

# UACM

Universidad Autónoma  
de la Ciudad de México

---

*Nada humano me es ajeno*

COLEGIO DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA

LICENCIATURA EN INGENIERÍA EN SISTEMAS ELECTRÓNICOS INDUSTRIALES

**Diseño e implementación de un sistema inalámbrico de información  
para vigilancia estructural de obras civiles**

TRABAJO RECEPCIONAL

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE LICENCIADA EN  
INGENIERÍA EN SISTEMAS ELECTRÓNICOS INDUSTRIALES

PRESENTA

**ROSA MARIA SEVERIANO MORA**

Director del trabajo recepcional

**Ing. David Velázquez Suárez**

Ciudad de México, marzo de 2017.

## SISTEMA BIBLIOTECARIO DE INFORMACIÓN Y DOCUMENTACIÓN



## UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE LA CIUDAD DE MÉXICO COORDINACIÓN ACADÉMICA

### RESTRICCIONES DE USO PARA LAS TESIS DIGITALES

### DERECHOS RESERVADOS ©

La presente obra y cada uno de sus elementos está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor; por la Ley de la Universidad Autónoma de la Ciudad de México, así como lo dispuesto por el Estatuto General Orgánico de la Universidad Autónoma de la Ciudad de México; del mismo modo por lo establecido en el Acuerdo por el cual se aprueba la Norma mediante la que se Modifican, Adicionan y Derogan Diversas Disposiciones del Estatuto Orgánico de la Universidad de la Ciudad de México, aprobado por el Consejo de Gobierno el 29 de enero de 2002, con el objeto de definir las atribuciones de las diferentes unidades que forman la estructura de la Universidad Autónoma de la Ciudad de México como organismo público autónomo y lo establecido en el Reglamento de Titulación de la Universidad Autónoma de la Ciudad de México.

Por lo que el uso de su contenido, así como cada una de las partes que lo integran y que están bajo la tutela de la Ley Federal de Derecho de Autor, obliga a quien haga uso de la presente obra a considerar que solo lo realizará si es para fines educativos, académicos, de investigación o informativos y se compromete a citar esta fuente, así como a su autor ó autores. Por lo tanto, queda prohibida su reproducción total o parcial y cualquier uso diferente a los ya mencionados, los cuales serán reclamados por el titular de los derechos y sancionados conforme a la legislación aplicable.

# Agradecimientos

Este trabajo está dedicado a todas aquellas personas que me apoyaron durante toda mi formación académica. Principalmente a mi familia y profesores que creyeron en mí, esto no se hubiese hecho posible sin la compañía y guía del director del trabajo recepcional, el Ingeniero David Velázquez Suárez. Así mismo el apoyo incondicional en toda la licenciatura del Dr. Sebastián Ibarra Rojas, quien fungió como mi tutor y codirector de este trabajo en este proceso académico. Es un placer poder dedicar este documento a todos aquellos que estuvieron a mi lado dándome aliento de seguir luchando para alcanzar la meta y cerrar un ciclo en mi vida.

Así mismo la oportunidad de demostrar que con esfuerzo y paciencia se puede llegar a un objetivo e ir creciendo intelectualmente, para poder desarrollarme en el mundo laboral en beneficio de un bien común. Pero sobretodo aprender a pasar o liberarse de obstáculos emocionales, físicos y el más importante intelectual.

# SÍNTESIS

En el presente documento se aborda la vigilancia en las estructuras de obras civiles. Entendiendo como estructuras de obras civiles a toda construcción que está destinada a soportar su propio peso y la presencia de acciones externas (como: fuerzas, momentos, cargas, etc.) sin perder su funcionalidad.

El objetivo principal de este trabajo es obtener datos de la deformación que sufre una estructura, para posteriormente vigilar el comportamiento que muestran por deterioro o por acciones externas, y finalmente, la detección temprana de daño en una estructura. Esto se lleva a cabo por medio de la colocación de sensores de compresión y/o torsión según sea el caso. En una primera fase se implementó un sensor con base a una galga extensométrica y un amplificador de instrumentación, trabajo que se documenta como previo al presente. Al final por razones que se explican en este documento se decidió el uso de un acelerómetro con su sistema de acondicionamiento propio, como sensor de entrada del sistema.

La adquisición de datos se realiza mediante la implementación de un sistema de acondicionamiento de la señal de un acelerómetro (ADX103/ADX203) como sensor<sup>1</sup>; la señal de este se acondiciona mediante amplificadores operacionales (AD8608) y se enlaza con el microcontrolador (PIC18F4550). El microcontrolador es una computadora en un chip; incluye todos los elementos aritméticos y la lógica de un microprocesador de propósito general, de igual manera cuenta con elementos de solo lectura, memoria de lectura-escritura e interfaces de entrada – salida o periféricos, usaremos el módulo convertidor A/D y 2 puertos de propósito general.

Para transmitir los datos desde la estructura a una computadora personal (PC) se utiliza la tarjeta Raspberry pi, computadora de placa reducida (Raspberry pi 2 modelo B) usando su puerto digital de entrada y vía wifi a una computadora personal PC.

Finalmente para la interpretación posterior y almacenamiento de datos se usará la interface humana máquina (software) que facilite el manejo, presentación e interpretación de los datos adquiridos por el sensor.

---

<sup>1</sup> Definición de sensor en el Capítulo 3 de este documento

# RESUMEN

## **Capítulo 1. Introducción**

En este Capítulo se hace una introducción en el ámbito de lo que son estructuras civiles, analizando los antecedentes y las necesidades, así como el porqué del uso de un sistema embebido para este trabajo.

En este Capítulo se condensa el trabajo previo realizado con otro tipo de sensores y acondicionamientos para el fin de medir y vigilar estructuras civiles bajo acciones externas, haciendo referencia de este trabajo en el anexo II.

## **Capítulo 2. Objetivos**

En este Capítulo se enlistan los objetivos del proyecto, se describe el objetivo general y los objetivos particulares; tanto teóricos como prácticos y se finaliza con la motivación del trabajo.

## **Capítulo 3. Desarrollo teórico**

En este Capítulo se desarrollan los conceptos utilizados para el diseño de la parte analógica del “hardware”, formada por el acelerómetro y sus circuitos de acondicionamiento de la señal. Se hace referencia a la parte digital del circuito, donde se acondiciona la señal para ser transmitida. En él se definen las características del microcontrolador y se desarrollan los conceptos utilizados para su configuración según los requisitos deseados para el proyecto. También se desarrollan los conceptos de transmisión y protocolos inalámbricos. Finalmente se comentan los conceptos concernientes a sistemas embebidos.

En este Capítulo también se documenta la investigación previa que se realizó sobre el uso de galgas extensométricas en el sistema propuesto.

## **Capítulo 4. Desarrollo.**

En este Capítulo se describen los subsistemas electrónicos que componen al sistema inalámbrico de información para la vigilancia estructural de obras civiles y su interrelación, en cada sección se presenta el proceso de diseño y su implementación.

## **Capítulo 5. Presentación de datos.**

En este Capítulo se muestra la aplicación para la interface humana, no se hace interpretación de datos, se ejemplifica una de las posibles formas de la presentación de los mismos.

## **Capítulo 6. Conclusiones y trabajos futuros**

En este Capítulo se presentan las conclusiones obtenidas de la elaboración del proyecto y se establecen posibles líneas futuras de trabajo.

## **Bibliografía**

## **Anexo I. Programas**

Programa implementado para el convertidor analógico-digital en el microcontrolador, formato de los datos en forma digital y su envío a la Raspberry vía puertos del mismo.

En este anexo se incluye el listado del programa utilizando el software Mplab de Microchip.

## **ANEXO II Trabajos previos en la investigación y desarrollo de este proyecto.**

Aquí se incluyen los trabajos realizados, para implementar este proyecto, con el uso de una galga extensométrica, sus circuitos y accesorios requeridos para su funcionamiento.

# ÍNDICE

## 1. INTRODUCCIÓN

- 1.1 Monitoreo de estructuras civiles
- 1.2 Sistemas embebidos
- 1.3 Trabajos previos

## 2. OBJETIVOS

- 2.1 Objetivo general
- 2.2 Objetivos específicos

## 3. DESARROLLO TEÓRICO

- 3.1 Sensores usados en la detección de fallas en las estructuras civiles.
- 3.2 Microcontrolador
- 3.3 Comunicación inalámbrica
- 3.4 Protocolos de Comunicación
- 3.5 Sistemas de Control Embebidos

## 4. DESARROLLO

- 4.1 Diagramas de bloques genérico y específico
- 4.2 Descripción de partes que forman al sistema
  - a. Acelerómetro, acondicionamiento de la señal
  - b. Microcontrolador
  - c. Raspberry, Transmisor / Receptor
  - d. Computadora personal

## 5. PRESENTACIÓN DE DATOS

- 5.1 Tabla de datos y gráficas

## 6. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

- 6.1 Conclusiones
- 6.2 Trabajos futuros

## 7. Referencias y bibliografía

ANEXO I Listados

ANEXO II TRABAJOS PREVIOS EN LA INVESTIGACIÓN

# Capítulo1 Introducción

## 1.1 Monitoreo de Estructuras Civiles

¿Qué es una estructura civil? Es un conjunto de elementos mecánicos unificados, cuyo propósito es soportar cargas, como son: **Carga Muerta**: todo peso aplicado a la estructura la cual se mantiene inerte (peso propio – muros, entresijos, etc.), **Carga Viva**: toda carga aplicada a la estructura la cual se mantiene en movimiento (el uso del inmueble – personas), **Carga Accidental**: Toda fuerza aplicada de manera temporal sobre la estructura (vientos, terremotos, etc.). De igual manera se encarga de resistir **Cargas Internas**, como son: momentos, cortantes y fuerzas axiales. Todo esto sin perder sus propiedades y su funcionalidad.

Las estructuras de obras civiles sufren fallas cuyo origen y localización se deben determinar. El presente trabajo tiene como objetivo registrar una deformación que sufre una estructura y enviarla a una computadora personal (PC) para su registro e interpretación.

Parte de la motivación para realizar este proyecto es entender el riesgo latente de fallas en estructuras civiles; la zona geográfica urbana de la Ciudad de México tiene un alto riesgo por sismicidad; el Servicio Sismológico Nacional en su portal <sup>2</sup> reporta en sus estadísticas de sismicidad un incremento en la ocurrencia de sismos muy fuerte en los años recientes. La República Mexicana está situada en una de las regiones sísmicamente más activas del mundo, enclavada dentro del área conocida como el **Cinturón Circumpacífico** donde se concentra la mayor actividad sísmica del planeta. Aunque las zonas epicentrales se localizan en diversos puntos del Pacífico, la Ciudad de México, aunque no se encuentre sobre la costa, se ha convertido en el receptor sísmico de todos ellos debido a que se encuentra lo suficientemente cercana para experimentar sus efectos y, la causa de que estos sean más dañinos en esta zona que en otros lugares, radica entre otras cosas en la naturaleza de su terreno ya que fue fundada en lo que fuera un lago, generando gran preocupación.

Con el objetivo de incrementar la seguridad en las estructuras civiles, se busca realizar una detección temprana de fallas y para ello se han desarrollado diferentes sistemas de monitoreo y diagnóstico basados en la identificación de los diferentes esfuerzos a los que está sometida una estructura.

El sistema propuesto conlleva elementos fundamentales para su funcionamiento, es un sistema embebido e inalámbrico. Se conforma como una “**Celda Independiente**”, que opera de manera autónoma a fuentes de alimentación con posibilidad de interrupción y con la transmisión de datos segura.

---

<sup>2</sup> <http://www2.ssn.unam.mx:8080/estadisticas/>

## 1.2 Sistemas Embebidos

Los sistemas embebidos no dependen funcionalmente de un sistema externo, en ese sentido tienen una capacidad de funcionamiento autónomo e independiente. Los sistemas embebidos pueden ser mecánicos, eléctricos, electrónicos, hidráulicos, etcétera, y cada sistema embebido es desarrollado para realizar una función específica o aplicación particular; y con el fin de ser portable, confiable y contener en sí mismo todas las capacidades de operación; así cuando se habla de sistemas embebidos no sólo incluye el acondicionamiento de señales sino que además incluye procesamiento de las mismas.

Un sistema embebido electrónico consta de diversos componentes analógicos y digitales, como son:

- I. Unidad Central de Procesamiento (CPU)
- II. Memoria
- III. Entradas / Salidas (I/O)
- IV. Periféricos

Los microcontroladores ( $\mu C$ ), los microprocesadores ( $\mu P$ ), los procesadores digitales de señales (DSP), las matrices de compuertas lógicas programables (FPGA), controladores digitales de señales (DSC), entre otros son ejemplos de sistemas digitales usados para diseñar sistemas embebidos.

En este proyecto las funciones necesarias son la adquisición, el procesamiento, almacenamiento y comunicación de la deformación de una estructura civil.

El sistema embebido implementado para la transmisión de datos, en el diseño e implementación de un sistema inalámbrico de información para la vigilancia estructural de obras civiles en la detección temprana incluye un Microcontrolador PIC18F4550 [i]; este dispositivo recibe la señal acondicionada por la tarjeta del sensor (acelerómetro), se encarga de procesarla mediante el convertidor A/D y enviarla al sistema Raspberry [ii] vía 2 puertos del microcontrolador. Los datos son enviados por la Raspberry a una PC vía inalámbrica para su registro e interpretación.

## 1.3. Trabajos iniciales

El diseño e implementación de un sistema inalámbrico de información para la vigilancia estructural de obras civiles (**SIVEOC** en lo sucesivo) se desarrolló inicialmente con un sistema que incluía una batería de 9 [V], un convertidor de voltaje encargado de alimentar a un amplificador operacional de instrumentación, dos fuentes de corriente para alimentar a una galga extensométrica, un microcontrolador y el transmisor (se utilizó el sistema Xbee [iii], para comunicación entre dispositivos) que se conectaron a una fuente de 5 [V]. Para recibir los datos se utilizó el receptor del sistema Xbee conectado a la PC. Como veremos, el cambiar al uso de un sensor de aceleración y agregar la

computadora de placa reducida Raspberry pi, incrementó el potencial del sistema propuesto.

Para el SIVEOC inicialmente se utilizó una galga extensométrica (como sensor), encargada de registrar los diferentes esfuerzos a los que está sometida una estructura civil. La galga es de un material conductor que al aplicarle una fuerza, sufre una deformación y por lo tanto una variación en su resistencia eléctrica. La galga extensométrica es el elemento más utilizado para el análisis experimental de deformaciones, su fundamento básico es la variación de la resistencia en un hilo conductor producido cuando se alarga o contrae; llamado "strain", lo que implica una deformación debido a la aplicación de fuerzas externas al material.

La deformación que sufre el material conductor de la galga se presenta en todas direcciones, el resultado es una variación en su resistencia eléctrica.

Para medir la variación de la resistencia eléctrica, controlando la alimentación de una corriente constante en la galga se midió su voltaje; mediante un circuito puente adaptado y el factor de galga (GF) se determina la deformación; para el número de parte SGT-2DD/350-SY43 de la marca OMEGA [iv], la deformación está dada por:

$$GF = \frac{\Delta R/R}{\Delta L/l} = \frac{\Delta R/R}{\epsilon} \quad [1]$$

Siendo  $\epsilon$  la deformación (fracción de cambio de la longitud),  $R$  es la resistencia eléctrica nominal de la galga,  $l$  la longitud de esta resistencia.  $\Delta R/R$  es la variación fraccional de la resistencia de la galga y  $\Delta L/l$  la variación fraccional de la longitud de la galga.

Para la amplificación de la señal de deformación del sensor se seleccionó un amplificador de instrumentación, el AD524 [v]. Es un amplificador de voltaje diferencial, de precisión, con una alta impedancia de entrada, alto rechazo en modo común (CMRR), impedancia de salida baja, voltajes y corrientes de offset bajos. En el ANEXO II se presentan los circuitos eléctricos y resultados obtenidos con este sensor.

# Capítulo 2 Objetivos

Como mencionamos en el Capítulo 1 de este trabajo, Las estructuras civiles están sujetas a esfuerzos y deformaciones que conllevan posibilidad de falla; este riesgo y el tipificar las mismas son parte de la motivación de este trabajo. No dejamos de lado otros dos hechos: La posición geográfica de la Ciudad de México y de manera fundamental el riesgo a la integridad de los usuarios de estructuras civiles.

Por otro lado, existen diferentes y no pocos trabajos desarrollados en el pasado con objetivos y motivación similares a los que proponemos en este proyecto; muchos de los cuales han usado galgas extensométricas y otros tipos de sensores de deformación, además de comunicación vía cables.

El desarrollo de nuevos sensores y avances en sistemas de comunicación, nos da la oportunidad de presentar esta propuesta, diseñar e implementar un sistema inalámbrico de información para la vigilancia estructural de obras civiles, mediante el uso de un acelerómetro.

El problema planteado es, la adquisición de información de esfuerzos en la estructura civil y transmisión inalámbrica de la misma, con los objetivos siguientes:

## 2.1 Objetivo General

Diseñar e implementar un sistema inalámbrico de información para la vigilancia estructural de obras civiles, mediante el uso de un acelerómetro.

## 2.2 Objetivos Particulares

### 1. Diseño e implementación de la tarjeta del sensor (acelerómetro)

El propósito de la tarjeta del sensor es amplificar y acondicionar la señal del acelerómetro.

2. Acondicionamiento de la señal para ser recibida por el sistema de transmisión y recepción de datos (Raspberry). Este circuito se encargará de acondicionar el dato analógico obtenido de la deformación para ser enviado al sistema Raspberry. Esta parte del sistema debe proporcionar la conversión del dato analógico a digital y además darle un formato para ser recibido por la tarjeta Raspberry.

### 3. Transmisión y recepción de datos (Sistema Raspberry)

El sistema contempla la recepción de datos y su transmisión a la interface humana, y como sistema embebido la transmisión deberá ser inalámbrica, vía wifi (del inglés Wireless Fidelity).

4. Presentación de los datos en la interface humana, para análisis posterior. Esta sección mostrará los datos al usuario para su presentación y manejo. La interacción del usuario con la información adquirida se realizará mediante una PC.

## Capítulo 3 Desarrollo Teórico

En este Capítulo se trata de manera general y teórica las partes constitutivas de nuestro sistema. Conformado por: acondicionador de la señal del acelerómetro, microcontrolador, Raspberry para transmitir el dato vía inalámbrica, la PC que recibe los datos, una fuente de alimentación de todo el sistema, protocolos de comunicación y sistemas embebidos. Como se muestra en la Figura 3.1 es el diagrama de bloques del SIVEOC, muestra las partes constitutivas del sistema.

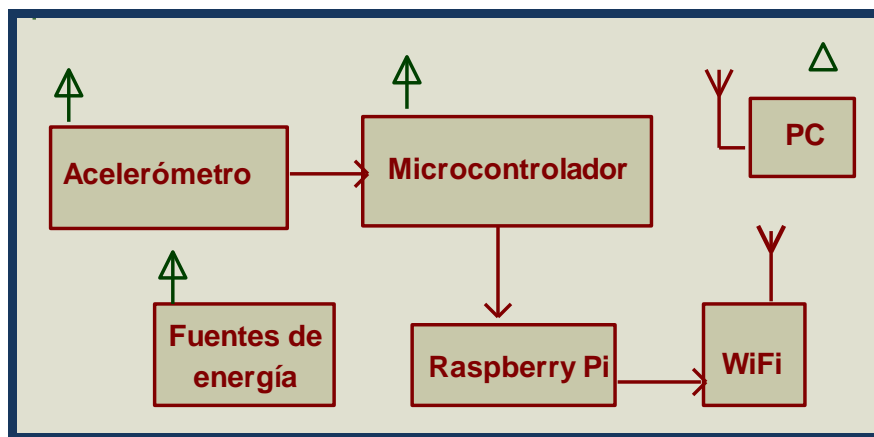


Figura 3.1 Partes que integran el SIVEOC.

### Sensores

*“Se denomina transductor, en general a todo dispositivo que convierte una señal de una forma física en una señal correspondiente pero de otra forma física distinta. Es por tanto, un dispositivo que convierte un tipo de energía en otro.*

*Un sensor es un dispositivo que, a partir de la energía del medio donde se mide, da una señal de salida transducible que es función de la variable medida.*

*Sensor y transductor se emplean a veces como sinónimos, pero sensor sugiere un significado más extenso: la ampliación de los sentidos para adquirir un conocimiento de cantidades físicas que, por su naturaleza o tamaño, no pueden ser percibidas directamente por los sentidos.” [VI]*

*“Sensor es un dispositivo electrónico, que produce un dato eléctrico, óptico o digital, derivado de una condición o evento físico. La señal del sensor es electrónicamente transformada, por otro dispositivo, el dato de salida es útil para tomar decisiones por dispositivos “inteligentes” o personas.” [VII]*

La función del sensor en conjunto con su acondicionamiento es convertir los parámetros a ser medidos, controlados o supervisados en señales equivalentes para que la etapa de control los pueda interpretar.

La estructura de la adquisición de la deformación de la estructura civil se compone de:

- Un sensor de ingreso para captar la información (energía) del medio o entorno donde se mide.
- Un adaptador o amplificador para que la deformación se traduzca en una señal adecuada que la pueda procesar el sistema (Figura 3.1a).

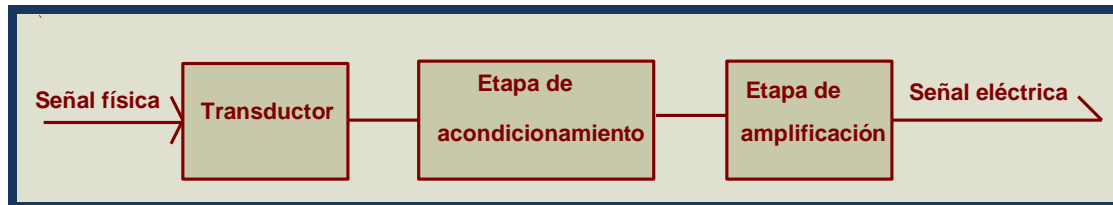


Figura 3.1a Diagrama general de sensor.

### 3.1 Sensores usados en la detección de fallas en las estructuras civiles

A continuación se comentan algunos sensores utilizados para la vigilancia de estructuras de obras civil.

#### a. Reflectómetros

Como lo indica el nombre, el reflectómetro es un sensor óptico. Utiliza la reflexión de un haz de luz (láser) como principio de funcionamiento, consiste de dos fibras ópticas; una de ellas “flotante” para que no sufra deformación y la otra sujeta a la estructura y por tanto la que “sufrir deformación”. El funcionamiento consiste en inyectar un tren de pulsos luminosos con el fin de realizar una medida de la amplitud de las señales reflejadas y de las señales difundidas. Conociendo la velocidad de la luz y el índice de refracción del espejo, se mide el tiempo que tarda el pulso en volver a la fuente; de esta forma el reflectómetro calcula la posición del evento reflejante.

La reflectometría óptica es aplicada para medir deformación. Esta técnica permite la detección y cuantificación localizada de cambios en las dimensiones físicas de los materiales, a través de los cambios ocurridos a lo largo de una fibra sensora con alta resolución espacial. Por su funcionamiento es el instrumento más adecuado para la medición de deformación en estructuras civiles; sin embargo es de alto costo. Hace uso de diferentes modelos matemáticos para alcanzar la medición de la deformación, la Figura 3.2 muestra un reflectómetro basado en un modelo denominado reflexión de baja coherencia [VIII], el funcionamiento parte de una fibra óptica flotante que no sufre deformación y una segunda fibra óptica fijada a la estructura recupera el haz de luz; esta segunda fibra al sufrir deformación se producen diferencias en los espectros de frecuencia en ambas fibras; con el producto de ambos espectros se genera la amplitud de deformación que sufre la estructura. El instrumento se calibra ajustando la distancia (d) del espejo que refleja el haz de luz del láser, se dice que al hacer el ajuste se hace analoga la señal, de este

concepto viene el nombre de reflectómetro de baja coherencia. En la figura 3.2 se presenta todo el instrumento de medición con las dos fibras ópticas, el generador de luz y elementos de ajuste.

