

**INSTRUMENTACIÓN ELECTRÓNICA EN PROYECTOS DE EXCAVACIÓN Y
CONSTRUCCIÓN EN MANIZALES**

AUTORES:

**Samuel Rodríguez Orozco
Juan David González Rodríguez
Jose Carlos Arregocés Castro**

PRESENTADO A:

Luis Fernando Melchior, Ing, Msc

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE ELECTRÓNICA
BOGOTÁ D.C. 2022**

CONCEPCIÓN

Introducción

El diseño y construcción de estructuras para las distintas actividades de producción del ser humano, siempre ha sido de gran importancia, esto conlleva a que se tomase cada año más en serio la seguridad de estas estructuras, ya que el hecho de mantener la integridad de la estructura significa el mantener la integridad física de las personas que la utilizan para sus actividades productivas. Esta integridad estructural requiere de un monitoreo de variables físicas las cuales serían muy complejas de medir, si no se tuvieran transductores efectivos que muestren los cambios de estas variables de una manera precisa, por lo que en este tipo de tareas la ingeniería civil debe solicitar la asistencia de la ing. Electrónica, para que esta logre desde la creación, hasta la interfaz de interpretación para estos transductores, y que los ingenieros civiles logren diseñar las estructuras y optimizar el terreno de la manera más segura para las personas que hacen parte y harán parte del proyecto en cuestión.

Planteamiento del problema, posibles usuarios y justificación

La integridad estructural implica la medición antes, durante y después de la construcción de un proyecto de ingeniería civil, especialmente en un país tan geológicamente diverso como lo es Colombia, por esta razón la implementación de sensores conectados de forma continua con el fin de ayudar al monitoreo de la salud estructural es completamente necesaria ya que una avería dentro de la estructura del edificio, o de alguna pieza de maquinaria puede atrasar un proyecto, lo que implica aparte de una pérdida de tiempo, una pérdida grande de dinero para las entidades o personas que estén financiando el proyecto en cuestión.

En un país como Colombia donde el 58,11% de los suelos son frágiles, incipientes y poco evolucionados según el IDEAM, el monitoreo de las variables físicas de estos es completamente necesaria, ya que, al estar en evolución constante, sus características podrían variar, afectando la integridad del diseño de las estructuras diseñadas sobre ellos, por lo que redes de estos transductores con sus respectivos sistemas de interpretación son necesarios.

Antecedentes y estado del arte

En Colombia podemos recatar un servicio ofrecido por SSI enfocado al monitoreo de salud estructural, donde este sistema está conformado por una estructura de acelerómetros especializados para el monitoreo de las vibraciones de la edificación, junto con un servicio de monitoreo de datos.



Ilustración 1 Descripción del sistema de monitoreo de SSI

Objetivo general y específicos

Objetivo general

Diseñar e implementar un sistema de adquisición de datos el cual es solicitado para un proyecto de excavación en Manizales, Colombia, con el fin de garantizar la integridad del proyecto y de sus participantes.

Objetivos específicos

- Monitoreo de la variación del posicionamiento del muro estructural mediante la medición de la inclinación de este.
- Implementación de una celda de carga con el fin de ayudar a determinar el estado del anclaje estructural.
- Monitoreo de los movimientos sísmicos presentados en los muros estructurales mediante el uso de un acelerómetro de baja impedancia.

Requerimientos del cliente

- Diseñar un sistema de adquisición de datos que cumpla con alguna de las necesidades de instrumentación electrónica en el proyecto.
- Cumplir con los rangos de medición que se necesitan en el proyecto.
- Implementar este sistema de adquisición de forma asequible en lo que al presupuesto hace referencia.

Marco teórico

Geofísica sísmica

Las técnicas de la sísmica (que hace parte de la geofísica) se encargan de estudiar los cambios de rigidez de los materiales del subsuelo, su aplicación principal dentro de la ingeniería civil son los estudios de determinación de espesor de capas, estimación de módulos elásticos de deformación, mejoras del terreno tras inyecciones de cemento, entre otras.

Para las aplicaciones de la geofísica sísmica existen varias técnicas, las dos que más relevancia presentan para el proyecto actual son las siguientes:

REMI

El método REMI se basa en el principio físico de la dispersión de las ondas en el terreno. En la realidad, todos los medios son, en mayor o menor medida, dispersivos, y, por lo tanto, las distintas frecuencias que componen un determinado paquete de ondas se propagan a diferente velocidad, y mediante un análisis espectral de los registros de estas vibraciones por los diferentes medios se obtiene una distribución de la velocidad de ondas de cizalla con la profundidad.

Sísmica de reflexión

Esta técnica consiste en conseguir un ensamblaje en el cual se pueden observar las distintas discontinuidades que definen la estructura del subsuelo, a partir del procesamiento resultante de un ensayo de vibración vertical donde ciertos transductores son utilizados para el monitorear la vibración del terreno.

