., Bie, R., & Sun, L. (2014). Structural health monitoring by using a sparse coding-based deep learning algorithm with wireless sensor networks. *Personal and Ubiquitous Computing*, *18*, 1977–1987. <https://doi.org/10.1007/s00779-014-0800-5>
- LGPC. (2018). Ley general de protección civil. Última reforma publicada el DOF19-01-2018. *Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión*. México. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/416014/Ley_General_de_Proteccion_Civil.pdf
- Li, J., & Hao, H. (2016). Health monitoring of joint conditions in steel truss bridges with relative displacement sensors. *Measurement*, *88*, 360-371. <http://dx.doi.org/10.1016/j.measurement.2015.12.009>
- Li, X. Q., Chen, Q. J., & Ding, Z. D. (2019). Structural damage diagnosis and fine scale finite element intelligence simulation of long span cable stayed bridges. *Cluster Computing*, *22*, 4101–4107. <https://doi.org/10.1007/s10586-017-1515-y>
- Maxinez, D. (2013). *Programación de sistemas digitales con VHDL*. México: Grupo Editorial Patria, Primera edición.
- Maxinez, D. y Alcalá-Jara, J. (2007). *VHDL El arte de programar sistemas digitales*. México: CECSA, Quinta edición.
- Moosazade, S., h, Namazi, E., Aghababael, H., Marto, A., Mohamad, H., & Hajihassani, M. (2019). Prediction of building damage induced by tunnelling through an optimized artificial neural network. *Engineering with Computers*, *35*, 579–591. <https://doi.org/10.1007/s00366-018-0615-5>
- Muriá, D., Aldama, B., Garcia, M., & Rodríguez, G. (2021). Monitoring of a rehabilitated building in soft soil in Mexico and structural response to the September 2017 earthquakes: Part 1: structural health monitoring system. *Earthquake Spectra*, *37* (4), 2737–2766. <https://doi.org/10.1177/87552930211000358>
- NTC-RSEE. (15 de Diciembre de 2017). Norma Técnica Complementaria para la Revisión de la Seguridad Estructural de las Edificaciones (NTC-RSEE). *vigésima época(No. 220 bis)*. Ciudad de México: Gaceta oficial de la Ciudad de México.

- Park, H. S., Kim, J. M., Choi, S. W., & Kim, Y. (2013). A Wireless Laser Displacement Sensor Node for Structural Health Monitoring. *Sensors*, *13*(10), 13204-13216. <https://doi.org/10.3390/s131013204>
- Paulay, T. (2001). Some design principles relevant to torsional phenomena in ductile buildings. *Journal of Earthquake Engineering*, *5*(3), 273-308. <https://doi.org/10.1080/13632460109350395>
- Pérez, J. J., Aguirre, J. & Ramírez, L. (2018). Sismicidad y seguridad estructural en las construcciones: lecciones aprendidas en México. *Revista: Salud pública de México*, *60*, S41-S50. <https://doi.org/10.21149/9300>
- Silva, O., Marlyn, S., & Soto, F. (2016). Seismic testing of intelligent buildings to measure lateral displacement (Portico Structures). *Revista INGENIERÍA UC*, *23*(1), 90-96, <http://servicio.bc.uc.edu.ve/ingenieria/revista/>
- IEEE Std 1076-2019. (5 de septiembre de 2019). IEEE Standard for VHDL Language Reference Manual. *IEEE Standards Association*. <https://standards.ieee.org/standard/1076-2019.html>
- Song, H. X., Wang, X., Ma, L., Cai, M., & Cao, T. (2006). Design and Performance Analysis of Laser Displacement Sensor Based on Position Sensitive Detector (PSD). *Journal of Physics: Conference Series*, *48*, 217-222. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/48/1/040>
- Tamura, Y., Matsui, M., Pagnini, L. C., Ishibashi, R., & Yoshida, A. (2002). Measurement of wind-induced response of buildings using RTK-GPS. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, *90*, 1783-1793. [https://doi.org/10.1016/S0167-6105\(02\)00287-8](https://doi.org/10.1016/S0167-6105(02)00287-8)
- Vila, D. M. y Alcorta, R. (1995). Propiedades dinámicas de edificios de la Ciudad de México. *Revista de Ingeniería Sísmica*. *51* (51), 25-45. <https://doi.org/10.18867/ris.51.261>
- Zrelli, A., & Ezzedine, T. (2017). Collect Tree Protocol for SHM System using Wireless Sensor Networks. *2017 13th International Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC)*, 1797-1801. <https://doi.org/10.1109/IWCMC.2017.7986556>