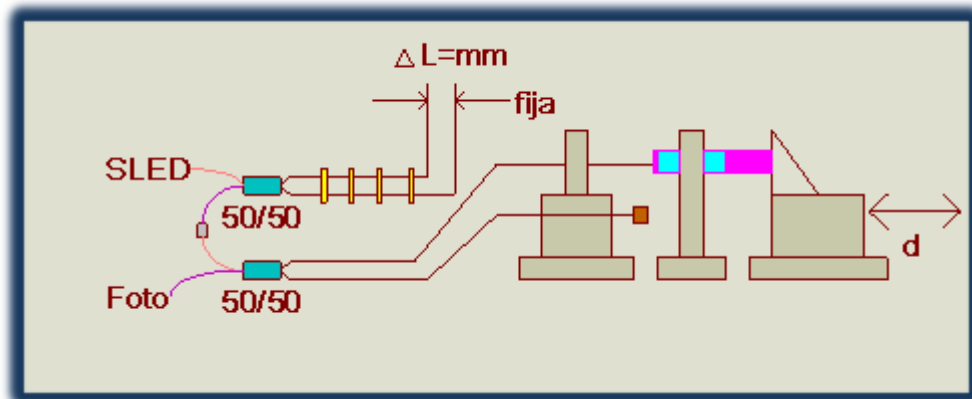


Figura 3.2 Esquema general de un Reflectómetro de baja coherencia.

#### b. Flexisensores

Estos sensores a diferencia de las galgas extensométricas están basados en la variación de la resistencia eléctrica de un área de material piezoresistivo. La aplicación de una fuerza al área activa de detección del sensor, se traduce en un cambio de la resistencia eléctrica en función inversamente proporcional a la fuerza aplicada en el área sensible. La propiedad resistiva de estos sensores se debe al material piezoresistivo intercalado entre dos piezas de poliéster flexible con conductores de plata impresa en el interior de cada mitad. Las pistas conductoras forman las conexiones eléctricas para los circuitos externos. El sensor resultante es papel fino de alrededor de ocho milésimas de pulgada de espesor y en la Figura 3.3 se muestra un Flexisensor [IX] y su área sensitiva, el material esta montado en materiales flexibles, de donde proviene su designación.

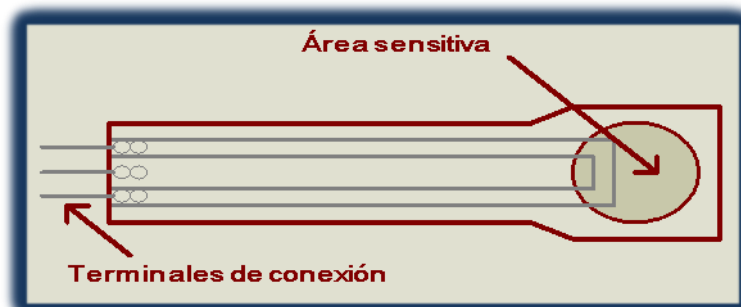


Figura 3.3 Esquema general de un Flexisensor

La Figura 3.3 muestra el área sensitiva, esta montado en materiales flexibles, de donde procede su designación.

### c. Sensores de proximidad

Existen dos tipos de sensores de proximidad, de acuerdo a su estructura el primero denominado capacitivo el otro inductivo. Primero hablaremos de los sensores de proximidad capacitivos.

El sensor de proximidad capacitivo está formado por dos electrodos concéntricos de metal que forman las placas de un capacitor. Este elemento es colocado como parte de un circuito oscilador. Cuando un objeto se aproxima a la superficie y éste entra al campo electrostático de los electrodos, cambia la capacitancia del circuito oscilador y esto hace que modifique su amplitud de oscilación y la etapa de amplificación de salida del sensor cambia. Cuando el objeto se aleja del sensor la amplitud del oscilador se reduce y por tanto la salida también.

Los sensores capacitivos dependen de la constante dieléctrica del objeto que “invade” las placas. Los materiales del objeto normalmente son metal, agua, papel o tela y son especificados para cada sensor capacitivo. La Figura 3.4 presenta el principio de funcionamiento de un sensor de proximidad capacitivo, se observa el generador de una señal oscilante y que genera un campo electrostático [X]. Una variante de este principio de funcionamiento es en la que esta fundado el acelerómetro, sensor que usaremos en el SIVEOC.

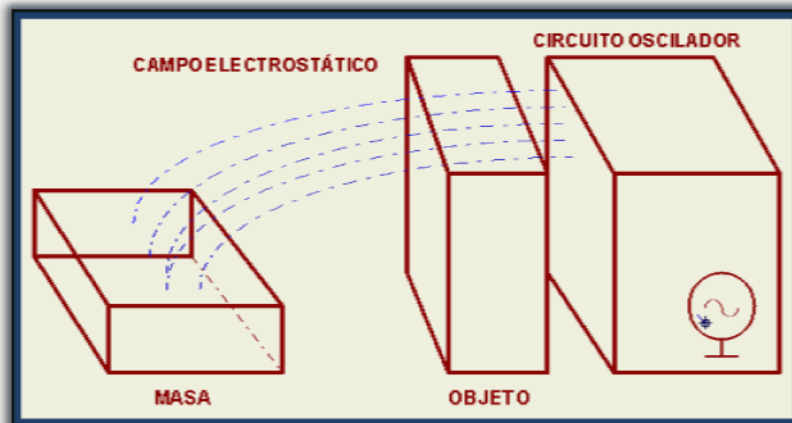


Figura 3.4 Esquema general de funcionamiento de un sensor de proximidad capacitivo.

Los sensores de proximidad inductivos han sido diseñados para trabajar generando un campo magnético y detectando las pérdidas de corriente del campo generadas al introducir objetos en el área del sensor [XI].

El sensor consiste de una bobina con núcleo de ferrita, un oscilador, un sensor de nivel de disparo de la señal y un circuito de salida, la Figura 3.5 muestra el esquema general de este sensor y sus partes, al acercarse el objeto a la cara sensible el oscilador cambia frecuencia de oscilación o amplitud de la misma, generando la respectiva salida diferencial, la etapa de salida con la referencia de nivel ajustada dará el disparo respectivo.

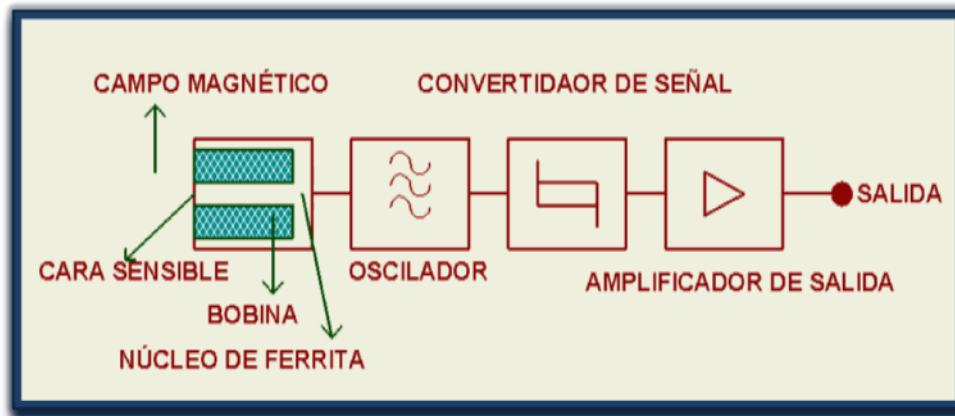


Figura 3.5 Esquema general de funcionamiento de un sensor de proximidad inductivo.

#### d. Galgas extensométricas

Los sensores basados en la variación de la resistencia eléctrica de un dispositivo, son los más abundantes. Esto se debe a que son muchas las magnitudes físicas que afectan el valor de la resistencia eléctrica de un material.

Para detectar la deformación que sufren las estructuras de obras civiles se utilizan galgas extensométricas. En 1856 Lord Kelvin descubrió que al aplicar una fuerza sobre un hilo conductor o un semiconductor se presenta una variación en su resistencia eléctrica<sup>3</sup>. Este principio permite realizar mediciones de fuerzas muy pequeñas que provoquen deformaciones en el conductor. La utilidad de este principio se manifiesta en la construcción de las galgas extensométricas.

Una galga extensométrica o “strain gage” es un dispositivo de medida universal, que se utiliza para la medición electrónica de diversas magnitudes mecánicas como la carga, presión, torque, deformación, posición, etc. Se concibe por strain o esfuerzo a la cantidad de deformación de un cuerpo debido a la fuerza aplicada sobre él. Estos dispositivos son transductores pasivos, que aplicados sobre un material, permiten medir la fuerza ejercida sobre él, a partir de la deformación resultante por fuerzas de compresión, tracción o torsión, estas deformaciones son transmitidas a la galga, respondiendo ésta con una variación de su propia resistencia eléctrica; la galga es un material conductor depositado en un sustrato, la Figura 3.6 es una imagen ampliada de una galga extensométrica, muestra el depositado y dimensiones generales del conductor; existe una variedad muy extensa de galgas, incluyendo arreglos serie, paralelo, medio puente y puente completo [XII].

<sup>3</sup> Lord Kelvin o William Thomson, fue un físico y matemático británico, realizó importantes trabajos en el campo de la termodinámica. En 1848 estableció la escala absoluta de temperaturas que lleva su nombre.



Figura 3.6 Galga extensométrica

El principio base de funcionamiento de una galga extensométrica es la respuesta mecánica que tiene al aplicarle fuerzas externas; es decir, como se comporta el material de la galga al estar bajo fuerzas externas, lo que termina traduciéndose en un cambio en su resistencia eléctrica.

#### e. Acelerómetro

Un acelerómetro es un dispositivo para medir la aceleración de un objeto al que va unido, lo hace midiendo respecto de una masa inercial interna. Los acelerómetros son sensores inerciales que miden la segunda derivada de la posición. Un acelerómetro mide la fuerza de inercia generada cuando una masa es afectada por un cambio de velocidad. Esto se mide en metros por segundo al cuadrado [ $m/s^2$ ]. Los acelerómetros pueden medir en uno, dos o tres ejes [XIII].

Su principio de operación se fundamenta en la segunda ley de Newton, descrita en 1687<sup>4</sup>, Principio fundamental de la dinámica, según el cual la aceleración que tiene un cuerpo es igual a la fuerza ejercida sobre él, dividida por su masa, la cual matemáticamente se expresa como:

$$F = m \cdot a \quad [2]$$

donde  $F$  es la fuerza,  $m$  es la masa y  $a$  es la aceleración de la gravedad.

Existen varios tipos de acelerómetros como son: acelerómetros mecánicos, piezoeléctricos, piezoresistivos, capacitivos, térmicos y acelerómetros micro mecánicos (MEMS).

La Tabla 1 muestra un resumen de los acelerómetros principales y sus aplicaciones, en la tabla g es la aceleración y un  $1g=9.81 [m/s^2]$ .

---

<sup>4</sup> Isaac Newton fue un físico y matemático inglés de los siglos XVII y XVIII (nació el 4 de enero de 1643 y murió el 31 de marzo de 1727 a los 84 años) conocido principalmente por: Establecer las bases de la mecánica clásica a través de sus tres leyes del movimiento y su ley de la gravitación universal.

Tipo	Margen de medida [g]	Ancho de banda [Hz]	Ventajas e inconvenientes	Aplicaciones
Mecánicos	0g - 200g	0 -100	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Alta sensibilidad</li> <li>- Costo medio</li> <li>- Uso sencillo</li> <li>- Baja temperatura</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Impacto</li> <li>- ABS</li> <li>- Airbag</li> <li>- Uso en automoción</li> </ul>
Piezoeléctricos	0g – 2000g	10 - 20000	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Sensibilidad media</li> <li>- Uso complejo</li> <li>- Bajas temperaturas</li> <li>- No funciona en continua</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Vibración</li> <li>- Impacto</li> <li>- Uso industrial</li> </ul>
Piezo-resistivos	0g – 2000g	0 -10000	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Respuesta en continua y alterna</li> <li>- Prestaciones medias</li> <li>- Bajo coste</li> <li>-Tamaño y peso mínimo</li> <li>- Alta sensibilidad</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Vibración</li> <li>- Impacto</li> <li>- Automoción</li> <li>- Biodinámica</li> <li>- Ensayos en vuelo</li> <li>- Test de túneles de viento</li> </ul>
Capacitivos	0g -1000g	0 - 2000	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Funciona en continua</li> <li>- Bajo ruido</li> <li>- Baja potencia</li> <li>- Bajo costo</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Uso general</li> <li>- Uso industrial</li> <li>- Sistemas de alarma</li> <li>- Mediciones sísmicas</li> </ul>
MEMS	1.5g – 250g	0.1 -1500	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Alta sensibilidad</li> <li>- Costo medio</li> <li>- Uso sencillo</li> <li>- Bajas temperaturas</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Impacto</li> <li>-Air bag</li> <li>- ABS</li> <li>-Uso en automación</li> </ul>

Tabla 1. Tipos principales de acelerómetros.

Existen dos parámetros principales para seleccionar el acelerómetro adecuado que son el rango de temperatura y frecuencia. Otros parámetros pueden ser el tamaño, resistencia a golpes y por último el precio.

Acelerómetro, descripción general del acelerómetro utilizado en el SIVEOC.

El acelerómetro ADX103/ADX203 [XIV] es de alta precisión, de bajo consumo de potencia, es un acelerómetro completo de doble eje y con una señal de salida acondicionada por voltaje, todo en un circuito integrado. El sensor es una estructura de poli silicio con una superficie micro mecanizada construido sobre una oblea de silicio. En su estructura interna los resortes de poli silicio suspenden la estructura sobre la superficie de la lámina y proporcionan una resistencia contra las fuerzas de aceleración. El diagrama de bloques de la Figura 3.7 muestra las partes que forman al acelerómetro, como se observa no solo es el sensor, el integrado contiene un acondicionamiento de la señal.

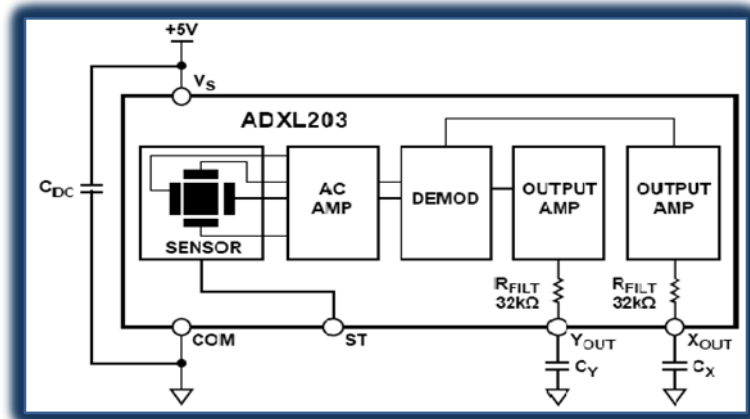


Figura 3.7 Diagrama de bloques del acelerómetro

El rango total de las medidas de aceleración positiva y negativa del acelerómetro va de  $\pm 1.7$  (g),  $\pm 5$  (g), o  $\pm 18$  (g). El ADX103 puede medir a la vez la aceleración dinámica (por ejemplo: vibración) y aceleración estática (por ejemplo: gravitatoria).

La base típica de ruido es de  $110 [\mu g/\sqrt{f}]$ , expresado en función de la gravedad y la frecuencia de ruido eléctrico, esto permite medir señales por debajo de 1mg (0.06 [°] de inclinación) en aplicaciones de detección de inclinación utilizando anchos de banda estrechos (menor a 60 [Hz]).

El usuario selecciona el ancho de banda del acelerómetro utilizando los capacitores  $C_x$  y  $C_y$  en las terminales de salida  $X_{OUT}$  y  $Y_{OUT}$ , para formar los filtros respectivos.

La deflexión de la estructura se mide usando un condensador diferencial que consta de placas fijas independientes y placas unidas a la masa en movimiento. Las placas fijas son polarizadas por ondas cuadradas con 180[°] fuera de fase. La aceleración desequilibra el capacitor diferencial, lo que resulta en una onda cuadrada de salida cuya amplitud es proporcional a la aceleración. Las técnicas de demodulación sensible a la fase se utiliza entonces para recuperar la señal y determinar la aceleración.

La salida del demodulador se amplifica y se lleva fuera del circuito a través de un resistor de 32 [kΩ]. En este punto, el usuario puede establecer el ancho de banda del dispositivo mediante la adición de un filtro, agregando el capacitor adecuado. Este filtrado mejora la resolución de medición. Un ancho de banda entre 0.5 [Hz] y 2.5 [kHz] puede seleccionarse, dependiendo la aplicación.

Un acelerómetro utiliza la fuerza de la gravedad como un vector de entrada para determinar la orientación de un objeto en el espacio. Es más sensible a la inclinación de su eje cuando es perpendicular a la fuerza de la gravedad, es decir, paralelo a la superficie de la tierra. En esta orientación, su sensibilidad a los cambios en la inclinación es más alta. Cuando el

acelerómetro está orientado en el eje de la gravedad, es decir, cerca de 1(g) o -1(g) de lectura, el cambio en la aceleración por grado de inclinación es muy bajo. Cuando el acelerómetro es perpendicular a la gravedad, su salida cambia de casi 17.5 (mg) por grado de inclinación. A los 45°, sus cambios de salida es de solo 12.2 (mg) por grado y esta sensibilidad va en descenso a mayor inclinación.

La Figura 3.8 muestra el ADXL203 descrito anteriormente. El ADXL103/ADXL203 está disponible en 5 [mm] X 5 [mm] X 2 [mm], al ser un sensor mecánico viene en un encapsulado o paquete especial llamado LLC cerámico de 8 terminales.

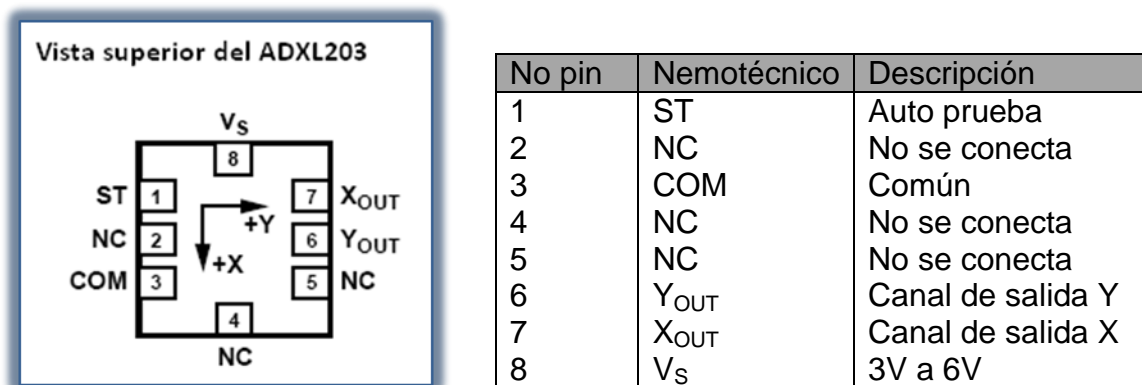


Figura 3.8 Acelerómetro, Integrado y descripción de terminales del ADXL203.

### 3.2. Microcontroladores

A nivel de hardware, y en una manera simple, un microcontrolador es un sistema electrónico digital en un circuito integrado, programable, que integra las unidades de memoria para el almacenamiento de datos y programa, unidad aritmética – lógica para el cálculo de operaciones, las unidades de entrada y salida para la comunicación con los otros periféricos y el mundo real, temporizadores, el controlador de interrupciones y una variedad de periféricos y registros de control muy amplia.

La memoria generalmente está constituida por memoria RAM compuesta por registros que almacenan datos temporales, y memoria EEPROM o FLASH para el almacenamiento del programa que se debe ejecutar y/o datos fijos o semifijos.

La unidad aritmética ALU es la encargada de realizar las operaciones aritméticas: suma, resta, multiplicación y las operaciones lógicas AND, OR, XOR, entre otras.

Las unidades entrada/salida se refieren a los puertos que tiene el microcontrolador para señales de entrada o salida.

En la Tabla 2 se muestran las especificaciones generales del PIC18F4550 utilizado en el SIVEOC. Microcontrolador de 8 bits, prestaciones

medias-altas o por arriba de un microcontrolador básico sin llegar a un alto desempeño. Destacamos: Interfaz USB 2.0 (12Mbit / s) de velocidad, 1Kbyte RAM de doble puerto + 1Kbyte de RAM de propósito general. Sistema de comunicación completa (full transceiver). Puerto de transmisión continua (búfer de datos). Velocidad de operación hasta de 48 [MHz] (ejecución de 12 millones de instrucciones por segundo).

<b>Características Generales</b>	<b>PIC18F4550</b>
Frecuencia de operación	Hasta 48 [MHz]
Memoria de programa (bytes)	32768
Memoria RAM de datos (bytes)	2048
Memoria EEPROM de datos (bytes)	256
Interrupciones	20
Líneas de entrada-salida	16
Temporizadores (timers)	4
Módulos de comparación/captura/PWM (CCP)	1
Canales de comunicación serie	MSSP,EUSART
Canal USB	1
Puerto paralelo de transmisión de datos (SPP)	1
Canales de conversión A/D de 10 bits	13
Comparadores analógicos	2
Juego de instrucciones	75 (83 ext.)

Tabla 2 Características generales del PIC18F4550.

En la actualidad la arquitectura de los microprocesadores ha cambiado sustancialmente, ver Figura 3.9 con la tecnología ARM denominada “Advanced RISC Machine” para designarlos como microprocesadores avanzados con instrucciones reducidas (RISC) y sus diferentes núcleos llamados Cortex.

ARM [XV] tiene por objeto estandarizar las estructuras de los microprocesadores de los múltiples fabricantes y con esta arquitectura se han logrado circuitos con procesadores múltiples (varios núcleos), buses tipo matriz y periféricos tan innovadores como complejos; como son: DMA (Direct Memory Access) es una característica esencial en todos los procesadores modernos, ya que permite a dispositivos de diferentes velocidades comunicarse sin someter a la CPU a una carga masiva de interrupciones. USB-OTG de alta velocidad (permite la conexión de dispositivos como huésped), Wireless (comunicación inalámbrica), Interface de cámaras, Ethernet, CAN (comunicación entre múltiples CPUs), son de bajo consumo y un conjunto de instrucciones inteligente. Incluso ya existen microcontroladores con sistemas operativos en tiempo real (RTOS), lo cual nos pone en la actualidad con oportunidad de velocidad y desarrollo de aplicaciones en sistemas muy amigables y productivos tipo Android o Windows, entre otros. En la figura 3.9 se observa un Cortex-A7, que es el núcleo genérico de la tarjeta Raspberry, como puede observarse puede crecer a formar un procesador de cuatro núcleos con sistema aritmético de punto flotante, memoria cache segmentada, etc.

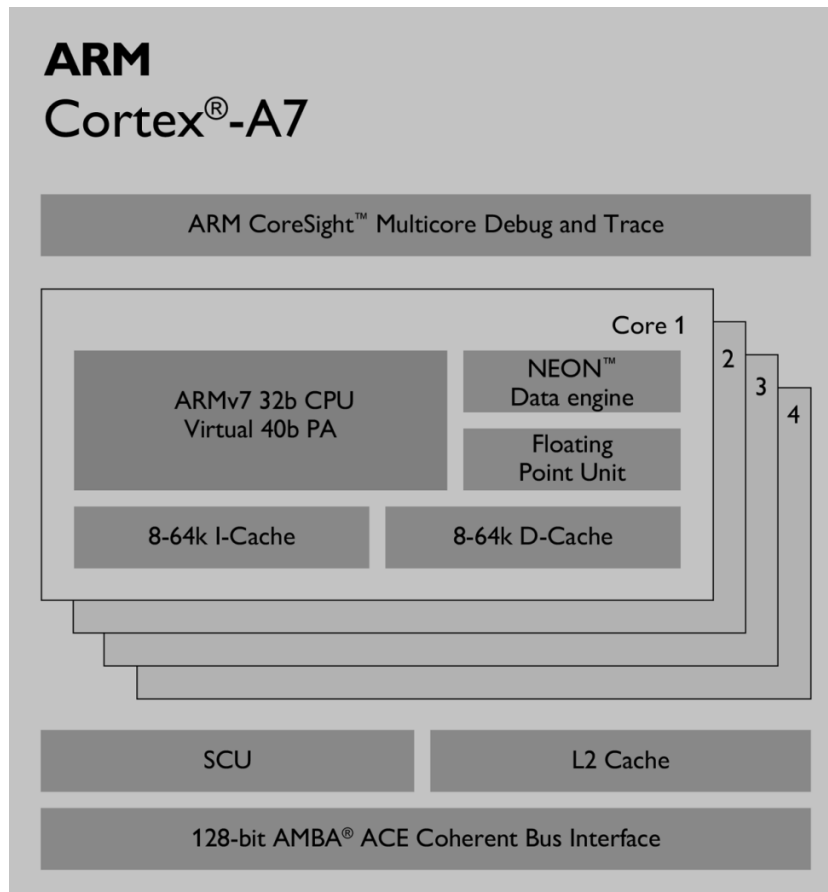


Figura 3.9 Arquitectura genérica ARM Cortex-A7.