Sensor de vibración

Los sensores de vibración son también conocidos como piezoeléctricos, son herramientas útiles para la medición de varios procesos. Estos sensores funcionan con el efecto piezoeléctrico, que mide los cambios de presión, aceleración, temperatura mediante su conversión en una carga eléctrica.

Monitoreo sísmico y acelerómetros

Para esta técnica de la geofísica se utilizan varios transductores, dentro de los cuales se encuentran los acelerómetros, estos son transductores que miden el movimiento o aceleración de una estructura. Existen dos tipos de acelerómetros, los de salida de carga de alta impedancia y los otros como se puede deducir son los de salida de baja impedancia.

Acelerómetros de salida de alta impedancia

En este tipo de acelerómetro, el cristal piezoeléctrico genera una carga eléctrica que está conectada directamente a los instrumentos de medición, estos acelerómetros se usan en aplicaciones a especialmente altas temperaturas (mayores a 120°C).

Acelerómetros de baja impedancia

Un acelerómetro de baja impedancia incluye un acelerómetro de carga en su extremo delantero, así como un minúsculo microcircuito integrado y un transistor FET (de efecto de campo) que convierte

la carga en una tensión de baja impedancia que puede interaccionar fácilmente con la instrumentación estándar, por esta razón es el tipo de acelerómetro más utilizado en la industria, ya que una fuente de alimentación estándar le brinda suficiente potencia para funcionar correctamente.

Estos elementos también son unos de los principales en la realización de pruebas de carga para edificaciones, ya que con estos se puede monitorear y predecir qué tan probable es que la estructura entre en resonancia y colapse.

Caracterización de materiales (medición de V_p y V_s en rocas y suelos de laboratorio)

La caracterización de subsuelo se realiza desde los puntos de vista estáticos y/o dinámicos, la parte dinámica se utiliza principalmente para estructuras que van a estar sometidas a cargas de este tipo, usualmente maquinarias, cargas de viento y sismo.

La velocidad de onda de corte V_s es uno de los parámetros más necesarios para la caracterización dinámica de suelos, ya que por medio de este parámetro es posible establecer y analizar comportamientos de los depósitos de suelo ante las cargas cíclicas

La velocidad de onda de compresión V_p se determina con la prueba de refracción sísmica y la velocidad de onda de vorte V_s con la prueba de down hole y cross hole, o a partir de datos de dispersión de ondas superficiales.

Tomografías de resistividad en el terreno (estratigrafía e hidrogeología)

El método de tomografía de resistividad eléctrica es un método de exploración geofísico, que es utilizado para evaluar las propiedades eléctricas de los suelos por medio de la inyección de corriente al suelo, en este método una corriente continua es inyectada a la tierra por medio de dos electrodos de corriente y la distribución de la diferencia de potencial es medida con otros electrodos, esto se realiza repetidamente a lo largo de un perfil de hasta 60 electrodos, la diferencia de cálculo de potencial se utiliza para determinar la resistividad aparente del subsuelo.

Cuando la corriente es removida algunos materiales retienen carga eléctrica y son materiales conocidos como polarizables. En el dominio de la frecuencia, esta propiedad se mide comprobando la fase entre las diferencias entre el potencial aplicada y el potencial medido.

Niveles en piezómetros (prueba de bombeo y monitoreo durante la construcción)

El piezómetro es un instrumento que se utiliza para medir las presiones de poros o niveles de agua en perforaciones, cañerías, terraplenes y estanques a presión, la aplicación geotécnica más usada es para determinar la presión de agua en el terreno o el nivel de agua en las perforaciones.

Prueba de bombeo:

Esta se realiza cuando se tiene un pozo profundo esto para determinar parámetros hidráulicos como la capacidad específica, el coeficiente de almacenamiento, la transmisividad y el radio de influencia

El tubo piezométrico es un tubo que está conectado por un lado a un recipiente en el cual está el fluido, el nivel se eleva hasta una altura equivalente a la presión que ejerce el fluido en el punto de nivel de carga de este.

Medición de caudal

La medición del caudal o lo también conocido como aforo, tiene varios métodos de desarrollo y su elección depende del enfoque de monitoreo, la accesibilidad que se tenga, el tiempo con el que se cuente de la fuente superficial que se medirá, sus formas y movimientos.

Método volumétrico:

Para medir se ubica un recipiente bajo la corriente de tal forma que reciba todo el flujo de agua, al instante en que la corriente de agua ingrese al recipiente se debe iniciar el conteo de un cronometro y se detendrá cuando la corriente termine o cuando el recipiente este lleno, es importante tomar varios tiempos de llenado para tener una medida promedio.