En general las dos arquitecturas utilizadas por los fabricantes de microcontroladores son la arquitectura Von Neumann que comparte datos y direcciones en el mismo bus y arquitectura Harvard, esta consiste en que tiene dos buses (bus de datos y bus de direcciones) independientes que mejora la velocidad de transferencia de información interna, utilizaremos en el SIVEOC un microcontrolador con arquitectura Harvard. El bus de datos puede ser de 8, 16, 32 y 64 bits y el de direcciones depende de la cantidad de memoria del microcontrolador.

Los microcontroladores para secuenciar su funcionamiento y flujo de instrucciones tiene internamente un circuito de reloj implementado, el cual puede ser configurado totalmente interno, o que, al añadirle un circuito RC o un cristal se genera la frecuencia de reloj requerida para su funcionamiento.

Un microcontrolador a nivel de software dispone de un conjunto de instrucciones. Se programan con software especializado, desde lenguaje llamado alto nivel o de bajo nivel denominado ensamblador, este último utiliza instrucciones agrupadas en acrónimos llamados mnemónicos. Para grabar el programa en el microcontrolador se requiere traducir el programa realizado en lenguaje de alto nivel o ensamblador (código fuente) al llamado lenguaje de máquina, a este proceso de traducción se conoce como compilación y lo realizan programas denominados compiladores; el compilador no solo traduce al lenguaje de máquina sino que, analiza, detecta errores, sintetiza el archivo

final (código objeto), el cual será grabado en el microcontrolador en la memoria del mismo, ya sea EEPROM o FLASH.

Los parámetros que se deben considerar en un microcontrolador son:

- Bus de datos: 8,16, 32 y 64 bits
- Capacidad de memoria: Tamaño de la memoria RAM y EEPROM en Kilobytes (Kb).
- Velocidad de proceso: número de instrucciones a ejecutar por segundo.
- Puerto de entrada/salida.
- Módulos: para conversión A/D, D/A, PWM, USB, CAN, I2C, SPI, UART, USART, etc.

### 3.3 Comunicación Inalámbrica

La comunicación inalámbrica (Figura 3.10) permite el acceso e intercambio de la información en forma remota, sin la necesidad de conexión física con cable. Normalmente, la comunicación inalámbrica se realizaba mediante radio operando en diversas bandas de frecuencia o a través de dispositivos de comunicación basados en infrarrojos. La transmisión inalámbrica de datos y voz ha ido evolucionando en nuevos estándares, entre los que destacan el Bluetooth <sup>5</sup>, SCADA <sup>6</sup>, wifi <sup>7</sup>.

La radio frecuencia son formas de energía electromagnética identificadas por la siglas RF. Como se sabe la radiación es definida como la propagación de energía a través del espacio en forma de ondas o partículas, la radiación electromagnética se define como ondas de energía eléctrica y magnética moviéndose conjuntamente a través del espacio.

Las ondas de radiofrecuencia y la de microondas son generadas por el movimiento de cargas eléctricas en un material conductor o en una antena, logrando penetrar las nubes, la niebla y las paredes. Por ello el uso para la difusión de la radio, televisión, telefonía, telefonía móvil y en la aplicación de procesos de control industrial remota.

Se puede observar en la Figura 3.10 que se requiere de un llamado punto de acceso para entrar a la red, a partir del acceso se usa cualquier tipo de comunicación inalámbrica de las mencionadas para establecer relación entre dispositivos que comparten la red. El esquema general mostrado en la

---

<sup>5</sup> Bluetooth es una especificación industrial para Redes Inalámbricas Área Personal que posibilita la transmisión de voz y datos entre diferentes dispositivos mediante un enlace por radiofrecuencia en la banda de los 2.4 GHz.

<sup>6</sup> SCADA, acrónimo de Supervision, Control And Data Acquisition (Supervisión, Control y Adquisición de Datos) es un concepto que se emplea para realizar un software para procesadores que permite controlar y supervisar procesos industriales a distancia. Facilita retroalimentación en tiempo real con los dispositivos de campo (sensores y actuadores), y controla el proceso automáticamente.

<sup>7</sup> Wifi es un mecanismo de conexión de dispositivos electrónicos de forma inalámbrica (Wireless Fidelity).

Figura 3.10 muestra un ejemplo usando Ethernet y como las computadoras portátiles requieren de un punto de acceso para entrar a la red.

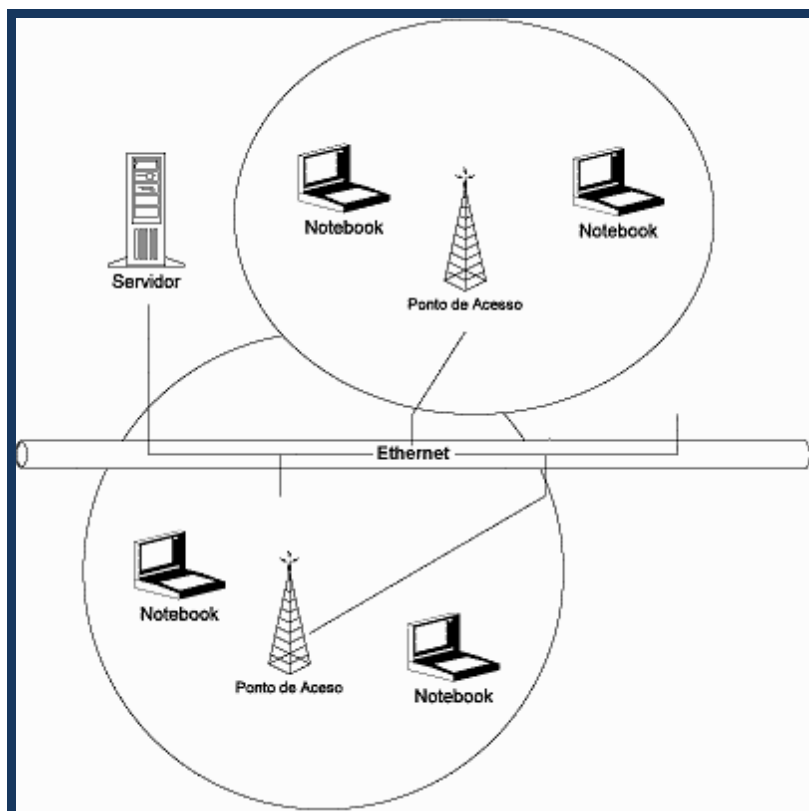


Figura 3.10 Esquema general de comunicación inalámbrica.

Comunicación inalámbrica por wifi.

El SIVEOC usa wifi, por lo que abundando en esta comunicación inalámbrica, mencionamos que: Proviene de una marca comercial WI-FI (Wireless Fidelity), creada por una unión de empresas en 1999, es una marca comercial registrada para comunicación inalámbrica. Surgió por la necesidad de establecer un mecanismo de conexión inalámbrica que fuese compatible entre distintos dispositivos y fomentar la tecnología inalámbrica asegurando la compatibilidad entre equipos. Existen diversos tipos de wifi, basado cada uno de ellos en el estándar IEEE 802.11 [XVI]. Son los siguientes:

- Los estándares IEEE 802.11b, IEEE 802.11g e IEEE 802.11n disfrutaron de una aceptación internacional debido a que la banda de 2.4 [GHz] está disponible casi universalmente, con una velocidad de hasta 11 [Mbit/s], 54 [Mbit/s] y 300 [Mbit/s], respectivamente.
- En la actualidad ya se maneja también el estándar IEEE 802.11ac, conocido como wifi 5, que opera en la banda de 5 [GHz] y que disfruta de una operatividad con canales relativamente limpios. La banda de 5 [GHz] ha sido recientemente habilitada y, además, no existen otras tecnologías (Bluetooth, microondas, ZigBee, WUSB) que la estén utilizando, por lo tanto existen muy pocas interferencias. Su alcance es algo menor que el de los

estándares que trabajan a 2.4 [GHz] (aproximadamente un 10 %), debido a que la frecuencia es mayor (a mayor frecuencia, menor alcance).

El Estándar IEEE 802.11 basa su protocolo de comunicación en los siguientes conceptos:

- **Estaciones:** computadoras o dispositivos con interfaz de red.
- **Medio:** se pueden definir dos, la radiofrecuencia y los infrarrojos.
- **Punto de acceso (AP):** tiene las funciones de un puente (conecta dos redes con niveles de enlaces parecidos o distintos), y realiza por tanto las conversiones de trama pertinente.
- **Sistema de distribución:** importantes ya que proporcionan movilidad entre AP, para tramas entre distintos puntos de acceso o con los terminales, ayudan ya que es el mecanismo que controla donde está la estación para enviarle las tramas.
- **Conjunto de Servicio Básico (BSS):** grupo de estaciones que se intercomunican entre ellas. Se define dos tipos:
  1. Independientes: cuando las estaciones, se intercomunican directamente.
  2. Infraestructura: cuando se comunican todas a través de un punto de acceso.
- **Conjunto de Servicio Extendido (ESS):** es la unión de varios BSS.
- **Área de servicio básico:** importante en las redes 802.11, ya que lo que indica es la capacidad de cambiar la ubicación de los terminales, variando la BSS. La transición será correcta si se realiza dentro del mismo ESS en otro caso no se podrá realizar.
- **Límites de la red:** los límites de las redes 802.11 son difusos ya que pueden traslaparse diferentes BSS.

### 3.4 Protocolos de comunicación

Un protocolo de comunicación [XVII] es un conjunto de reglas que permiten la transferencia e intercambio de datos entre los distintos dispositivos que forman parte de una red, la Figura 3.11 muestra el esquema general de las comunicaciones. Los elementos básicos que intervienen en la comunicación son el emisor, receptor, mensaje y medio. La transmisión de los datos puede ser de manera serie o paralelo. La transmisión serie se basa en enviar los bits uno a uno y se usa para transmitir a largas distancia. La transmisión paralela es aquella en la que los bits son enviadas de manera simultánea en varias líneas al mismo tiempo.

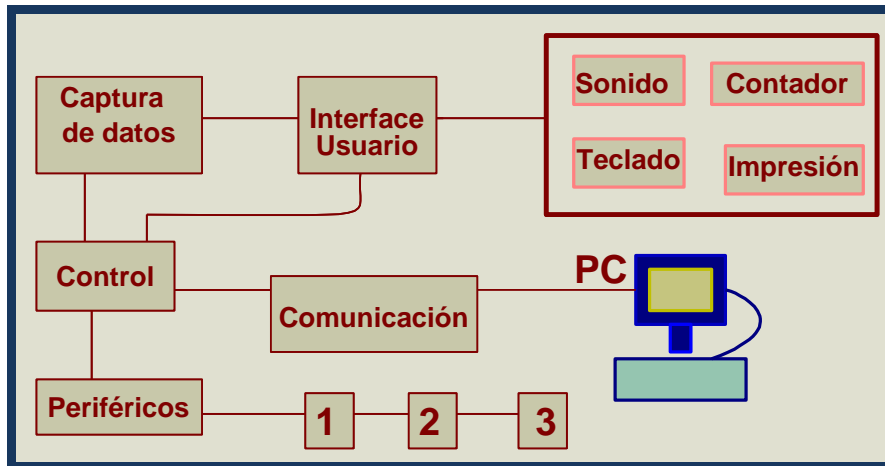


Figura 3.11 Protocolos de comunicación

Se enlistan los tipos de transmisión más comunes:

**Transmisión Simplex:** en este existe un solo nodo receptor y un solo nodo emisor, lo cual implica que la transmisión de datos sea en un solo sentido.

**Transmisión Half-Duplex:** la transmisión de datos se produce en ambos sentidos de manera alternativa.

**Transmisión Full-Duplex:** la transmisión de datos se da en ambos sentidos al mismo tiempo. La sincronización del emisor y receptor se logra mediante un protocolo de enlace, el cual es un conjunto de instrucciones destinadas que aseguran la correcta secuencia e integridad de datos transmitidos y recibidos.

Los datos son cifrados mediante códigos de comunicación, estos son dispositivos inteligentes que se encargan de convertir un carácter o símbolo en un código. Un código se define como un conjunto de significados que definen una serie de caracteres o símbolos. El uso de los códigos de comunicación hizo posible la automatización de los procesos industriales y las comunicaciones entre dispositivos.

Con la llegada de los microprocesadores a la industria, se ha posibilitado la integración de redes de comunicación con grandes ventajas:

Mayor precisión respaldada por la integración de tecnología digital en las mediciones.

Mejor disponibilidad de la información de campo

Diagnóstico remoto de los componentes

Raspberry Pi.

El SIVEOC utiliza una computadora Raspberry Pi, que fue lanzada en el 2006, es una computadora de placa reducida (computadora completa en un sólo circuito), su diseño se basa en un microprocesador con RAM (memoria de acceso aleatorio), E/S y todas las características de una computadora funcional

en una sola tarjeta. La tarjeta madre permite la conexión de tarjetas de extensión. Su base operativa es de código abierto, la llamada plataforma acepta diferentes sistemas operativos, en nuestro caso usaremos Raspbian [<sup>8</sup>], aunque permite otros sistemas operativos. La Figura 3.12 muestra la tarjeta Raspberry Pi.

Raspberry Pi es un desarrollo de Raspberry Pi Foundation en Reino Unido, una organización sin ánimo de lucro, con el objetivo de estimular la enseñanza de ciencias de la computación en las escuelas.

Raspberry Pi surge con la idea de apoyar al desarrollo de “pequeños proyectos hardware” y el aprendizaje de la programación o de un lenguaje de programación.

Esta tecnología fue diseñada con el fin de ser lo más barata posible y llegar al máximo número de usuarios. Aunque esta idea comenzó a gestarse sobre el año 2006, Raspberry Pi Foundation dio sus primeros pasos como fundación en 2008, y no fue hasta principios del año 2012 cuando se comercializaron las primeras Raspberry Pi.

En cuanto al hardware, podemos encontrar actualmente varios modelos de Raspberry: los modelos iniciales A y B. El que tenemos para aplicar en el SIVEOC es la Raspberry Pi modelo 2 B, existen más actuales.

Este modelo que usaremos cuenta con unas dimensiones de placa de 8.5 (cm) por 5.3 (cm) con las siguientes características: Tiene un microprocesador integrado Broadcom BCM2836, de 4 núcleos, contiene un procesador ARM Cortex-A7 con varias frecuencias de funcionamiento, un procesador gráfico de video Core IV, y una memoria RAM de 1 (GByte).

Esta computadora Raspberry Pi presenta una salida de audio y vídeo a través de un conector HDMI, lo que permite que podamos conectar la tarjeta tanto a monitores como a televisiones que cuenten con una conexión de este tipo. Contiene además: Una salida de vídeo compuesto y una salida de audio a través de un conector mini jack, cuatro puertos USB, un puerto Ethernet, conector para cámara, conector para display, y el puerto de propósito general (GPIO). En la Figura 3.12 podemos ver cómo se encuentran distribuidos todos estos elementos. La Figura 3.12a muestra el puerto de entrada/salida de propósito general (GPIO) con el que se hará enlace con la adquisición de datos del microcontrolador en el SIVEOC.

---

<sup>8</sup> Raspbian es una distribución del sistema operativo GNU/Linux y por lo tanto libre basado en Debian Wheezy (Debian 7.0) para la computadora de placa reducida Raspberry Pi, orientado a la enseñanza de informática. El lanzamiento inicial fue en junio de 2012.

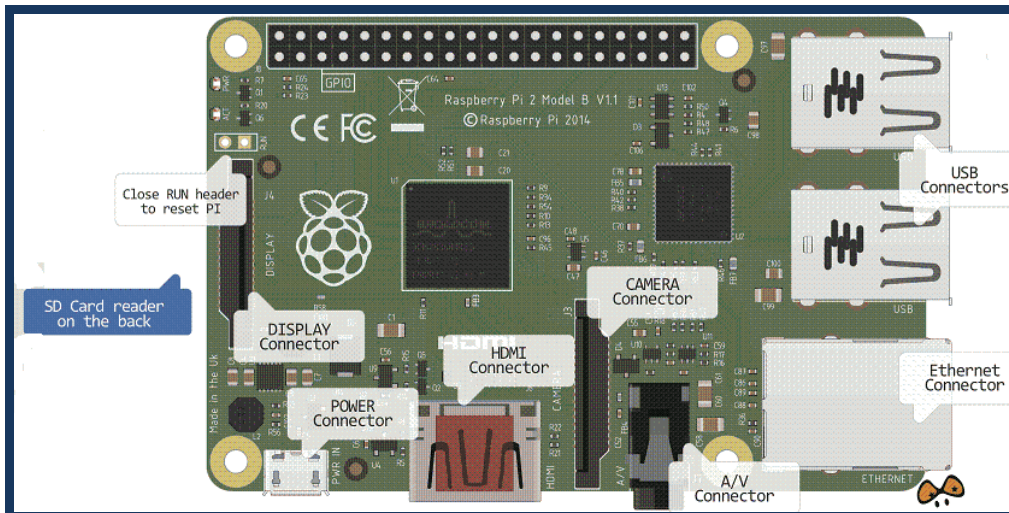


Figura 3.12 Descripción general de partes de la Raspberry PI

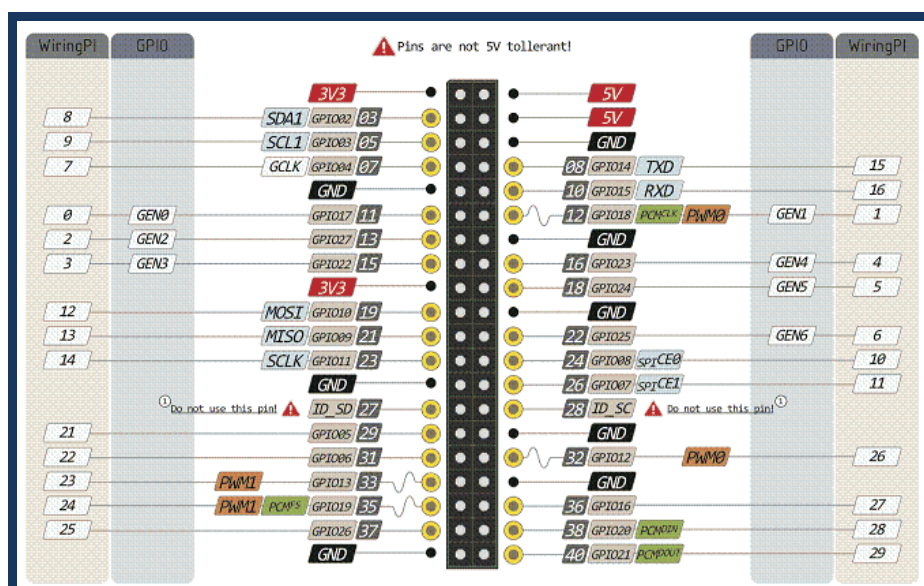


Figura 3.12a. Puerto de entrada/salida de propósito general (GPIO)

Las Figuras 3.12 y 3.12a muestran la disposición general de partes de las Raspberry puertos de entrada /salida de propósito general (GPIO) de la Raspberry, ubicación de terminales y sus posibles funciones, todas controladas por programa, este puerto será la interfaz para recibir por la Raspberry el dato digital del acelerómetro.

### 3.5 Sistema de control embebido

Los sistemas embebidos controlan y monitorean las actividades, almacenando y procesando datos, reduciendo sustancialmente el tiempo de cálculo, es decir, es la combinación de software y hardware de computadoras y algunas partes mecánicas para una función en específico. Estas computadoras contienen microprocesadores que a su vez integran interfaces de entrada/salida en el mismo circuito integrado o en una placa de circuito impreso. Así mismo, estos sistemas cuentan con interconexiones externas para comunicación y control del mismo y/o sistemas externos.

Cabe señalar que un sistema embebido tiene una característica importante: funcionalmente no depende de un sistema externo, tiene una capacidad de sentido autónomo e independiente; aunque interactúa con otros sistemas, siendo otra cualidad su flexibilidad. Los componentes más usados para diseñar sistemas embebidos son los microcontroladores ( $\mu C$ ), microprocesadores ( $\mu P$ ), matrices de compuertas lógicas programables (FPGA), procesadores digitales de señales (DSP), entre otros.

A pesar de no ser muy nombrados los sistemas embebidos se encuentra en nuestra vida diaria, desde vehículos, teléfonos celulares e incluso algunos electrodomésticos como refrigeradores y hornos de microondas.

La aplicación de sistemas embebidos en sistemas complejos implica el desarrollo de protocolos y funciones criptográficas de comunicación. El diseño de un producto que contenga un sistema embebido está orientado a minimizar costos y maximizar la confiabilidad, pero es esencial incluir códigos de seguridad, incluyendo funciones y protocolo criptográficos que protejan la información durante todas las fases.

Una de las ventajas de los sistemas embebidos es su flexibilidad, cuando se realiza una modificación es más sencillo modificar unas líneas del código al software del sistema embebido que reemplazar todo el circuito.

Los sistemas embebidos son usados comúnmente en sistemas en tiempo real, entendiéndose como sistemas en tiempo real aquellos sistemas en donde el dominio del tiempo es vital para el correcto funcionamiento.

Los sistemas en tiempo real necesitan realizar ciertas operaciones o cálculos en un tiempo límite. Ese tiempo límite resulta crucial.

Un sistema embebido dependiendo de los requerimientos específicos de la aplicación que se quiere implementar.

Los sistemas embebidos los encontramos en nuestra vida cotidiana como en los electrodomésticos, en sistemas de riego, en sistemas de iluminación, en videocámaras, en los climas de edificios y casas particulares, puertas y cortinas automáticas, entre otros, lo que muestra la Figura 3.13, nos da una panorámica de aplicaciones de estos sistemas; al ser sistemas integrados y de funciones dedicadas los limita aparentemente, sin embargo, con las interfaces actuales, son expandibles a funciones que se pueden reprogramar, ampliar y agregar nuevas; son actualmente sistemas no solo integrados, además son modulares.

Podemos expresar que así como se generó el fenómeno de “software libre”, los sistemas embebidos [XVIII] van a lo que se puede denominar ya como “hardware libre”.

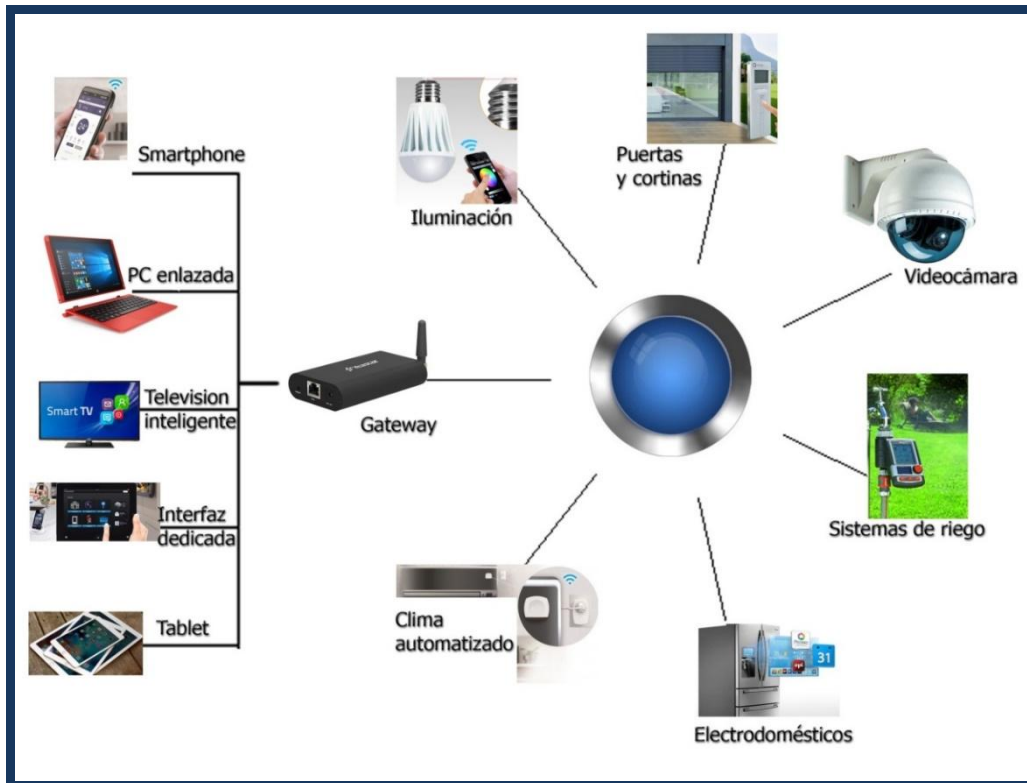


Figura 3.13 Sistemas embebidos, un panorama general de sus aplicaciones.

# Capítulo 4 Desarrollo

## 4.1. Diagrama de bloques específico.

El **SIVEOC** está constituido de tres bloques y su fuente de alimentación: sensor, adquisición de datos y software apropiado para la interpretación de los datos.

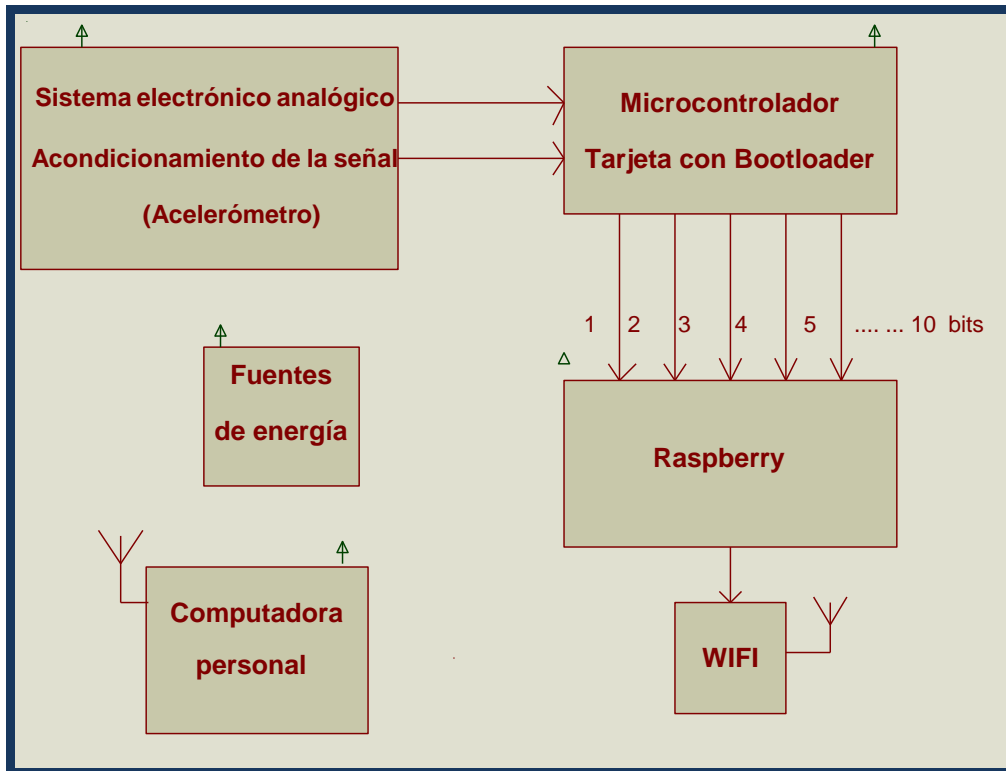


Figura 4.1 Diagrama de bloques del SIVEOC

Se realizó el cambio de sensor debido a que la galga extensométrica presenta desventajas respecto al acelerómetro, entre otras: repetitividad de mediciones, requirió de un amplificador mecánico, obligó al uso de un buen amplificador de instrumentación. En cambio el acelerómetro muestra el movimiento presente en la estructura por mínima que este sea. Así mismo, se agregó la transmisión inalámbrica, con el objetivo de conectar el sistema en lugares remotos sin la necesidad de tener cableado o la Computadora personal (PC).

De manera general el proyecto está constituido de un sistema electrónico analógico (acondicionador de la señal del acelerómetro), tarjeta bootloader, (que solo utiliza el microcontrolador para convertir el dato analógico a digital), Raspberry y PC.

## 4.2. Descripción de partes que forman al sistema.

### a. Sistema electrónico analógico (tarjeta de acondicionamiento de señal del acelerómetro).

En la tarjeta de acondicionamiento de la señal o sistema electrónico analógico se encuentra instalado el acelerómetro, el cual se encarga de medir el movimiento de la estructura.

La medición del movimiento de la estructura civil es mediante el acelerómetro ADXL203, que es un sensor capacitivo. El acelerómetro capacitivo basa su funcionamiento en la variación de la capacidad de dos o más conductores entre los que se encuentra un dieléctrico, en respuesta a la variación de la aceleración. Lo forma una serie de filamentos finos, con una masa central, cada uno actúa como una placa de un condensador variable, de placas paralelas. La aceleración o desaceleración del sensor, ejerce una fuerza a la masa central. Al moverse libremente, la masa desplaza las minúsculas placas del condensador, provocando un cambio de capacidad. Este cambio de capacidad es detectado y procesado para obtener un voltaje de salida. El ADXL203 puede detectar movimiento en dos ejes "X" y "Y".

Como se muestra en la Figura 4.2, la tarjeta que acondiciona la señal del acelerómetro consta de los siguientes elementos: un circuito temporizador (LM555)[XIX], fuente de alimentación de precisión (LT1461)[XX], amplificador de diferencia y filtro capacitivo.

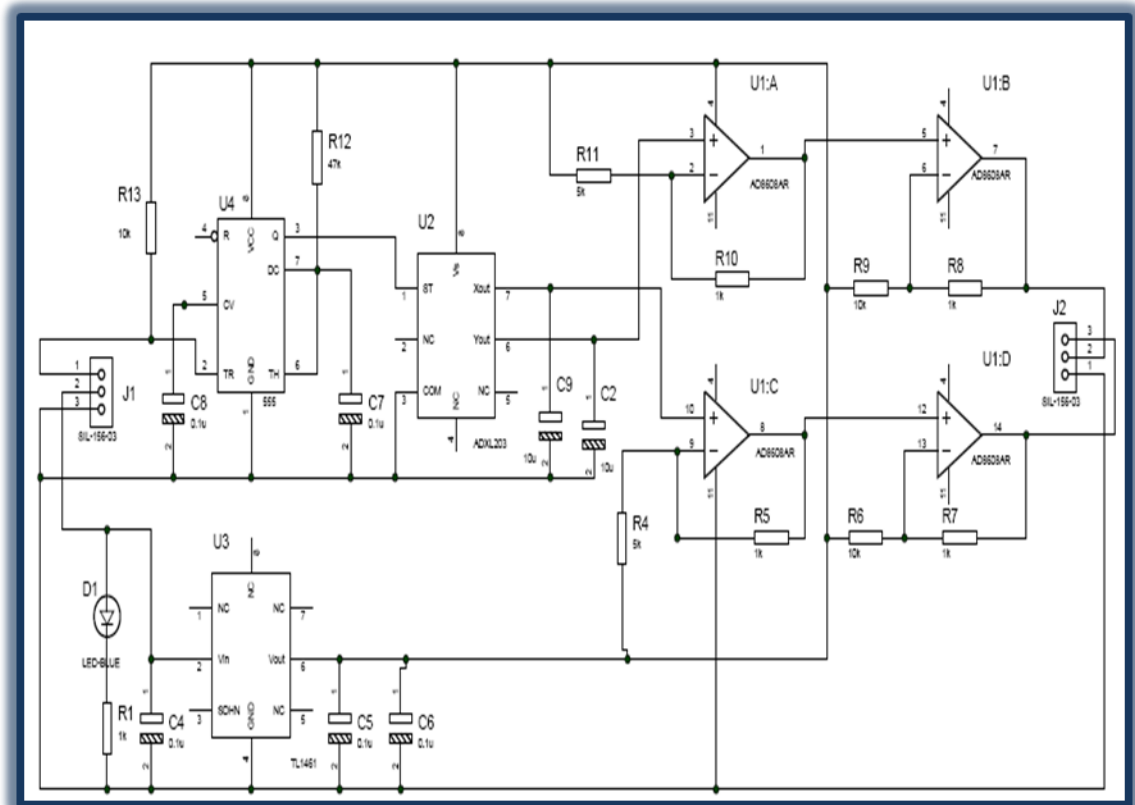


Figura 4.2 Sistema electrónico analógico (SEA)

El oscilador realizado con el 555 es conectado a la terminal de auto prueba (terminal 1 del acelerómetro) para generar un pulso y comprobar que el acelerómetro esté funcionando correctamente. La salida del acelerómetro, ya sea "X" o "Y" se amplifican por dos etapas diferenciales realizadas con amplificadores operacionales AD8608AR [XXI]. Para obtener la ganancia de amplificación del sistema electrónico analógico (SEA) se realiza el análisis siguiente:

La etapa de amplificación, dada por los amplificadores operacionales U1:A y U1:B es igual a la etapa formada por U1:C y u1:D. Analizando la etapa U1:A y U1: se tiene que la corriente en la terminal (-) de U1:A (ley de corriente de Kirchhoff):

$$\frac{V_{cc} - V_x}{R_{11}} = -\frac{V_{op1} - V_x}{R_{10}} \quad [3]$$

De [3] se obtiene:

$$V_{op1} = \left(1 + \frac{R_{10}}{R_{11}}\right) V_x - \frac{R_{10}}{R_{11}} V_{cc} \quad [4]$$

Donde  $V_{op1}$  es el voltaje de salida de U1:A y  $V_{cc}$  es 2.5V voltaje de salida del regulador de precisión LT1461,  $R_{10}$  y  $R_{11}$  son de 1kΩ y 5kΩ respectivamente.

La salida de la segunda etapa de amplificación (U1:B) esta descrita por la ecuación [6]. Se tiene que en la terminal (-) de U1:B, de acuerdo a ley de corrientes de Kirchhoff:

$$\frac{V_{cc} - V_{op1}}{R_9} = -\frac{V_{op2} - V_{op1}}{R_8} \quad [5]$$

Sustituyendo y simplificando [5]:

$$V_{op2} = V_{out} = \left(1 + \frac{R_8}{R_9}\right) V_{op1} \quad [6]$$

Donde  $R_8$ ,  $R_9$  son 1kΩ y 10kΩ.  $V_{op2}$  es el voltaje de salida del SEA ( $V_{out}$ ).

Realizando la manipulación matemática y sustituyendo valores se tiene que el voltaje de salida SEA está representado por la [7].

$$V_{out} = 1.32V_x - 0.8 \quad [7]$$

Por tanto, la ganancia de voltaje de salida del SEA, para cualquiera de los ejes del acelerómetro está dado por la ecuación [8].

$$V_{XY} = (V_{out} + 0.8)/1.32 \quad [8]$$

Donde  $V_{XY} = V_X = V_Y$  es el voltaje de salida de las terminales del acelerómetro para cada eje respectivamente.

Para fijar la respuesta en frecuencia en el acelerómetro se coloca un filtro pasivo, este se realiza colocando capacitores en las terminales  $X_{OUT}$  y  $Y_{OUT}$  del sensor manteniendo un ancho de banda de 0.5 (Hz), de tal manera que no será afectado por ruido de otras frecuencias. La ecuación [9] muestra el cálculo del ancho de banda.

$$B_W = 1/(2\pi * 32000 * 0.000010) = 0.5 \text{ (Hz)} \quad [9]$$

Ecuación definida por el fabricante del ADXL203.

El circuito impreso que contiene el SEA, se muestra en este Capítulo 4, Figura 4.10 sección A. La conexión del SEA dentro de todo el esquema del SIVEOC se muestra en la Figura 4.3.

Las terminales de salidas del sistema SEA (ejes X y Y del acelerómetro) se conectaron a los canales A0 y A1 del microcontrolador (terminales 2 y 3); el objetivo es realizar la conversión de la señal analógica a digital para que la Raspberry la reciba en esta forma.

b. Tarjeta Bootloader (microcontrolador).

En la tarjeta Bootloader se encuentra grabado un programa que nos permite convertir la señal acondicionada del acelerómetro a un formato digital de 10 bits. Para ello se utiliza el convertidor analógico digital del microcontrolador PIC18F4550 [XXII], este módulo convierte una señal de entrada analógica a su correspondiente número binario de 10 bits. La implementación de este proceso de conversión se realizó mediante la programación en el sistema de desarrollo que provee Microchip (MPLab) [XXIII]. Usando como voltaje de referencia del convertidor la fuente del circuito 5[V], tenemos una resolución de 0.004883 [V/bit] de acuerdo a [10].

$$R_{AD} = V_{CC}/(2^{10}) = 0.004883 \frac{V}{bit} \quad [10]$$

El diagrama de flujo de la conversión analógica/digital se muestra a continuación, el código utilizado para la conversión de la señal analógica del microcontrolador está en los anexos, El convertidor se configuró para tener el formato en 10 bits con el bit menos significativo a la derecha, la conversión es recurrente y como se puede observar, el dato digital que toma la Raspberry siempre es el más actual. Como todo sistema tiene su tiempo de respuesta, en este caso la rutina de conversión tarda 5 [µS] en actualizar el dato en los puertos del microcontrolador, a este tiempo se va agregar el tiempo en que la Raspberry tarda en adquirir y enviar el dato a la PC, la suma de estos dos tiempos dan el tiempo de respuesta del SIVEOC para adquirir la deformación de la estructura civil y por tanto será el límite de respuesta del mismo.

El uso de esta tarjeta con el microcontrolador PIC18F4550, tiene la ventaja de tener una interfaz USB y la programación del microcontrolador es muy sencilla. El microcontrolador se graba el programa de aplicación el mismo, contiene un programa residente que realiza esta función, no requiere de un programador externo, de ahí el nombre de bootloader; cualidad que simplifica el desarrollo e implementación de la programación.

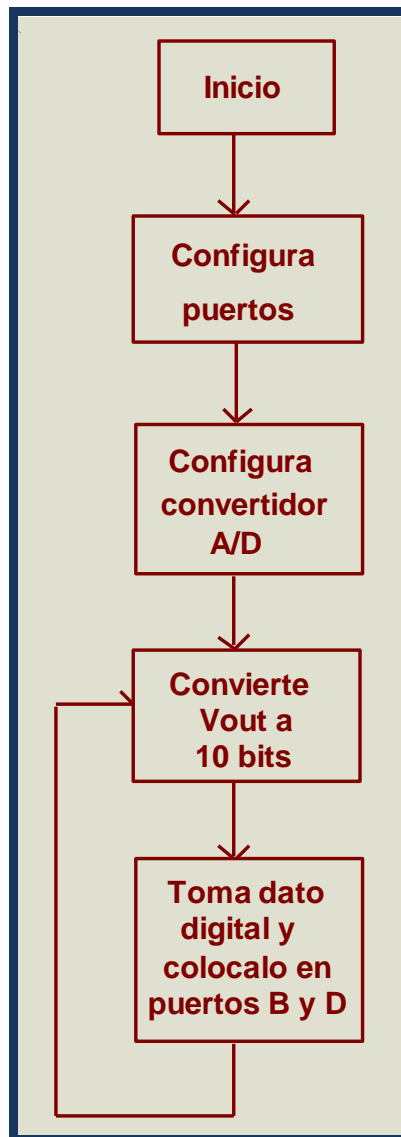


Figura 4.3. Diagrama de flujo de la conversión A/D del dato.

La salida digital del microcontrolador (10 bits), corresponden del dato0 al dato7 en el puerto D0 al D7, y los datos dato8 y dato9 a las salidas B0 y B1 del microcontrolador. Estos datos los recibe la Raspberry en las entradas GPIO2, ..., GPIO11 respectivamente del puerto de entrada general GPIO; esto se muestra en la Figura 4.9, diagrama esquemático general del SIVEOC. Los datos tomados por la Raspberry se guardan en un archivo .txt y envían vía wifi a la PC, lo cual mostramos en el Capítulo 5. De acuerdo a pruebas de laboratorio, el tiempo que tarda en actualizarse el dato en la salida del

microcontrolador es de 5 [μS], con el reloj del sistema bootloader de 20MHz. El diagrama esquemático de la tarjeta bootloader y su placa de circuito impreso se muestran en las Figuras 4.5 y 4.6.

Esta tarjeta fue desarrollada en la Carrera de Ingeniería en Sistemas Electrónicos Industriales, plantel Centro Histórico; para fines de enseñanza de microcontroladores.

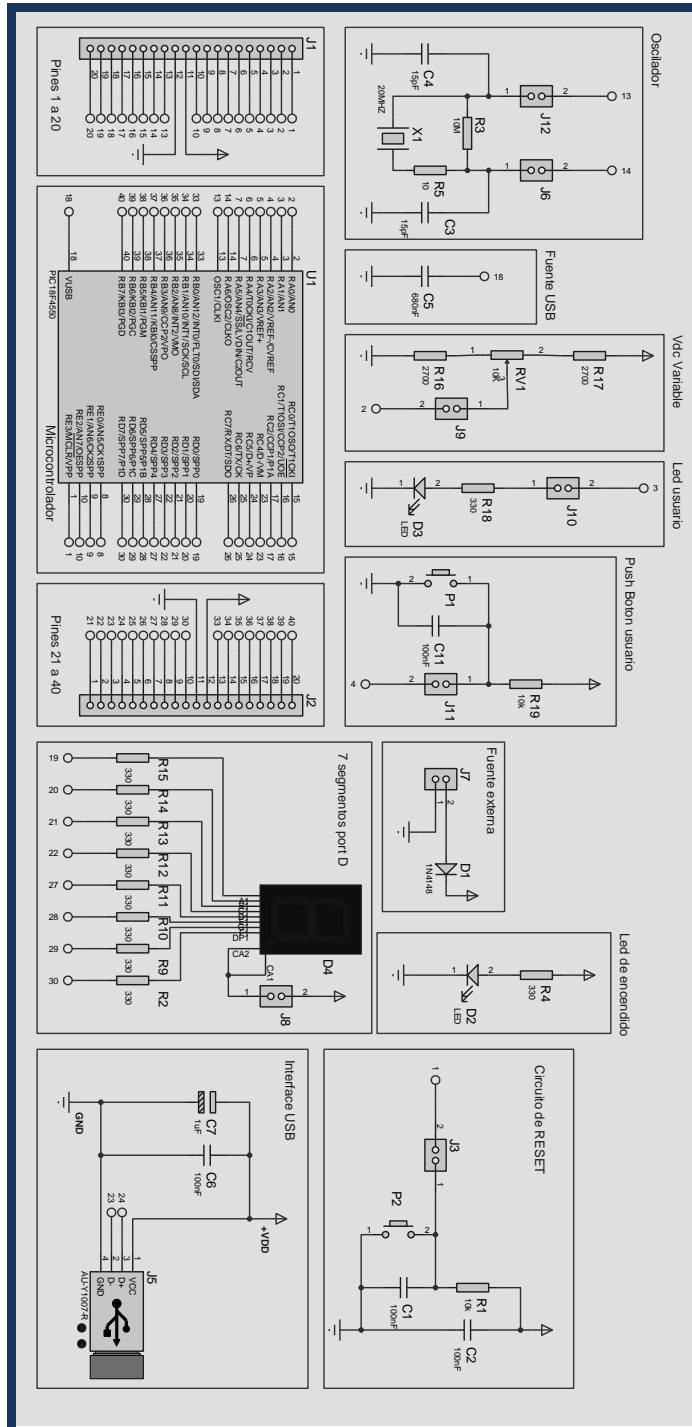


Figura 4.5. Diagrama Esquemático de tarjeta Bootloader.

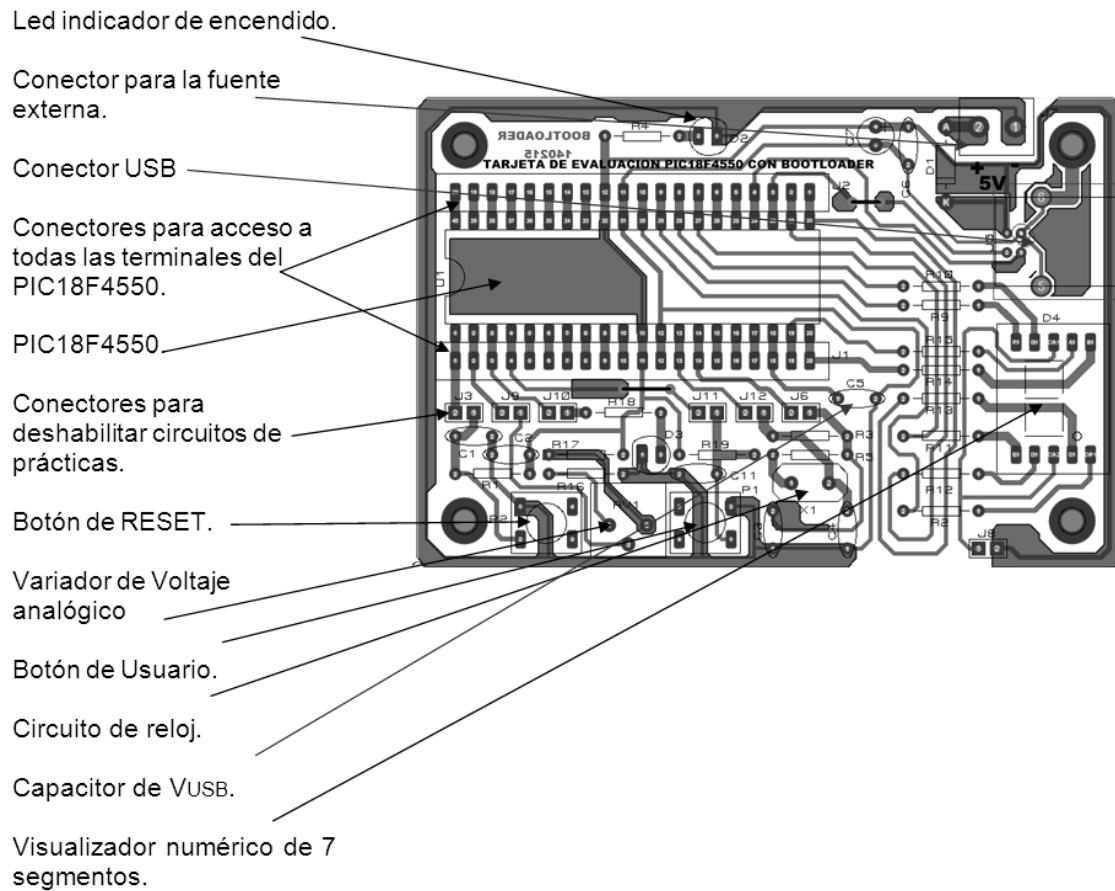


Figura 4.6. Circuito impreso tarjeta Bootloader. PIC18F4550.

### c. Tarjeta Raspberry

Esta tarjeta tiene como sistema operativo el Raspbian[XXIV], es ambiente tipo Windows, en el cual se implementaron programas para la aplicación y uso de la tarjeta. Se describió esta tarjeta en el Capítulo 3. El programa de adquisición de los datos que ingresan por los GPIO respectivos, se desarrolló en la aplicación PYTHON3 [XXV] (interface de lenguaje C, con su compilador respectivo), este programa adquiere el dato, le da un formato y lo almacena en un archivo de texto; además, le agrega la fecha y hora de la adquisición. Este archivo de texto es transmitido a la PC vía la interface wifi de la tarjeta Raspberry. Todo este proceso se muestra en la Figura 4.7, el código respectivo se describe en los anexos. La conexión entre esta tarjeta y la PC se realizó mediante dos paquetes de software VNCserver[XXVI]y WinSCP[XXVII], se describirán adelante.

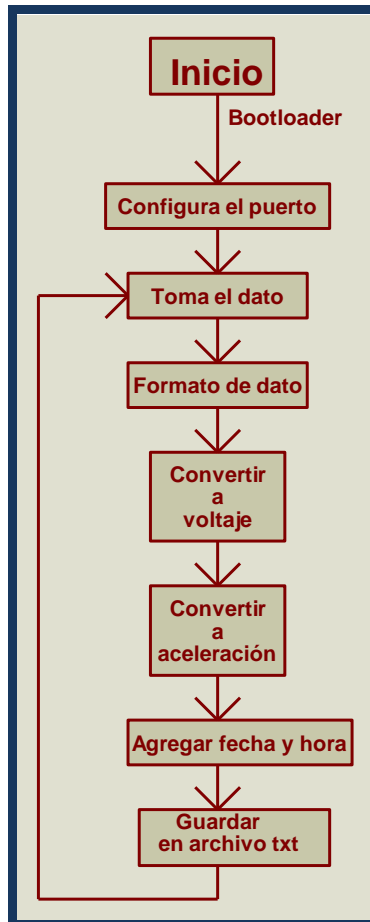


Figura 4.7. Diagrama de flujo de formato de datos para ser enviados a la PC.

#### d. Computadora Personal (PC)

El enlace inalámbrico entre la Raspberry y la PC se realiza mediante dos programas, el programa de comunicación y administración remota de la Raspberry **VNCserver**, el cual genera un enlace de comunicación genérica entre máquinas; en este caso se habilita en ambas máquinas, la Raspberry como servidor (con el comando **tightvncserver**) y la PC como usuario (se inicia **VNCserver** en la PC y se da de alta el enlace como usuario pi). El **VNCserver** genera una máquina virtual que nos permite visualizar y operar (administrar) la Raspberry desde la PC. **VNCserver** es software libre y trabaja en LINUX. VNC son las siglas en inglés de la (Virtual Network Computing) computadora Virtual en Red, es un programa basado en una estructura cliente-servidor que permite tomar el control del servidor (computadora) remotamente a través de un cliente (computadora). El protocolo de comunicación que se eligió entre la Raspberry y la PC con el VNCserver es el SSH (Secure Shell) [XXVIII] por ser un intérprete de órdenes seguro, es el nombre de la comunicación para plataformas Windows 32 bits y Unix. Esta herramienta permite acceder a sistemas que no sean compatibles 100%.

Para la presentación de datos, el archivo de texto que almacena la información recabada por la raspberry se transmite a la PC con el programa

WinSCP, que hace uso de la comunicación SSH, la interface es tipo Windows, similar al explorador de archivos; de tal manera que en pantalla de la PC se pueden observar las dos máquinas (Raspberry y PC) haciendo muy simple el intercambio de archivos entre ellas. Este archivo de texto con los datos de aceleración (g) ya en la PC se procesa en una hoja de Excel para mostrar de manera gráfica el movimiento inercial de la estructura civil. Es importante mencionar que esta es una manera de las varias que se pueden implementar para recabar y presentar los datos, más adelante daremos un panorama de otras formas posibles en que este sistema puede adquirir y presentar datos.

A manera de resumen el proceso de funcionamiento del SIVEOC sigue el diagrama de flujo mostrado en la Figura 4.8.

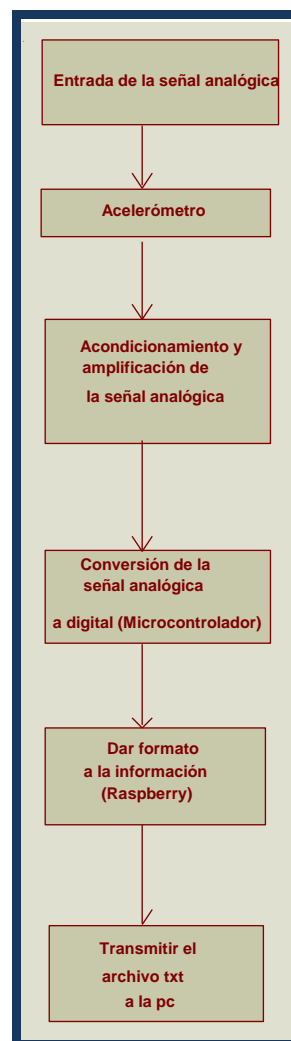


Figura 4.8. Flujo de la información adquirida hasta su localización en la PC.

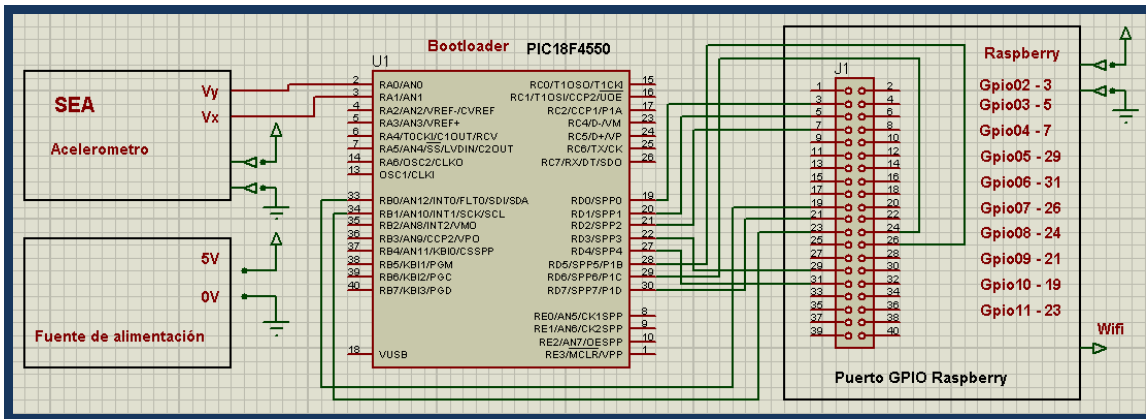


Figura 4.9. Diagrama Esquemático total del SIVEOC, se muestran las terminales de interconexión y la salida wifi de comunicación con la PC.

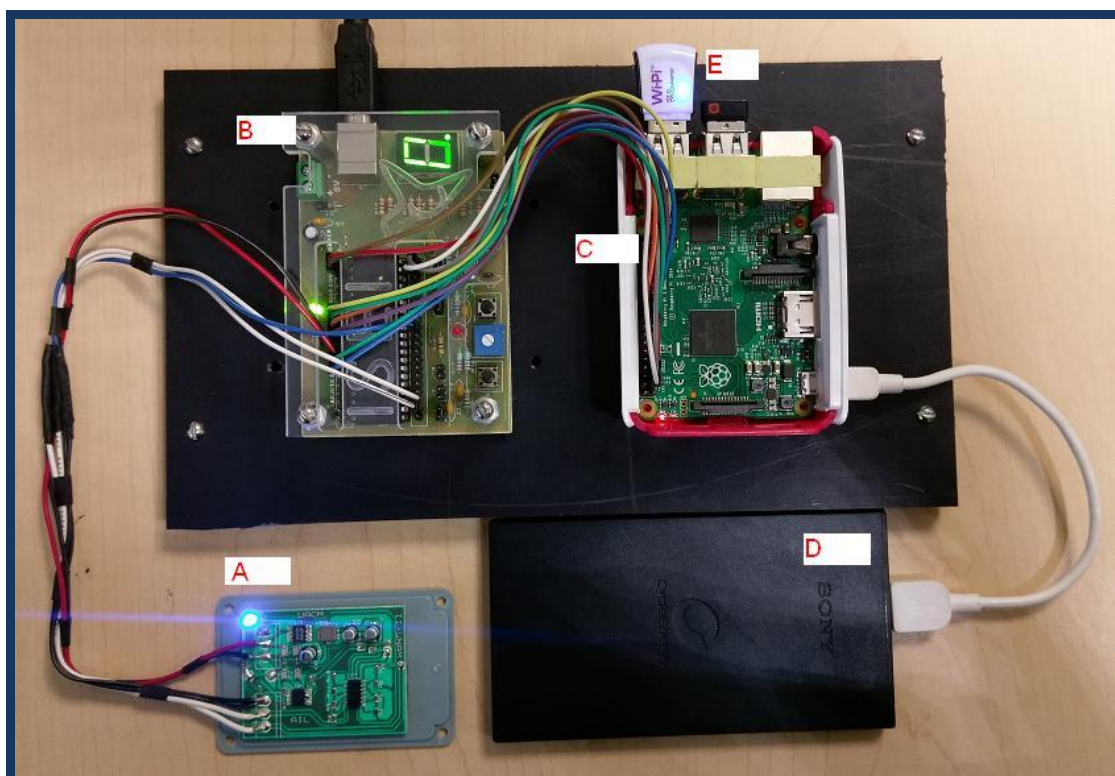


Figura 4.10. Componentes que forman el SIVEOC.

La Figura 4.10 muestra los siguientes subsistemas:

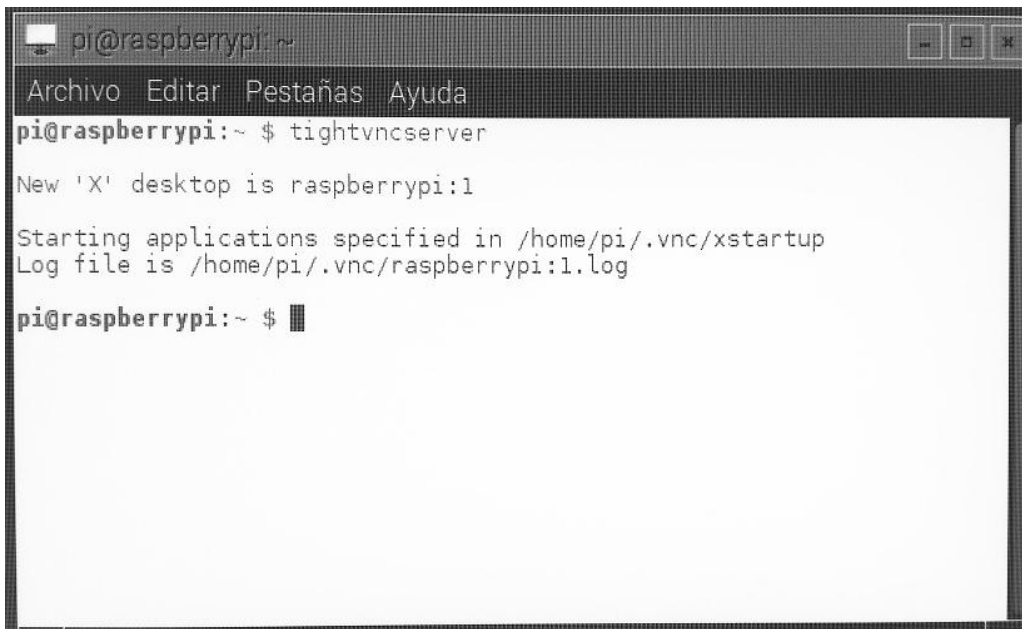
- Sistema electrónico analógico (tarjeta del acelerómetro ADLX203)
- Microcontrolador PIC18F4550 (tarjeta Bootloader)
- Raspberry Pi (que da formato a la información y la transmite a la PC)
- Batería (alimentación general del sistema)
- Red inalámbrica del sistema (wifi)

Como ya mencionamos, aquí se presenta una manera de adquirir el dato de la aceleración inercial de la estructura civil. Se ha elegido por su simplicidad y con el objetivo de demostrar la adquisición de los datos. Otras formas para adquirir los datos pueden ser: que la Raspberry envíe los datos en tiempo real ("data logger" en tiempo real), que el SIVEOC envíe la información a un sitio

Web y los usuarios los adquieran desde esa base, que el SIVEOC envíe los datos a un correo electrónico, que el SIVEOC envíe los datos a un teléfono celular.

Para el SIVEOC, la forma ejemplificada en este Capítulo de presentar los datos, el flujo de funcionamiento es como sigue:

1. Al encender el sistema, La señal acondicionada y en formato digital se presenta en el puerto GPIO de la **Raspberry**, de manera recurrente.
2. Al encender el SIVEOC, la **Raspberry** y la PC se conectan a la red compartida por ambas, se inicia el protocolo **SSH** en la **Raspberry**, en la consola o terminal ejecutando en la línea de comandos **tightvncserver**, utilizaría que debe cargarse previamente al sistema **Raspbian**. La Figura 4.11 muestra la consola de comandos con la orden y como Raspberry responde, colocándose como servidor.



```
pi@raspberrypi:~  
Archivo Editar Pestañas Ayuda  
pi@raspberrypi:~ $ tightvncserver  
New 'X' desktop is raspberrypi:1  
Starting applications specified in /home/pi/.vnc/xstartup  
Log file is /home/pi/.vnc/raspberrypi:1.log  
pi@raspberrypi:~ $ █
```

Figura 4.11 Terminal de raspberry con tightvncserver

3. Como la Raspberry es el servidor del SIVEOC, se tiene que iniciar siempre con **tightvncserver**, La PC se registra como cliente con la dirección IP de la Raspberry, se realiza en el software VNCviewer. En este paso hay que introducir la clave y contraseña para entrar al servidor y abrir a usuarios el acceso a este servidor. Lo cual se muestra en la Figura 4.12.



Figura 4.12. Colocando a la Raspberry como servidor.

4. En la PC con VNCviewer, el visualizador nos permite tomar control de la Raspberry, entrando como usuario. La Figura 4.13 muestra la pantalla principal de la PC ya visualizando la Raspberry en una ventana, indica que hemos tomado la administración o control del SIVEOC. Teniendo el control del servidor desde la PC remota se procede a capturar los datos que están presentes en el GPIO de la Raspberry. Para ello hay que ejecutar el archivo Python correspondiente. En este caso hay que entrar a Python 3 y seleccionar el archivo **pylab4.py**. Se corre este programa, el cual desplegará los datos siguientes:

- Fecha
- Hora
- Una etiqueta de dato y
- La aceleración

En la Figura 4.13 ya se muestra que se toma el control de la Raspberry desde la PC, se presenta la ventana principal de la Raspberry, desde este ambiente tomamos el control del SIVEOC.

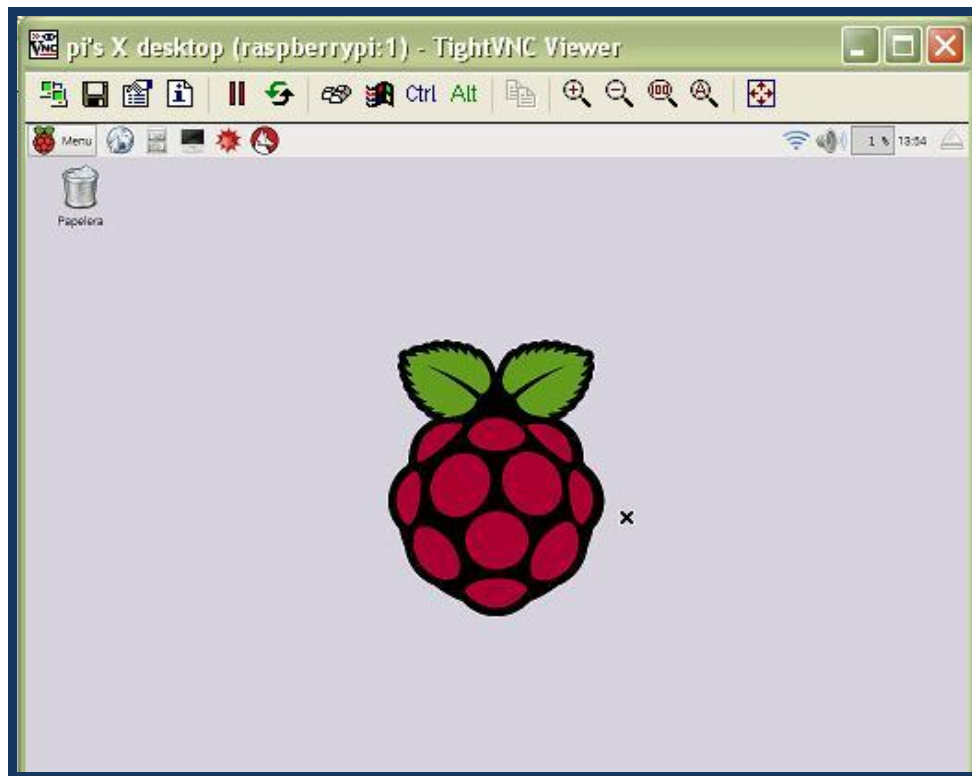


Figura 4.13 Ventana principal de Raspberry vista desde la PC.

La Figura 4.14 muestra un segmento del programa de adquisición de datos del SIVEOC, escrito en lenguaje Python tres, el listado completo esta en el ANEXO I.

```
# Genera la cuenta decimal de la conversión AD
cuenta = a*2**0 + b*2**1 + c*2**2 + d*2**3 + e*2**4 + f*2**5 + g*2**6 + h*2**7 +
i*2**8 + j*2**9
# Convertir la cuenta al voltaje analógico de salida de la tarjeta del
acelerómetro
    Vas = cuenta * 5 / 1024
# Convertir la salida de la tarjeta del acelerómetro a aceleración
# Vax = (Vas + 1.578)/1.309 Ecuación 7 del SIVEOC
Vax = (Vas+0.8)/1.32
 $V_{XY} = (V_{out} + 0.8)/1.32 \text{ ---} \rightarrow \text{ec. 7}$ 

# incrementa el dato, prueba fin del lazo
dato = dato + 1
```

Figura 4.14. Segmento de programa de adquisición de datos del SIVEOC en Python, el listado completo está en el ANEXO I.

Al correr el programa de adquisición, estos se guardan en el archivo txt, de acuerdo al diagrama de flujo que mostramos en la Figura 4.7 y que se genera con los comandos logger y formatter respectivos de Python. Las Figuras 4.14, 4.15 y 4.16 muestra la ventana del programa, la ejecución del mismo y la carpeta donde se guarda el archivo .txt, de esta carpeta se descargará el archivo que contiene los datos a la PC.

```

Python 3.4.2 (default, Oct 19 2014, 13:31:11)
[GCC 4.9.1] on linux
Type "copyright", "credits" or "license()" for more information.
>>> ===== RESTART =====
>>>
Fecha          Hora          Aceleración
2016-11-15 14:28:19,263 - dato - 2.4551120607333843
2016-11-15 14:28:19,329 - dato - 2.4551120607333843
2016-11-15 14:28:19,349 - dato - 2.4551120607333843
2016-11-15 14:28:19,372 - dato - 2.4551120607333843
2016-11-15 14:28:19,393 - dato - 2.410349837662338
2016-11-15 14:28:19,418 - dato - 2.410349837662338
2016-11-15 14:28:19,442 - dato - 2.410349837662338
2016-11-15 14:28:19,465 - dato - 2.410349837662338
2016-11-15 14:28:19,483 - dato - 2.4476516902215435
2016-11-15 14:28:19,510 - dato - 2.4476516902215435
2016-11-15 14:28:19,532 - dato - 2.4476516902215435
2016-11-15 14:28:19,556 - dato - 2.4476516902215435
2016-11-15 14:28:19,575 - dato - 2.4476516902215435
2016-11-15 14:28:19,596 - dato - 2.4476516902215435
2016-11-15 14:28:19,615 - dato - 2.4476516902215435
2016-11-15 14:28:19,634 - dato - 2.4476516902215435
2016-11-15 14:28:19,654 - dato - 2.410349837662338
2016-11-15 14:28:19,674 - dato - 2.410349837662338
2016-11-15 14:28:19,694 - dato - 2.410349837662338
2016-11-15 14:28:19,714 - dato - 2.410349837662338
2016-11-15 14:28:19,733 - dato - 2.406619652406417
2016-11-15 14:28:19,754 - dato - 2.406619652406417
2016-11-15 14:28:19,785 - dato - 2.406619652406417
2016-11-15 14:28:19,807 - dato - 2.406619652406417
2016-11-15 14:28:19,837 - dato - 2.4849535427807488

```

Figura 4.15 Visualizador (Debugging), programa en ejecución.

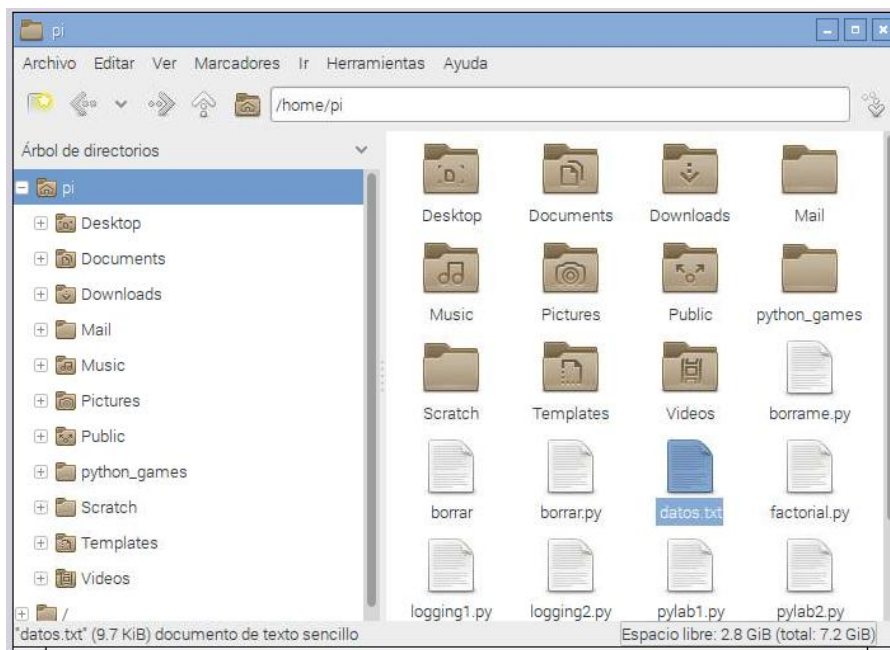


Figura 4.16 Ruta donde se guarda el archivo txt con los datos del SIVEOC.

- Para descargar el archivo de datos del servidor a nuestra PC se corre en la PC la aplicación WinSCP, colocar la dirección del servidor (Raspberry) y la clave de acceso. Se abre una doble ventana donde se muestran las dos máquinas. Seleccionar el archivo txt de la Raspberry y con el icono de Download (descargar) llevarlo a la PC. De esta manera los datos ya están en la PC para su formato, presentación e interpretación.

Hay que introducir la clave y usuario.

- Usuario:pi
- Clave: rosa

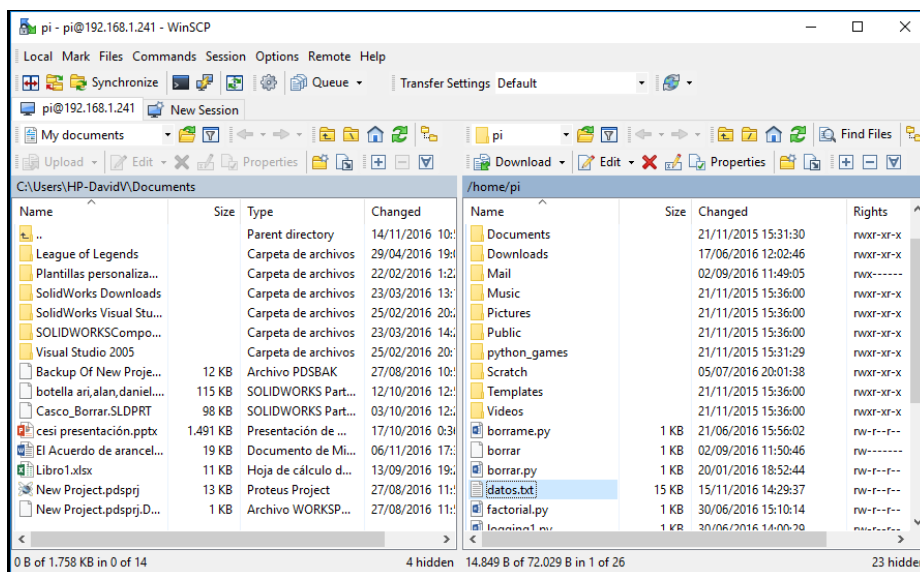


Figura 4.17. Transmisión del archivo a la PC (descarga).

Es importante mencionar que la interpretación de datos adquiridos por el SIVEOC; la deformación en los ejes X, Y o Z, está relacionada con la estructura específica y la posición dentro de la misma; ya que se deben hacer las relaciones de los datos adquiridos, con las fuerzas, momentos y cortantes a los que está sujeta la estructura, y por tanto solo se presentan los datos adquiridos sin hacer interpretación de los mismos, se deja para trabajos a futuro sus relaciones con las fuerzas actuantes sobre la estructura.

Tomando en cuenta el comentario anterior, en el siguiente Capítulo se presentan los resultados adquiridos a través de este sistema.

# Capítulo 5 Presentación de Datos

## 5.1 Tabla de datos y gráficas

Como mencionamos anteriormente, la presentación aquí mostrada es una manera simple para demostrar la funcionalidad del sistema, no restrictiva del mismo, tiene la finalidad de presentar las partes del sistema y su potencial, explotando su funcionalidad e independencia, dado que es un sistema embebido y remoto de adquisición de datos. Se presenta como un punto de partida para la adquisición del dato y su presentación. A partir de este ejercicio sencillo se pueden generar otras formas de adquisición de los datos, las cuales mencionaremos en las Conclusiones de este documento. El hecho de tener la administración del sistema de manera remota, también se podrían utilizar otras terminales del GPIO de la Raspberry para tener control pleno de la conversión de datos por parte del microcontrolador, cambiando el programa Python respectivo o generando otros programas.

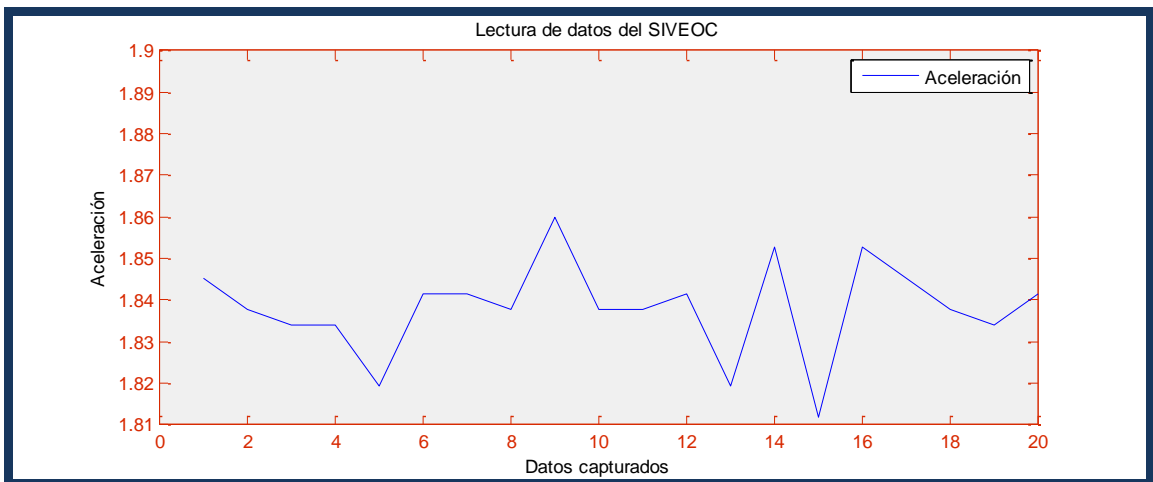
Los datos que han sido adquiridos vía inalámbrica y con un formato inicial; ya en nuestra PC se pueden llevar a un programa específico; en este caso el programa Excel, tablas 3 y 4.

Se presentan a continuación tres ejercicios de los datos obtenidos por el SIVEOC, se agrega una gráfica en cada ejercicio para visualizar la variación de aceleración de la estructura con respecto al tiempo.

Fecha	Hora	Aceleración
15/11/2016	16:21:03,540	1.845259233
15/11/2016	16:21:03,567	1.837861032
15/11/2016	16:21:03,585	1.834161932
15/11/2016	16:21:03,605	1.834161932
15/11/2016	16:21:03,624	1.81936553
15/11/2016	16:21:03,641	1.841560133
15/11/2016	16:21:03,666	1.841560133
15/11/2016	16:21:03,695	1.837861032
15/11/2016	16:21:03,718	1.860055634
15/11/2016	16:21:03,739	1.837861032
15/11/2016	16:21:03,761	1.837861032
15/11/2016	16:21:03,782	1.841560133
15/11/2016	16:21:03,803	1.81936553
15/11/2016	16:21:03,824	1.852657434
15/11/2016	16:21:03,842	1.81196733
15/11/2016	16:21:03,867	1.852657434
15/11/2016	16:21:03,886	1.845259233
15/11/2016	16:21:03,903	1.837861032
15/11/2016	16:21:03,921	1.834161932

15/11/2016 | 16:21:03,939 | 1.841560133

Tabla 3 Datos obtenidos por el SIVEOC en tiempo real ejercicio 1.

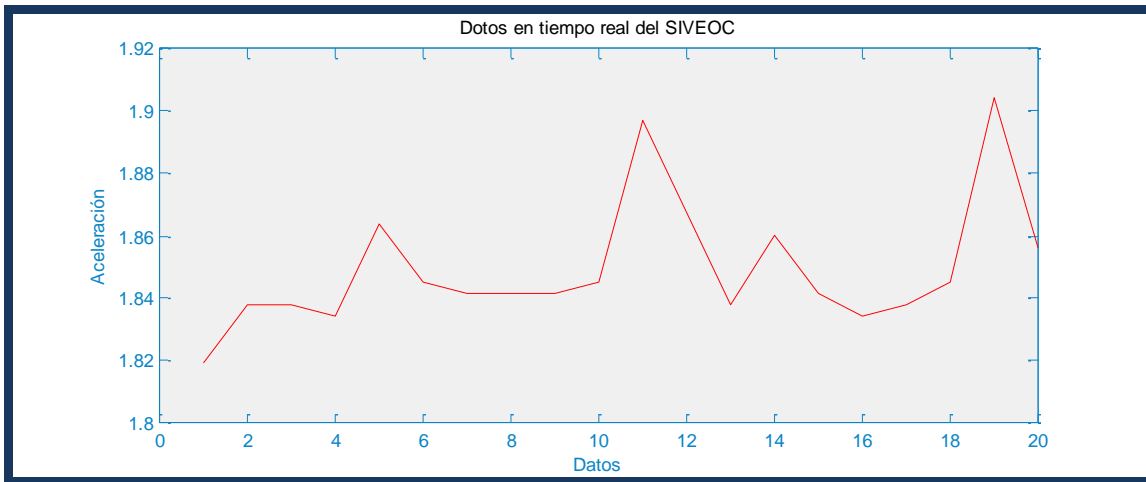


Grafica 1. Datos obtenidos del SIVEOC de la Tabla 3.

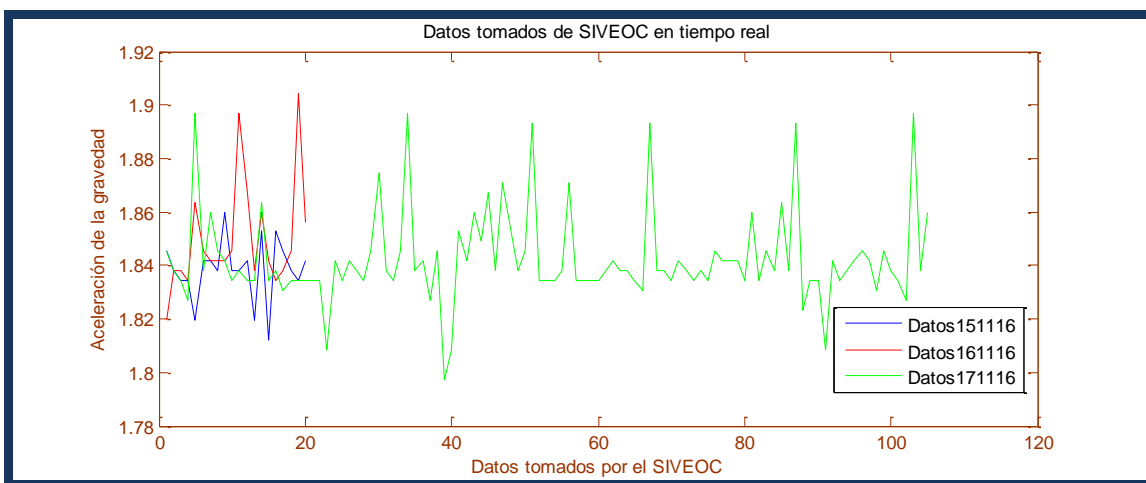
El tiempo de captura de dato de la Grafica 1 es de un promedio de 20 milisegundos basado a las lecturas de tiempo mostrado en la Tabla 3.

Fecha	Hora	Aceleración
16/11/2016	16:23:53,071	1.81936553
16/11/2016	16:23:53,110	1.837861032
16/11/2016	16:23:53,135	1.837861032
16/11/2016	16:23:53,152	1.834161932
16/11/2016	16:23:53,173	1.863754735
16/11/2016	16:23:53,191	1.845259233
16/11/2016	16:23:53,212	1.841560133
16/11/2016	16:23:53,231	1.841560133
16/11/2016	16:23:53,256	1.841560133
16/11/2016	16:23:53,280	1.845259233
16/11/2016	16:23:53,298	1.897046638
16/11/2016	6:23:53,315	1.867453835
16/11/2016	16:23:53,336	1.837861032
16/11/2016	16:23:53,353	1.860055634
16/11/2016	16:23:53,373	1.841560133
16/11/2016	16:23:53,392	1.834161932
16/11/2016	16:23:53,414	1.837861032
16/11/2016	16:23:53,433	1.845259233
16/11/2016	16:23:53,454	1.904444839
16/11/2016	16:23:53,479	1.856356534

Tabla 4 Datos obtenidos del SIVEOC en tiempo real segundo ejercicio.



Gráfica 2. Datos tomados por el SIVEOC de la tabla 4.



Gráfica 3. Datos del SIVEOC en tiempo real, resumen de los tres ejercicios.

Para, finalmente, cerrar este Capítulo, mostramos en las Figuras 5.1 y 5.2 imágenes en tiempo real de oscilogramas de las salidas analógicas de la tarjeta SEA, para hacer una relación con lo mostrado en las Gráficas 1, 2 y 3 anteriores.

De las pruebas realizadas, se encontró que la adquisición del dato toma un tiempo promedio de 20 [milisegundos], mejorarlo esta en los trabajos a futuro.

Se probó al SIVEOC a una distancia de 15 [metros] de la PC y los datos se obtuvieron sin problema, este alcance depende de la red inalámbrica a que estemos conectados.

Se realizaron pruebas en la red inalámbrica del plantel Centro Histórico de la Universidad con resultados intermitentes, por la saturación de la misma, el SIVEOC se desconecta de la red y los datos se pierden.

Se realizaron pruebas usando un teléfono celular como Router y los resultados se obtuvieron siempre.

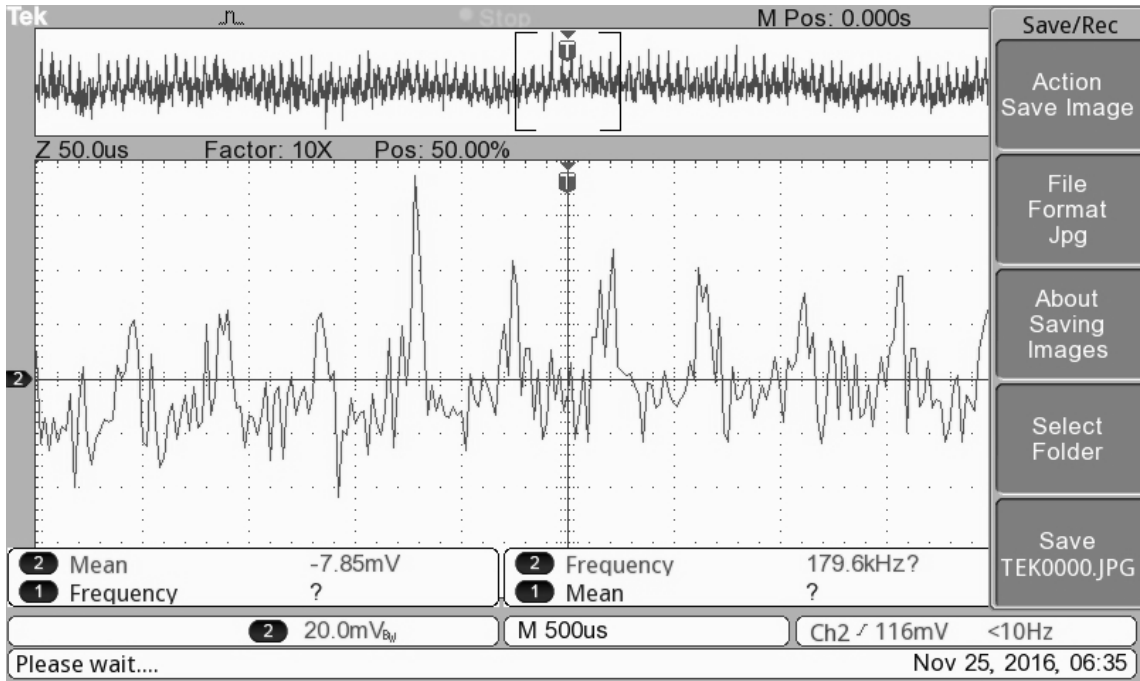


Figura 5.1 Voltaje de salida del SEA.

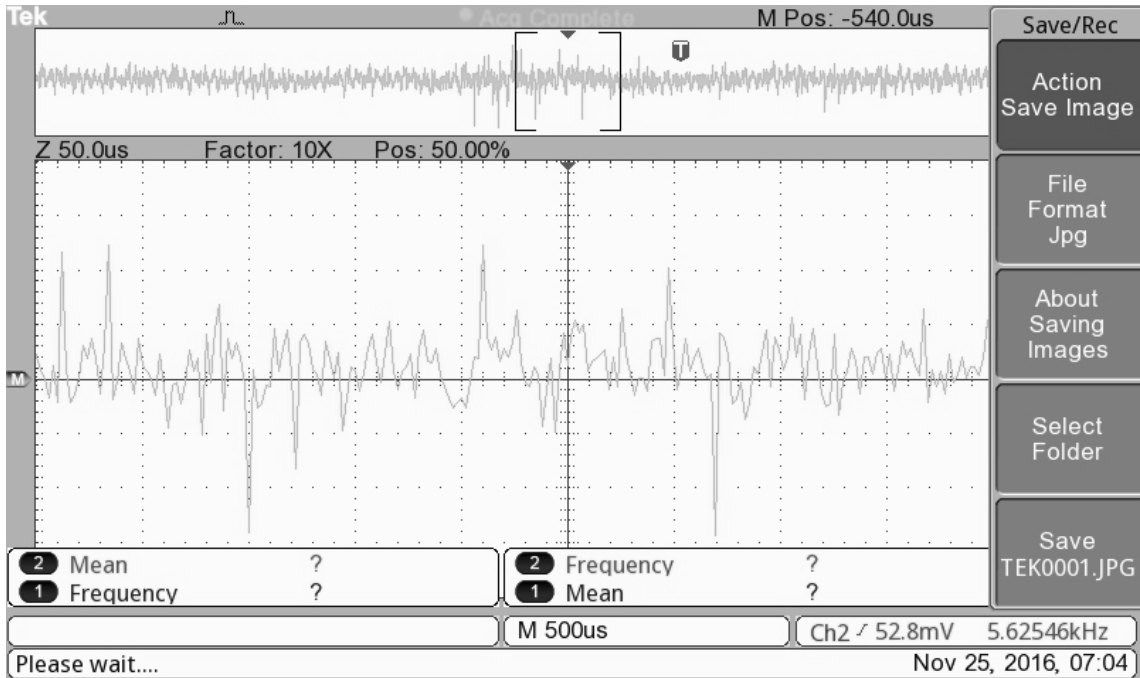


Figura 5.2 Voltaje de salida del SEA

# Capítulo 6 Conclusiones y trabajos a futuro

## 6.1 Conclusiones

Se concluye que el objetivo general se cumplió en su totalidad, porque el SIVEOC está funcionando en tiempo real y enviando las lecturas al operador para su interpretación. El SIVEOC está diseñado para vigilar cualquier estructura civil que represente un riesgo potencial. El SIVEOC puede enviar los datos a cualquier sistema con el cual se pueda conectar, ya sea un teléfono móvil, servidor, PC, WEB, etc.

En cuanto a los objetivos particulares, se cumplieron, cada una de las partes del SIVEOC cumple sus objetivos.

La tarjeta SEA se encarga de acondicionar la señal analógica y amplificarla para su posterior conversión.

La conversión de la señal analógica a digital se realizó con el microcontrolador mediante la implementación del código máquina en el sistema bootloader.

La transmisión y recepción de datos se cumplió en su totalidad, el desarrollo del código para la comunicación inalámbrica funciona correctamente y tiene un alcance de aproximadamente de 15 (m).

En la interface Humano Máquina se cumple con lo propuesto, ya que se muestran las lecturas del acelerómetro en una tabla que contiene la fecha, hora y lo más importante la aceleración o movimiento inercial que se presenta en la estructura vigilada. Los datos son enviados a una PC para ser manipulados o interpretados por el usuario del SIVEOC.

El SIVEOC cumple con todos los objetivos propuestos en este documento.

El conocimiento adquirido durante mi trayectoria dentro de la Universidad fue fundamental para el trabajo desarrollado en este proyecto y también, este proyecto me compromete al estudio de conocimientos que me faltaron.

Como toda propuesta y desarrollo, la aquí presentada tiene trabajos pendientes que se deben realizar, para su mejora y caracterización; estos se presentan en el Capítulo siguiente.

El utilizar el Acelerómetro ayudó a superar el acondicionamiento de la señal respecto al uso de una Galga extensométrica. Fue una de las dificultades que se presentaron al inicio de los trabajos.

Los objetivos del trabajo presentado se tuvieron que acotar por razones de tiempo, no logré caracterizar completamente el sistema, no logré ni caracterizar ni mejorar la relación señal/ruido del sistema y queda pendiente

también la aplicación de la teoría de medición e instrumentación al sistema propuesto, para caracterizarlo en linealidad, repetitividad, etc..

Para una aplicación inmediata del sistema propuesto, se debe montar y adquirir datos en una estructura civil de laboratorio, plenamente definida en sus características; para relacionar los datos con esfuerzos definidos y de prueba.

Del trabajo realizado y el conocimiento aplicado en el SIVEOC, este, se puede tomar como una base para la instrumentación y automatización de la adquisición de datos en estructuras civiles, y la aplicación del conocimiento que se puede adquirir de estos sistemas sin lugar a dudas bajarán el riesgo que se tiene al habitar, trabajar y/o estar dentro de estas.

El desarrollo modular que se implementó en el SIVEOC nos da una aplicación clara de lo que en la actualidad es la electrónica como área de la ingeniería, es decir, la aplicación de subsistemas inteligentes, con protocolos de comunicación e interfaces estandarizadas, simplificando el llamado hardware y el uso el software se hace amigable.

## 6.2 TRABAJOS A FUTURO

El crecimiento de este sistema de adquisición de datos, tiene muchas vertientes y oportunidades. Mencionaremos algunas a continuación.

- Aplicaciones en dominios Web.
- Aplicaciones en sistemas en redes, los sistemas embebidos de adquisición de datos se pueden colocar como elementos de una red, para formar puntos múltiples de datos, de acuerdo a la complejidad de la estructura civil.
- Aplicaciones para teléfonos celulares
- Sistemas de alarmas
- Sistemas Mecatrónicos, ejemplo en la rehabilitación de movimiento corporal en pacientes con falla de coordinación motora o desarrollo de prótesis “inteligentes”.
- Sistemas de apoyo a personas con capacidades diferentes, por ejemplo detectores de movimiento de cabeza para expresar lenguaje hablado.
- Navegación de vehículos autónomos.
- Detección de fallas por vibración en sistemas industriales, como motores, bandas, entre otros.

En resumen se tiene:

A nivel componente (acelerómetro)	A nivel sistema
<ul style="list-style-type: none"><li>- Mediciones sísmicas</li><li>- Sistemas de alarma</li><li>- Impacto vibración</li><li>- Ensayos de vuelos</li><li>- Aplicaciones para celulares</li><li>- Otras Áreas</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>- En monitoreo de implantes óseos, por ejemplo rótulas</li><li>- Análisis de datos a nivel preventivo de mantenimiento en edificios antiguos y nuevos</li><li>- Mediciones sísmicas</li><li>- Prótesis biológicas</li><li>- Sistemas Industriales</li></ul>

Por mejorar en este sistema, se tiene que:

1. Caracterizarlo como Instrumento de medición.
2. Reducir tiempo de adquisición de datos, velocidad de respuesta a señales de mayor frecuencia, que en este momento se perderían.
3. Caracterizarlo en una estructura de laboratorio.

# ANEXO I. LISTADO.

La Tabla 4 muestra EL listado del programa utilizado para la conversión analógico/digital de la señal sensada por el acelerómetro y enviada al microcontrolador (PIC18F4550) del SIVEOC.

```
;Filename:Formato para Bootloader con adquisición de datos.asm *
; Date:28/Octubre/2016 *
; File Version:1.0 *
; *
; Author: Rosa Severiano Mora *
; UACM *
;*****
; *
; Files Required: P18F4550.INC *
; *
;*****
;
; LIST P=18F4550 ;Directive to define processor
; #include <P18F4550.INC> ;Processor specific variable definitions
;*****
;
; Configuración del microcontrolador
; Para el uso con Bootloader, Ya el sistema tiene configurados
; Los registros de sistema, por lo que es recomendable no reconfigurarlos.
; Aquí se anulan estas configuraciones
;
; Oscillator Selection
;CONFIG FOSC = INTOSCIO_EC ;Usando oscilador interno
;CONFIG PWRT = ON ;Timer de encendido habilitado
;CONFIG BOR = OFF ;Problemas en fuente apagado
;CONFIG WDT = OFF ;Perro guardián apagado
;CONFIG MCLRE = ON ;Reset habilitado
;CONFIG PBADEN = OFF ;Protección memoria apagado
;CONFIG LVP = OFF ;Programación en bajo voltaje apagado
;CONFIG DEBUG = OFF ;No usar tarjeta de evaluación
;CONFIG XINST = OFF ;No usar set extendido de instrucciones
;*****
;
; Variable definitions
; Apartado de memoria para variables de interrupción de baja prioridad.
; Más variables pueden ser necesarias para guardar registros y funciones
; en las rutinas de interrupción.
; CBLOCK 0x080 ;Dirección inicial del bloque de memorias
; WREG_TEMP ;Memoria para guardar registros y variables
; STATUS_TEMP ;Memoria usada en el contexto de guardar
registro STATUS del microcontrolador
; BSR_TEMP ;Variable usada en el contexto de guardar
```

```

registro Stack pointer del microcontrolador
        ENDC      ; fin de la macro
;
;   CBLOCK      0x000
;
;   EXAMPLE    ;Ejemplo de variable en ram
;
;   ENDC
;
;*****
;
;   EEPROM data
;Datos a guardar en EEPROM, se definen en esta dirección de memoria
        ORG      0xf00000
        DE      "Test Data",0,1,2,3,4,5
;*****
;
;   Reset vector remapeado por el boot a la memoria 0x830
; El código de programa se inicia en esta localidad de memoria.
        ORG      0x0830
        goto    main      ;Ir o saltar a la aplicación programada.
;*****
;
;   High priority interrupt vector, remapeado por el bootloader
;El código de interrupciones de alta prioridad se "remapea" de la memoria
;0x0008 a la memoria 0x0838, fuera del rango de memoria donde reside
;el programa bootloader, que está en la memoria baja
        ORG      0x0838
        bra     HighInt   ;Ve a la rutina de servicio de int de alta prioridad
;*****
;
;Low priority interrupt vector and routine, remapeado por el bootloader
;El código de interrupciones de baja prioridad se "remapea" de la memoria
;0x0018 a la memoria 0x0848, fuera del rango de memoria donde reside
; el programa bootloader, que está en la memoria baja.
        ORG      0x0848
; Inicio de la interrupción de baja prioridad
        movff   STATUS,STATUS_TEMP ;Guardar STATUS register
        movff   WREG,WREG_TEMP     ;Guardar working register
        movff   BSR,BSR_TEMP       ;Guardar BSR register
;*** código de servicio de la interrupción va aquí ***
        movff   BSR_TEMP,BSR       ; Restablecer BSR register
        movff   WREG_TEMP,WREG     ; Restablecer working register
        movff   STATUS_TEMP,STATUS ;Restablecer STATUS register
        retfie                          ;Salir de la interrupción
;*****
;High priority interrupt routine
;La rutina de servicio de interrupción de alta prioridad va aquí para evitar
;conflicto con la rutina de interrupción de baja prioridad
        HighInt:                          ;Inicio de la interrupción
;*** código de servicio de la interrupción va aquí ***
        retfie   FAST                ;Salir de la interrupción

```

```

.*****
;
;   Inicio del programa principal
;   Programa de conversión analógica digital del SIVEOC.
main:
    call  INICIAR_PUERTOS    ;Inicio de puertos
;   bcf  PORTD,1
;   goto main
    call  CONFIG_AD        ; Ve a rutina de configuración del convertidor A/D
TOMA_DATO
    call  CONVERTIR        ;Ve a rutina Convierte el dato a digital
;   bsf  PORTA,1
;   bcf  PORTA,1
    call  PRESENTA_DATO    ;Ve a rutina Presenta dato
;   bcf  PORTA,1
    goto  TOMA_DATO        ;Regresa a lazo de tomar dato
.*****Subrutina de iniciar puertos*****
INICIAR_PUERTOS
    clrf  PORTA
    movlw B'00100011'      ;Desconectar los comparadores y usa AN0 AN1
    movwf TRISA
    clrf  PORTB
    movlw H'FF'           ;Configura puerto B como Salidas digitales
    movwf TRISB
    clrf  PORTD
    movlw H'FF'           ;Configura puerto D como Salidas digitales
    movwf TRISD
    return
.*****Subrutina de configuración del AD*****
CONFIG_AD
    movlw B'10111001'      ;Justificado a la derecha, TAD=20,FOSC/8
    movwf ADCON2
    movlw B'00001110'      ;Referencias VDD y VSS, usa AN0 y AN1.
    movwf ADCON1
    clrf  ADCON0           ;Convertidor AD apagado, sin convertir
    return
.*****Subrutina de convertir*****
CONVERTIR
;   bsf  PORTA,1
;   bsf  ADCON0,0          ;Enciende el módulo de conversión
    nop
;   bsf  ADCON0,1          ;Inicia la conversión
preguntar
    btfsc ADCON0,1         ;Pregunta si ha terminado la conversión
    goto  preguntar

```

```

    bcf    ADCON0,0        ;Apagar convertidor
    return
;*****Subrutina presenta datos en los puertos B y D*****
PRESENTA_DATO
    movff  ADRESL,PORTD    ;Byte menos significativo del dato
    movff  ADRESH,PORTB   ;Byte más significativo del dato
    return
;*****
    END                    ;Fin de programa

```

Tabla 4. Código de la conversión analógica/digital del SIVEOC

Listado del programa de captura de dato que realiza en la Raspberry, y su acondicionamiento para ser guardado en el archivo.txt.

Este programa está realizado en Python 3, la Tabla 5 lo muestra.

```

# -*- coding: iso-8859-1 -*-, formato normativo del código
# Programa principal de adquisición de datos, Python 3

# "carga" librería para usar el puerto de la Raspberry
import RPi.GPIO as GPIO

# "carga" librería para usar el comando sleep
from time import sleep

# "llama" la utilería para configurar el puerto GPIO
GPIO.setmode(GPIO.BOARD)

# Configurando el GPIO, como entradas y en el orden que están conectadas
con el microcontrolador PIC18F4550

GPIO.setup(3,GPIO.IN)
GPIO.setup(5,GPIO.IN)
GPIO.setup(7,GPIO.IN)
GPIO.setup(29,GPIO.IN)
GPIO.setup(31,GPIO.IN)
GPIO.setup(26,GPIO.IN)
GPIO.setup(24,GPIO.IN)
GPIO.setup(21,GPIO.IN)
GPIO.setup(19,GPIO.IN)
GPIO.setup(23,GPIO.IN)

# "carga" la librería de logger
import logging
# "carga" utilería de fecha y hora

```

```

import datetime
import time

# crear el logger, librería para generar un archive txt en Python

logger = logging.getLogger('dato')
logger.setLevel(logging.DEBUG)
archivo_datos = logging.FileHandler('datos.txt')

# crea la consola handler y pone el valor de la conversión AD en el debug

ch = logging.StreamHandler()
ch.setLevel(logging.DEBUG)
now = datetime.datetime.now().time()
date = datetime.datetime.now().date()

# Toma el dato presente en el puerto GPIO, en este caso se toman 100
muestras del canal Xo del acelerómetro

dato = 0
while dato <=99 :
a = GPIO.input(3)
b = GPIO.input(5)
c = GPIO.input(7)
d = GPIO.input(29)
e = GPIO.input(31)
f = GPIO.input(26)
g = GPIO.input(24)
h = GPIO.input(21)
i = GPIO.input(19)
j = GPIO.input(23)

# Genera la cuenta decimal de la conversión AD

cuenta = a*2**0 + b*2**1 + c*2**2 + d*2**3 + e*2**4 + f*2**5 + g*2**6 + h*2**7
+ i*2**8 + j*2**9

# Convertir la cuenta al voltaje analógico de salida de la tarjeta del
acelerómetro

Vas = cuenta * 5 / 1024

# Convertir la salida de la tarjeta del acelerómetro a aceleración

#  $V_{ax} = (V_{as} + 1.578)/1.309$  Ecuación 7 del SIVEOC

```

```

Vax = (Vas+0.8)/1.32
VXY = (Vout + 0.8)/1.32 - - - -> ec. 7

# incrementa el dato, prueba fin del lazo

dato = dato + 1
# uso del formateador del logger, para enviar los datos al archivo txt
formatter = logging.Formatter('%(asctime)s - %(name)s - {0} ' .format(Vax))

# adiciona el formato de ch
ch.setFormatter(formatter)

# adiciona ch a logger
logger.addHandler(ch)

# agrega los datos a un archivo, para posteriormente abrirlo en Excel y graficar
logger.addHandler(archivo_datos)

# Aplicación, que nos muestra en la pantalla debug el flujo del programa de
adquisición del dato.
logger.debug(date)
logger.debug(now)
logger.debug(cuenta)
logger.debug(Vax)

#end

```

Tabla 5. Código para obtener la aceleración y que se guarda en el archivo .txt.

## ANEXO II.

Trabajo previo del SIVEOC implementado con la Galga extensométrica.

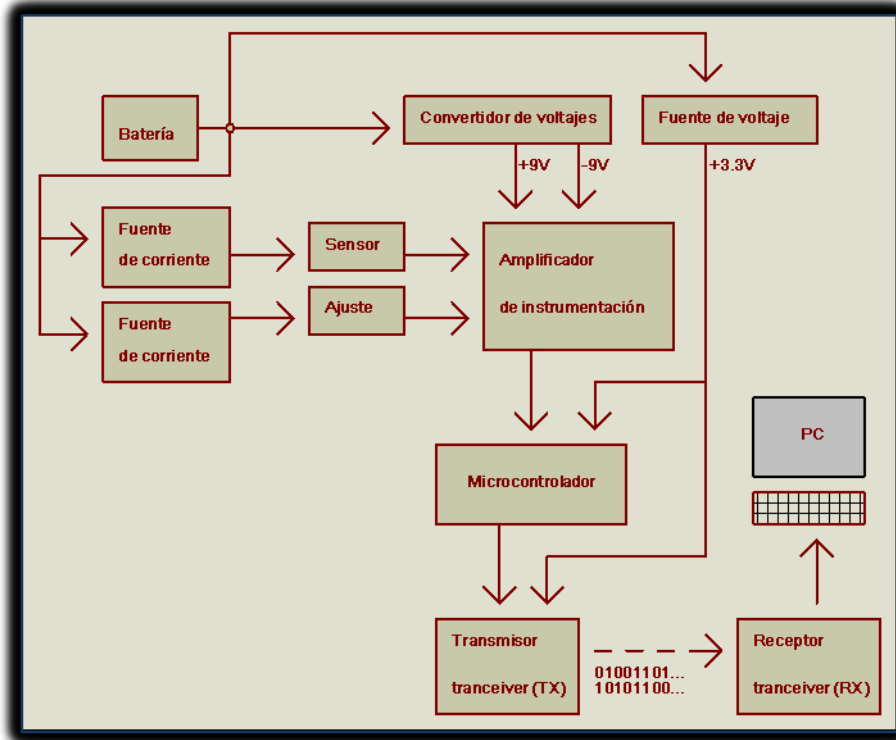


FIGURA A1. Diagrama de Bloques específico del SIVEOC.

### Descripción de Partes que Forman al Sistema

#### a. Fuentes de alimentación.

El sistema se va a alimentar a partir de una batería o paquete de baterías de 9 (V).

En un futuro puede prevenirse un sistema de baterías que sean recargables.

De acuerdo al diagrama de bloques específico (Figura A1), la batería es la entrada a 4 fuentes, la primera de ellas es una fuente doble que alimentará al amplificador de instrumentación, la segunda fuente es para alimentar al microcontrolador y el transceiver de comunicaciones, finalmente se generan 2 fuentes de corriente para alimentar al sensor de deformación y su respectivo ajuste.

#### Fuente doble.

La fuente doble se genera con el circuito integrado ICL7660 (ver Figura A2), el cual describimos en seguida.

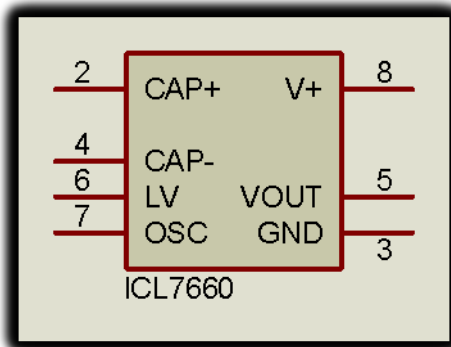


Figura A2 fuente doble

El ICL7660 [XXIX] de MAXIM, es un convertidor de voltaje, su principio de funcionamiento es la conmutación de capacitores y con ello se puede invertir, multiplicar o dividir un voltaje positivo. Su rango de funcionamiento va de 1.5 [V] a 10 [V] dentro de un amplio rango de temperaturas y puede entregar hasta 10 [mA].

El ICL7660 combina bajo consumo y alta eficiencia en su funcionamiento, típicamente tiene una eficiencia de 98%. Contiene un oscilador controlado que conmuta 4 MOSFET incluidos en el mismo chip.

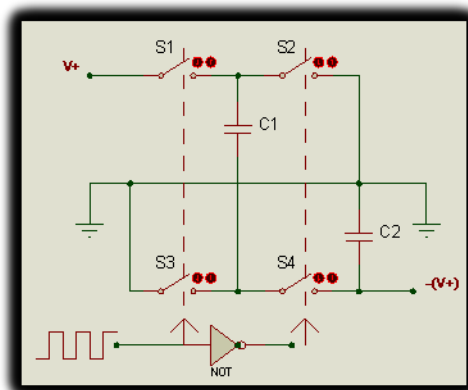
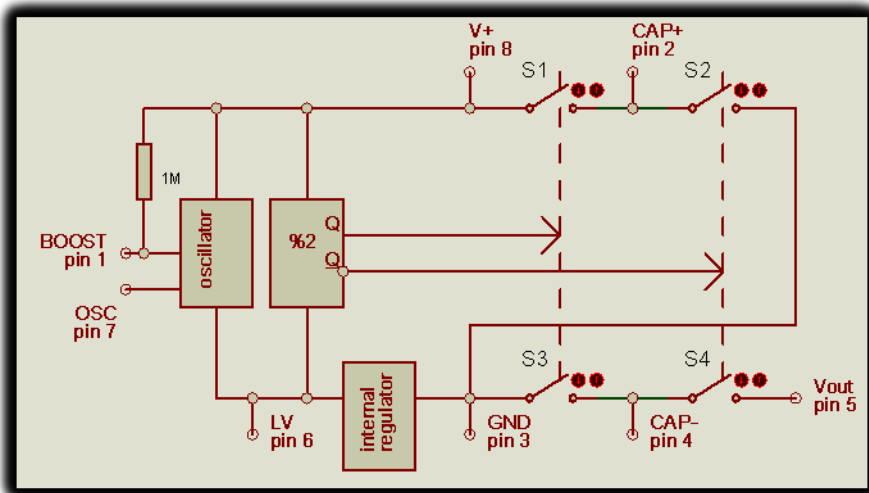


Figura A3 Principio de funcionamiento del ICL7660.

### Principio de funcionamiento.

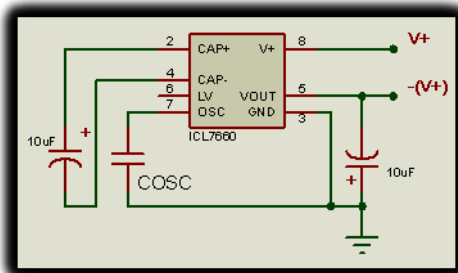
De acuerdo a la Figura A3 el oscilador conmuta los interruptores S1, S3 en el pulso alto, cargando el C1 al voltaje V+, después en el pulso bajo se apagan S1 y S3 y se encienden S2 y S4, pasando el V+ al C2. Por estar C2 conectado a tierra, se genera un  $-(V+)$  en sus terminales.

La Figura A2 presenta el diagrama funcional del integrado y la Figura A3 la aplicación como inversor de voltaje.



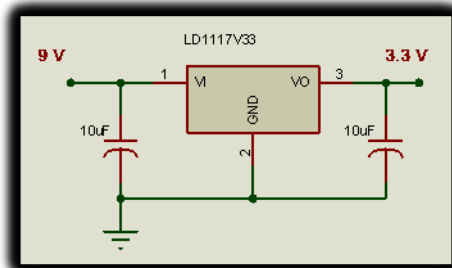
**Figura A4 Diagrama funcional del ICL7660.**

En el SIVEOC usaremos la aplicación mostrada por el diagrama de la Figura A5, es decir, generamos una fuente doble con el objetivo de polarizar al amplificador de instrumentación.



**Figura A5 inversor de voltaje**

En la Figura A6 se muestra al regulador LD1117V33 para polarizar al microcontrolador y al transmisor Xbee.



**Figura A6. Regulador de voltaje 3.3 [V].**

La Figura A7 muestra al regulador de voltaje ajustable LM317L, que usaremos para eliminar el offset que presenta el amplificador operacional de instrumentación.

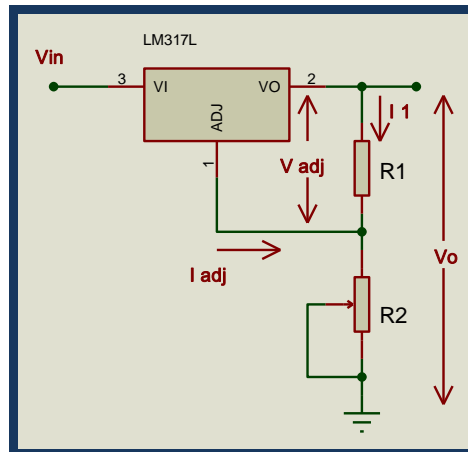


Figura A7. Regulador de voltaje ajustable

Fuente de 3.3 [V].

En este caso usamos una fuente regulada genérica, el LD117V33 [XXX] de SGS-THOMPSON, es un regulador de voltaje positivo de baja caída entrada-salida.

Características:

El regulador es capaz de entregar hasta 800 [mA].

Caída entrada-salida típica es de 1[V].

Protecciones a sobre corriente y a sobre temperatura.

Máximo voltaje de entrada de 15 [V].

Excelente rechazo a variaciones de voltaje de entrada.

La Figura A6 muestra la aplicación típica incluyendo los capacitores para evitar posibles oscilaciones del regulador.

Fuente de voltaje ajustable

Vamos a utilizar el LM317L [XXXI], que es un regulador de voltaje de tres terminales, excepcionalmente fácil de usar, el voltaje de salida es ajustable con solo dos resistencias; el voltaje de salida se ajusta desde 1.2 [V] hasta 37 [V]. La regulación de línea y de carga son mucho mejores que los reguladores estándar. Además este regulador incorpora protección total a sobre corriente, sobre temperatura y de área de operación segura; esta protección continúa operando aún y cuando se desconecte la terminal de ajuste.

Fuentes de corriente.

El LM317L por su principio de funcionamiento puede usarse como regulador de corriente; esta aplicación es la que vamos a utilizar, tiene como objetivo alimentar la red del sensor y la referencia del amplificador de instrumentación; de tal manera que la variación de voltaje de la batería no influya en los voltajes de entrada al amplificador.

La Figura A7 muestra la aplicación típica del LM317L como regulador de voltaje, fijando  $R_1$  de acuerdo a [E1] y variando  $R_2$  se ajusta el voltaje de salida del regulador,  $R_1$  típica es de 240  $[\Omega]$ ,  $V_{ref}$  es de 1.2 [V],  $I_{adj}$  es de 100  $[\mu A]$ .

$$V_o = V_{ref} \left[ 1 + \frac{R_2}{R_1} \right] + I_{adj} R_2 \quad [E1]$$

Para nuestro caso vamos a aplicar lo mostrado en la Figura A8 y de acuerdo a [E2] ajustaremos la corriente en el sensor y la referencia de entrada al amplificador de instrumentación.

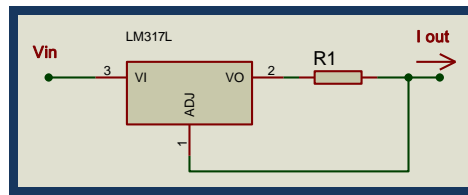


Figura A8. Regulador limitador de corriente.

$$I_{out} = \frac{1.2}{R_1} \quad [E2]$$

Es importante mencionar que en este regulador puede ser necesario incluir los capacitores de estabilidad por posibles oscilaciones, depende de la ubicación, cables y pistas en el impreso.

b. Sensor

Esta sección del SIVEOC está formada por dos partes, el sensor en sí mismo y su montaje al cual llamaremos porta-sensor.

En el caso del sensor, es una galga extensométrica, Figura A9. Basado en la variación de la resistencia eléctrica de un dispositivo, en este caso la galga es de un material conductor que al aplicarle una fuerza, sufre una deformación y por lo tanto una variación en su resistencia eléctrica. Es la técnica más utilizada para el análisis experimental de deformaciones, su fundamento básico es la variación de la resistencia en un hilo conductor producida cuando se alarga o contrae; llamado "strain" que implica deformación debida a la aplicación de fuerzas externas al material.

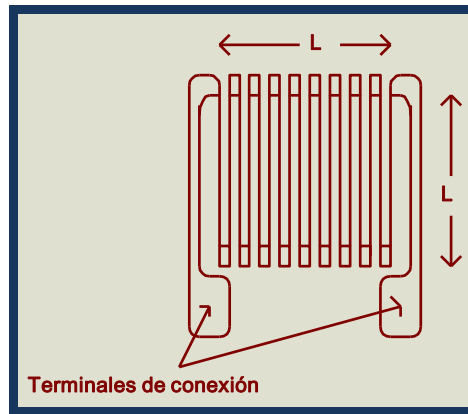


Figura A9. Galga extensométrica.

La deformación que sufre este material conductor se genera en todas direcciones, el resultado es una variación en su resistencia eléctrica.

La selección de la galga envuelve diferentes factores, entre los cuales se encuentran:

- i. Sensibilidad al esfuerzo o factor de galga
- ii. Autocompensación de temperatura
- iii. Material del respaldo o sustrato donde se deposita el conductor
- iv. Resistencia de la malla.
- v. Longitud de la galga
- vi. Patrón de la malla.

En este caso se escogió una galga de la marca OMEGA [XXXII], Figura A10, número de parte SGT-2DD/350-SY43, tiene una muy buena vida útil y una relativamente buena capacidad de elongación, sus principales características son:

1. Es un conductor de Constantán, de 5 [micras] de espesor, básicamente una aleación de cobre y níquel, su resistividad varía en función de la presión a la que está sometido.
2. La galga es un arreglo de 4 resistencias de 350 [ohms], con 0.5% de tolerancia todo el paquete; pueden ser conectadas en serie, paralelo, puente y medio puente.
3. El patrón o disposición o depositado del conductor sirve para medir deformación del tipo torsión, es decir, deformación en las tres direcciones.
4. Tiene un factor de galga de 2.13 con tolerancia de  $\pm 1\%$ .
5. La aleación contiene elementos que compensan variaciones de la resistencia por efectos de temperatura. Es relativamente insensible a la temperatura.
6. La longitud de la galga o región activa es de 7.6 [mm].

7. Sustrato del depositado es de poliamida.

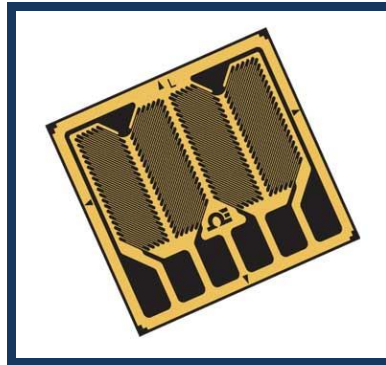


Figura A10 Galga utilizada en el SIVEOC.

Al ser un sensor pasivo, requiere de una medición indirecta, es decir, para determinar la deformación en la galga se debe medir la variación de su resistencia a través de un circuito adaptador. En nuestro caso mediremos el voltaje en la galga para determinar la variación de la resistencia y con el factor de galga (GF) determinaremos la deformación de acuerdo a la fórmula de la [E3], ecuación que ya comentamos.

$$GF = \frac{\Delta R/R}{\Delta L/l} = \frac{\Delta R/R}{\varepsilon} \quad [E3]$$

Siendo  $\varepsilon$  la deformación.

En la práctica, las medidas de la deformación implican cantidades del orden de algunos mili strain [ $\varepsilon \times 10^{-3}$ ], por lo tanto, medir la deformación requiere la medida exacta de cambios muy pequeños en resistencia, por ejemplo, suponga que un espécimen de prueba experimenta una deformación de 500 [ $\mu\varepsilon$ ]. Una galga con un factor de galga de 2 exhibirá un cambio en resistencia eléctrica de solamente 2 [ $500 \times 10^{-6}$ ] = 0,1%. Para una galga de 120 [ $\Omega$ ], éste es un cambio de solamente 0,12 [ $\Omega$ ].

Para medir estos pequeños cambios en resistencia se requiere de circuitos de precisión, tal es este caso de estudio, así que se va a usar un amplificador de instrumentación para lograr la mejor respuesta del sistema posible. La entrada al amplificador no va a ser el tradicional puente, se implementa una alimentación de corriente constante a la galga y a una referencia, lo cual tiene ventajas, este circuito se explicará en la sección del amplificador de instrumentación en este mismo Capítulo.

Cabe mencionar la importancia que tiene el respaldo donde está depositada la galga, y su montaje a la probeta de prueba, son primordiales, para que la deformación sea fielmente transferida a la galga. Para ello es de especial cuidado poner atención al pegamento y probeta.

Medir deformación con una galga extensométrica implica la detección de cambios extremadamente pequeños en resistencia. Por lo tanto, la selección y el uso apropiados del circuito del sensor, del acondicionamiento de señal, y de los componentes de la adquisición de datos es necesario para obtener medidas confiables. Para asegurar medidas exactas de la deformación, es importante considerar lo siguiente:

- Montaje de la galga
- Alimentación
- Cableado
- Amplificación
- Filtrado
- Anulación del offset
- Calibración del sistema

Sabemos que la longitud de una galga es la región activa o longitud de la malla sensible al esfuerzo de una galga. Las esquinas y áreas de soldadura no se consideran sensibles al esfuerzo debido a su gran sección transversal y su baja resistencia eléctrica. Para satisfacer las amplias necesidades de análisis de esfuerzos se ofrecen longitudes de galgas que van de 0.2 [mm] a 100 [mm], galgas cortas y galgas largas, ver Figura A11. La longitud de la galga es usualmente un factor muy importante a la hora de determinar su rendimiento bajo ciertas circunstancias, por ejemplo, si la región de esfuerzo a medir es menor a la longitud de la galga los resultados no serán correctos ya que parte de la región activa de la galga no sufrirá deformación. Por otro lado el tipo de región a medir es también importante, si está formada por materiales diferentes, la deformación no es homogénea; para tales casos se requiere de “promediar” esta deformación, tal es el caso del concreto. Cuando medimos esfuerzo sobre una estructura de concreto, es habitualmente deseable utilizar una galga lo suficientemente larga como para abarcar varias piezas de agregado con el fin de tomar una muestra representativa del esfuerzo sobre la estructura. Dicho esto de otro modo, lo que se busca en este tipo de mediciones son los promedios y no los puntos máximos de esfuerzo situados en la interfaz piedra-cemento. En general, cuando medimos esfuerzo sobre estructuras formadas por distintos compuestos de cualquier clase, la longitud de la galga debe ser mayor a la de las partículas del material no homogéneo.

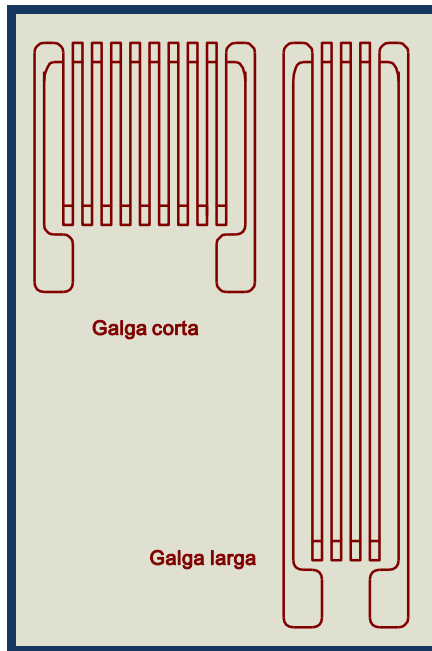


Figura A11. Galgas de diferente región activa.

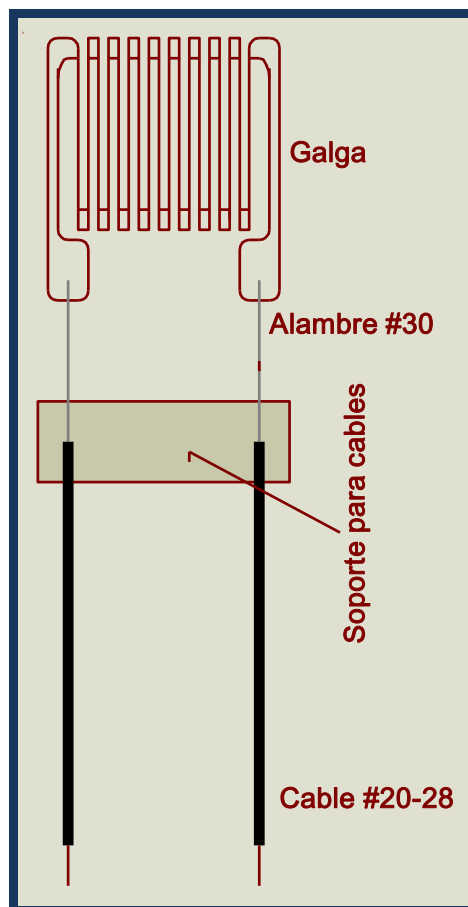


Figura A12. Montaje sugerido por el fabricante.

La Figura A12 muestra la recomendación del fabricante para montar la galga a la probeta, se usan alambres desnudos del calibre 30 [AWG], un

soporte adicional para evitar daño a la galga, cables de salida de la probeta del calibre 20 [AWG] a 28 [AWG] y pegar la galga con un Cianoacrilato, pegamento de fraguado rápido específico para esta aplicación y recomendado por el fabricante de la galga.

Para el caso estudiado se desarrolló una estructura soporte de la probeta, que funciona como amplificador del esfuerzo y concentrador del mismo en la región activa de la galga, este mecanismo se explica en seguida.

#### Porta-sensor

Se buscó que el porta-sensor cumpla dos objetivos:

1. Ampliar el área de medición, no solamente el área de la galga, debido a que el sistema podrá estar monitoreando estructuras de distintos compuestos.
2. Amplificar y concentrar el esfuerzo en la región activa de la galga; que en su mayoría son aéreas muy pequeñas.

Se partió de la siguiente observación: Si colocamos una regla sobre el área a monitorear y fijamos sus extremos a la superficie. Cuando la superficie sufre deformación, la regla tenderá a pandearse, provocando en el centro de la misma la mayor deformación, como se observa en la Figura A13. El efecto ocurre con la deformación en cualquier dirección.

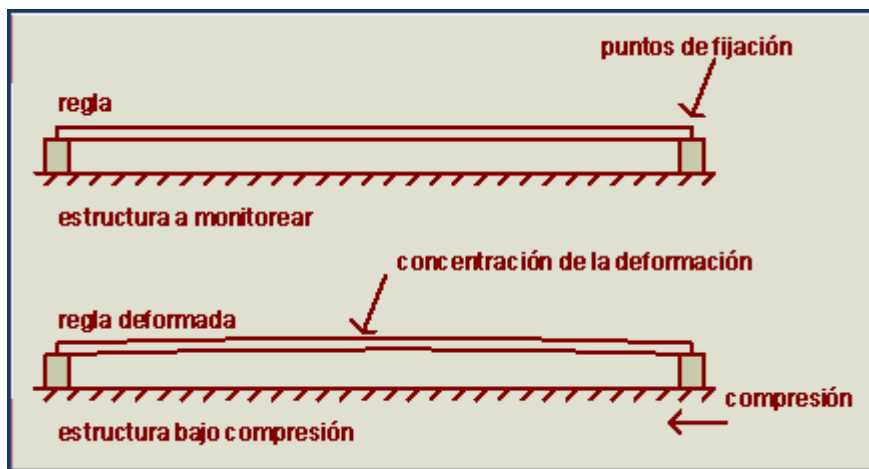


Figura A13 Ubicación de la máxima deformación en la galga, uso de un porta-sensor

La estructura ideada se compone de un rectángulo de acero inoxidable, en el centro del cual se montará la galga, esta probeta de acero inoxidable y calibre delgado se sujetará en sus extremos en la parte superior de bloques de acero; la sujeción viene dada por un sistema de opresores rectangulares. La parte inferior de estos bloques con el mismo sistema de opresores se sujetará a reglas de aluminio tipo T cuya longitud determinará el largo del área a monitorear. La Figura A14 muestra el ensamble central del porta-sensor con

sus partes y la Figura A15 la estructura completa y una imagen de la misma, en los anexos se pueden consultar los planos.

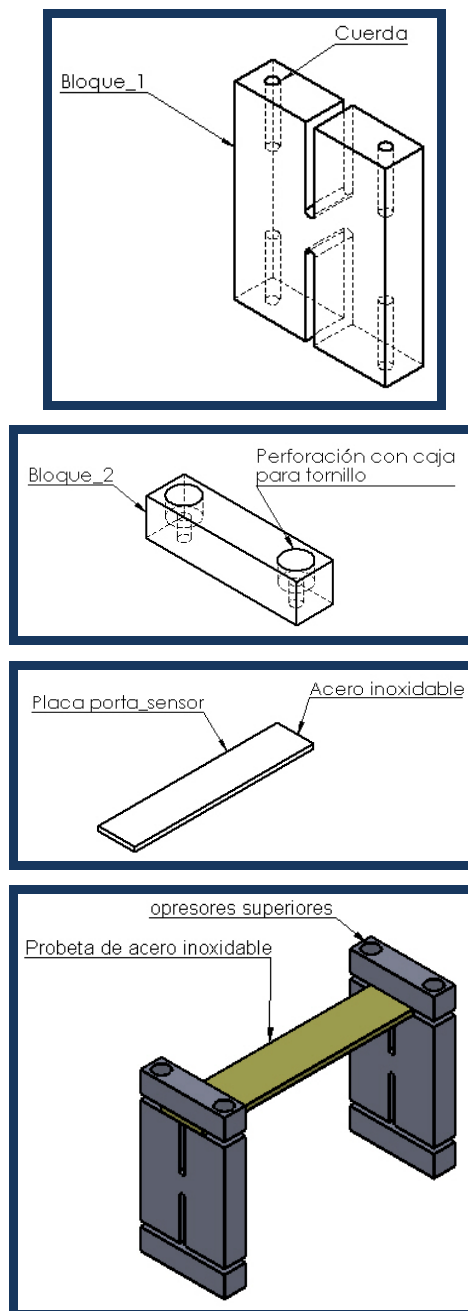


Figura A14 Ensamble central porta-sensor

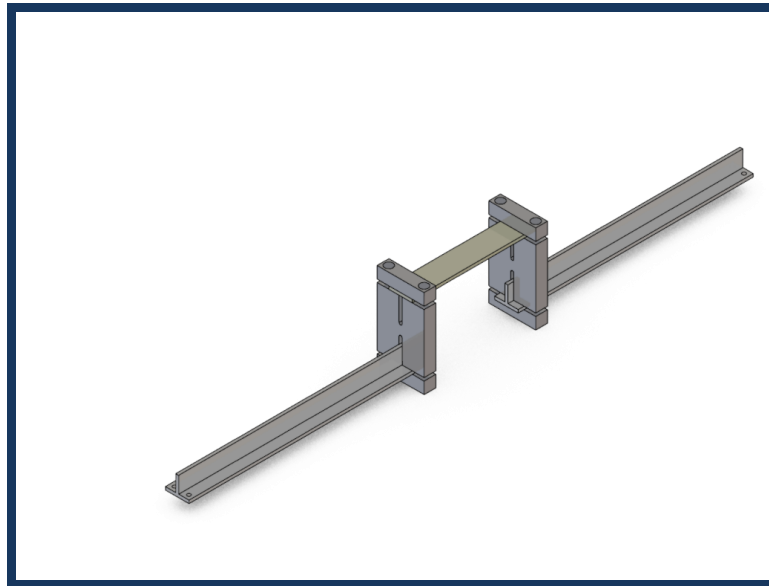


Figura A15. Estructura completa del sistema porta-sensor

c. Amplificador de Instrumentación

Un amplificador de instrumentación es un amplificador de voltaje diferencial, de precisión, con una alta impedancia de entrada, alto rechazo en modo común (CMRR), impedancia de salida baja, voltajes y corrientes de offset bajas, y capaz de trabajar con sensores que ofrecen señales eléctricas muy débiles.

Para la amplificación de la señal del sensor de deformación en estructuras civiles se ha seleccionado el amplificador de instrumentación AD524 [XXXIII] que está basado en el modelo de amplificador de instrumentación con tres amplificadores operacionales (ver Figuras A16- A18), a continuación se muestran los esquemas funcionales del amplificador:

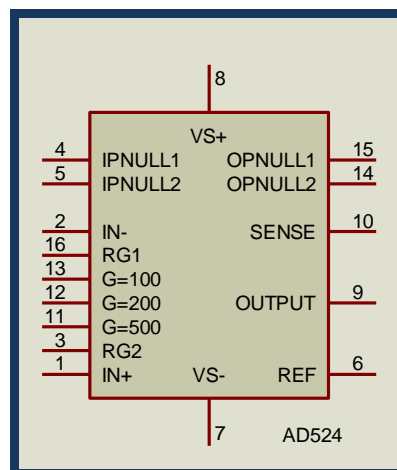


Figura A16. Amplificador de instrumentación

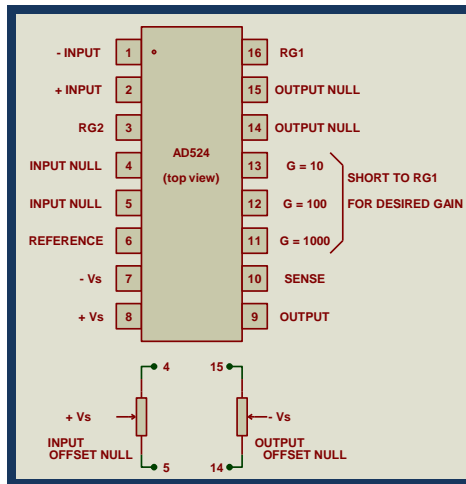


Figura A17. Amplificador de instrumentación

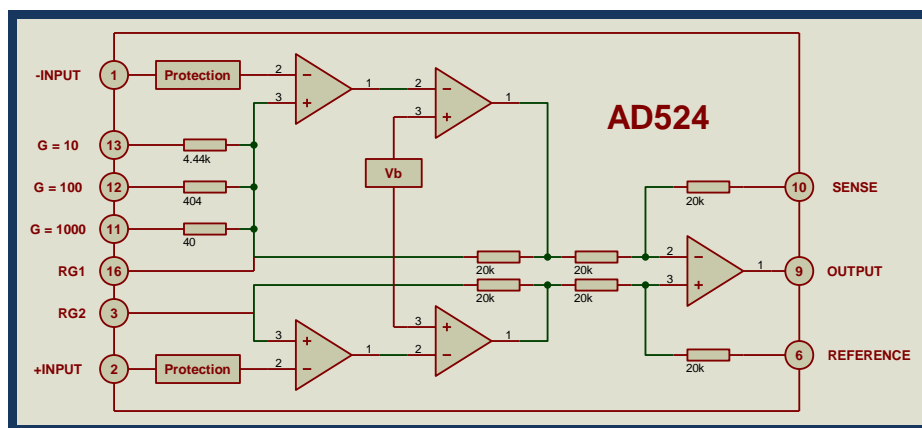


Figura A18. Amplificador de instrumentación

Las principales características que han servido como criterio de elección del AD524 son:

Ganancia ajustable con resistencia interna, no requiere de componentes externos.

Rangos de ganancia de 1 a 1000.

Bajo consumo, 3.5 [mA].

Bajo costo.

Bajo ruido: 0.3 (uVp-p) de 0.1 [Hz] a 10 [HZ]

Baja No linealidad: 0.003% (G=1)

Alta razón de rechazo de modo común (CMRR): 120 dB (G=1000).

Bajo voltaje de offset: 0.5 [uV]

Bajo corrimiento de voltaje de offset por temperatura: 0.5 [uV/°C]

Internamente compensado

Protecciones de entrada al encendido y apagado.

El AD524 garantiza bajos voltajes de offset, bajo corrimiento del offset, y bajo ruido para tener la mejor precisión en aplicaciones de alta ganancia. Para el ajuste de la ganancia, el fabricante proporciona la E4:

$$G = \frac{40000}{R_G} + 1 \quad [E4]$$

Donde  $G$  es la ganancia de salida y  $R_G$  es la resistencia de ganancia.

La Figura A19 muestra el circuito implementado para la parte de conversión A/D del SIVEOC con la galga extensométrica. La cual consta del circuito de amplificación y acoplamiento de la señal, el convertidor analógico digital, fuente de alimentación, el porta sensor y el microcontrolador PIC18F4550.

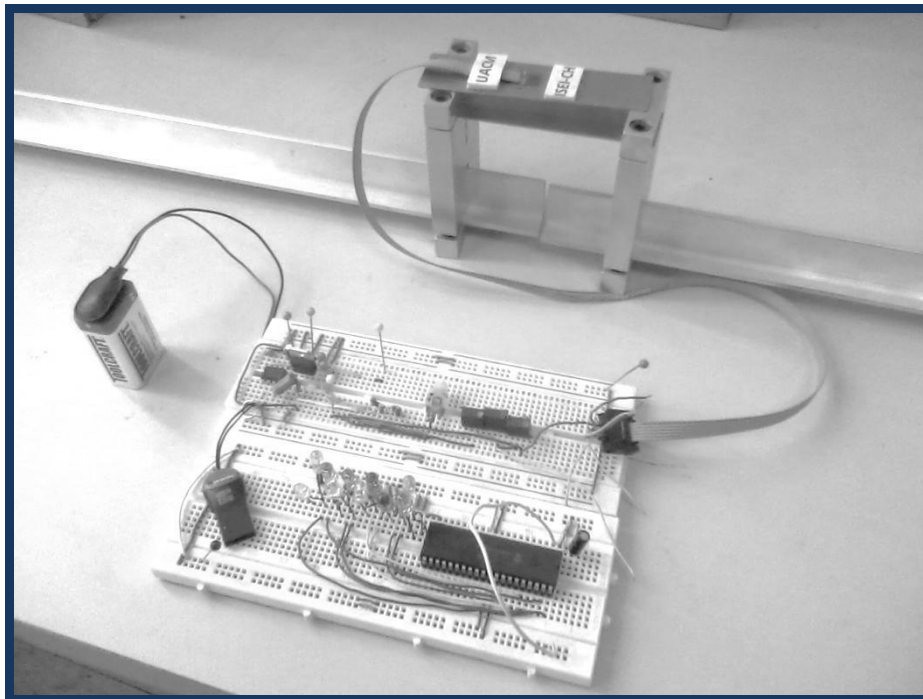


Figura A19. Circuito convertidor A/D para el SIVEOC con la galga extensométrica.

Esta propuesta de implementación del SIVEOC, que se documentó en este ANEXO II, presenta desventajas respecto al uso del acelerómetro, por mencionar algunas: ruido eléctrico, ajustes diversos, efectos de la temperatura, mecánicos, entre otros. Por lo que se decidió no continuar con esta propuesta e implementar la alternativa del acelerómetro.

## Referencias

Paginas consultadas de sensores y de redes de comunicación

1. [http://www.jcee.upc.edu/JCEE2004/pdf/EstadoActual\\_WirelessRF\\_SILICA.pdf](http://www.jcee.upc.edu/JCEE2004/pdf/EstadoActual_WirelessRF_SILICA.pdf), consultada 04092012
2. [http://www.hartcomm.org/protocol/training/resources/wiHART\\_resources/WirelessHART\\_bro.es\\_r2.0.pdf](http://www.hartcomm.org/protocol/training/resources/wiHART_resources/WirelessHART_bro.es_r2.0.pdf), consultada 04092012
3. <http://www.tecnicaindustrial.es/tiadmin/numeros/15/06/a06.pdf>
4. <http://www.aie.cl/files/file/comites/ca/articulos/agosto-06.pdf>
5. [http://www.uv.es/~rosado/sid/Capitulo3\\_rev0.pdf](http://www.uv.es/~rosado/sid/Capitulo3_rev0.pdf)
6. [http://www.disa.bi.ehu.es/spanish/ftp/material\\_asignaturas/Tecnolog%EDas%20de%20Control/Teor%EDa/02%20%20Principios%20de%20Comunicaciones%20Industriales.pdf](http://www.disa.bi.ehu.es/spanish/ftp/material_asignaturas/Tecnolog%EDas%20de%20Control/Teor%EDa/02%20%20Principios%20de%20Comunicaciones%20Industriales.pdf)
7. [http://infoplcn.net/files/documentacion/comunicaciones/infoPLC\\_net\\_ComunicacionEntornos\\_Industriales.pdf](http://infoplcn.net/files/documentacion/comunicaciones/infoPLC_net_ComunicacionEntornos_Industriales.pdf)
8. <http://tec.upc.es/ie/practi/Sistemas.pdf>

Paginas consultadas para el desarrollo y aplicación de software Rasbian

9. <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/11638/fichero/Capitulo+4.pdf>, consultada 060515
10. <http://www.pythondiario.com/2015/01/simple-programa-clienteservidor-socket.html>, página consultada 230616
11. <http://www.pythondiario.com/2014/04/crear-archivos-excel-xls-con-python-y.html>, página consultada 230616
12. [http://www.pythondiario.com/2014/11/primer-a-aplicacion-con-qt-designer-y\\_16.html](http://www.pythondiario.com/2014/11/primer-a-aplicacion-con-qt-designer-y_16.html), consultada 230616
13. <http://www.pythondiario.com/2016/05/mini-curso-de-wxpython-3-aplicaciones.html>, consultada 230616
14. <http://python-para-impacientes.blogspot.mx/2014/08/graficos-en-ipython.html>, consultada 230616
15. [https://www.codecademy.com/courses/python-beginner-es-MZqbz/1/3?curriculum\\_id=50fc7aab5fab3aa9c2002444](https://www.codecademy.com/courses/python-beginner-es-MZqbz/1/3?curriculum_id=50fc7aab5fab3aa9c2002444), consultada 050516
16. <http://python-para-impacientes.blogspot.mx/2014/08/graficos-en-ipython.html>, consultada 250616

17. <http://www.bluethinking.com/?p=98> (l0gging), consultada 290616
18. <https://forum.arduino.cc/index.php?topic=352006.0>, consultado 290616
19. <http://www.alegsa.com.ar/Dic/vnc.php>, consultada 091116

#### Referencias bibliográficas

20. Sensores y Acondicionadores de Señal, Ramón Pallás Areny, Marcombo, 4ª Edición.
21. Neamen - Electronic Circuit Analysis and Design 2ª Edición
22. Fernando E. Valdés Pérez y Ramón Pallás Areny, Microcontroladores Fundamentos y Aplicaciones con PIC.

#### Referencias del documento

- 
- i** [www.microchip.com](http://www.microchip.com), Data Sheet PIC18F4550
  - ii** Desarrollo de Raspberry\_Pi Foundation\_en Reino Unido
  - iii** XBee es propiedad de Digi basado en el protocolo Zigbee, [www.zigbee.org](http://www.zigbee.org)
  - iv** [www.omega.com](http://www.omega.com), data sheet SGT-2DD/350-SY43
  - V** Analog devices, Precision instrumentation amplifier, data sheet
  - VI** Sensores y Acondicionadores de Señal, Ramón Pallás Areny, Marcombo, 4ª Edición.
  - VII** IEEE 1451.6 Terms and Definitons, Smart sensor standard.
  - VIII** Revista Colombiana de Física, Reflectómetro de baja coherencia, vol.41, No.2, Abril 2009
  - IX** TEKSCAN, Data sheet FlexiForce sensors, [www.tekscan.com](http://www.tekscan.com)
  - X** Carlos E. Canto Q. Facultad de Ciencias Universidad Autónoma de San Luis Potosí
  - XI** [http://galia.fc.uaslp.mx/~cantocar/automatas/APUNTES\\_CURSO/CAPITULO8.PDF](http://galia.fc.uaslp.mx/~cantocar/automatas/APUNTES_CURSO/CAPITULO8.PDF)
  - XII** OMEGA, Precision Strain Gages. [www.omega.com](http://www.omega.com)
  - XIII** Sensor medida de aceleración, Diseño integrado, pág.51, Universidad de Sevilla
  - XIV** ANALOG DEVICES, Data sheet, Precision Dual\_Axis Accelerometer
  - XV** <https://www.arm.com>, ARM Holding
  - XVI** Norma IEEE 802.11 es el estándar relativo a redes inalámbricas de área local. Institute of Electrical and Electronics Engineers, asociación dedicada a la estandarización y el desarrollo de áreas técnicas.
  - XVII** UACM Materia: Informática en las Telecomunicaciones, apuntes.

- 
- XVIII** Sistemas embebidos, Antonio Nadal Galiana, pág.3
- XIX** <https://electronicavm.files.wordpress.com/2011/04/c-i-555.pdf>
- XX** <ds.linear.com/docs/en/datasheet/1461fb.pdf>
- XXI** <http://www.datasheet.es/PDF/143159/AD8608-pdf.html>
- XXII** <http://ww1.microchip.com/downloads/en/devicedoc/39632c.pdf>
- XXIII** <http://www.microchip.com/mplab/mplab-x-ide>
- XXIV** <http://python-para-impacientes.blogspot.mx/2014/08/graficos-en-python.html>
- XXV** Misma referencia que XXIV
- XXVI** <http://www.alegsa.com.ar/Dic/vnc.php>
- XXVII** <https://winscp.net/eng/docs/lang:es>
- XXVIII** <http://www.alegsa.com.ar/Dic/vnc.php>
- XXIX** <http://www.intersil.com/content/dam/Intersil/documents/icl7/icl7660>.
- XXX** <http://pdf.datasheetcatalog.com/datasheet/SGSThomsonMicroelectronics/mXuuwz.pdf>
- XXXI** <http://pdf.datasheetcatalog.net/datasheet/fairchild/LM317.pdf>
- XXXII** OMEGA, Precision Strain Gages. [www.omega.com](http://www.omega.com)
- XXXIII** <http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/datasheets/AD524.pdf>