Método área-velocidad o flotadores:

Para este método se mide la velocidad del agua en una sección del rio o arroyo, pero el método flotador es sencillo pero inexacto.

Para medir primero se selecciona un rio o arroyo, un tramo uniforme, sin piedras o troncos que puedan estorbar, para que el agua fluya libremente, preferiblemente sin turbulencias y una sección recta. Se eligen 2 puntos uno donde inicia (A) y otro donde terminara (B).

La medición de la velocidad es la relación entre la distancia que recorre un metro cada 10 segundos, para su medición en campo se ubica el flotador en el punto (A) y con el cronometro en el punto (B), lo recomendado es realizar al menos 10 mediciones y tener el promedio.

Celdas de carga en anclajes

Las celdas de carga por anclaje son usadas para monitorear cargas tirantes, muros de contención, pernos de anclaje, se componen de dos chapas usualmente de acero inoxidable en forma de anillo, soldadas entre si alrededor de su circunferencia. En medio del espacio anular de las placas se llena bajo vacío por el aceite desairado, la carga se mide con un manómetro de Bourdon conectado a la celda.

El manómetro esta calibrado en el laboratorio, el permite hacer lecturas directas en KN. Los modelos eléctricos están equipados con transductores de presión. Una placa de distribución muy rígida se suministra, con el fin de poder garantizar que la carga, se aplica de manera uniforme en la celda de carga.

Longitud e integridad de pilote

La pruebas de integridad de pilotes (PIP), consiste en determinar la integridad individual de pilotes verticales o con una inclinación, mediante la medición y el análisis de la respuesta en la velocidad del pilote, inducido por un impacto generado por un martillo de plástico, de manera perpendicular y axial a la superficie del pilote, este método tiene un funcionamiento óptimo en secciones de concreto, mientras que en las estructuras y pilotes de hacer, su aplicación es más limitada, actualmente se manejan 2 métodos para determinar la integridad de los pilotes.

Método de respuesta transitoria:

Para este caso, se mide el movimiento y la fuerza en la cabeza del pilote, a partir de esto se adquieren unos datos que serán grabados en el dominio del tiempo, pero que serán analizados en los dominios de tiempo y frecuencia.

Método de eco de pulso:

El método consiste en medir el movimiento de la cabeza del pilote, producido por el impacto del martillo y posterior eco generado al reflejarse el pulso en el pie de pilote, o donde ocurra un cambio de impedancia por efecto de fracturas, o cambios en la sección transversal u otras morfologías antes del pie del pilote

Espesores de recubrimiento de concreto

El recubrimiento constituye un parámetro fundamental en la prevención de ataques externos por gases y líquidos a las estructuras de concreto armado, que alterna con el pH normal del concreto, degradándolo y llevando finalmente los aceros de refuerzo a entrar en un proceso de corrosión, el recubrimiento actúa como una barrea física frente al ataque al concreto armado y este recubrimiento ayuda a elevar la alcalinidad del concreto desarrollada sobre el acero de refuerzo creando un espacio para generar una capa pasiva que protege el acero de refuerzo ante la corrosión, los pasos para el recubrimiento son:

Primero:

Utilizar un concreto con relaciones agua cemento bajas que impidan el transporte de cloruros y la carbonatación

Segundo:

Revisar el grado de exposición que tiene la estructura, la norma NSR 10 en el capítulo C.7 establece que los recubrimientos mínimos deben tener los concretos que estén en contacto permanente con el suelo, que están expuestos a la intemperie o en interiores, también clasifica de acuerdo con el elemento estructural, vigas y columnas exigen más recubrimiento que muros y viguetas.

Tercero:

Garantizar que la medida del recubrimiento se haga desde la superficie del concreto hasta la superficie exterior del cero.

Inclinómetros en perforaciones y en la pared del muro

Un inclinómetro es un instrumento de medición que sirve para medir la inclinación de un plano con la vertical o horizontal respecto a la superficie terrestre, en geotecnia el inclinómetro es un sistema de instrumentación que permite medir los desplazamientos horizontales en taludes y terrenos inestables.

La instalación inclinómetra es necesario primero realizar un sondeo del terreno, aprovechando ese sonde para determinar valores como la estratigrafía y la altura del nivel freático, es importante ubicar el punto a puntos de medición elegidos, si lo que se quiere es determinar cómo afecta el movimiento interno en una edificación o un talud, el inclinómetro debe situarse fuera del terreno, influenciado por la cimentación de la estructura, pero en caso contrario que se quiera monitorizar como afecta una cimentación a un terreno, deben ubicarse dentro del radio de afección. Los puntos de prospección deben abarcar en superficie, esta zona debe ser más que suficiente para alcanzar el estrato donde no exista ninguna duda de que el terreno es estable.

Monitoreo de variación de distancia entre el muro y puntos de control (construcción) y los edificios (vida útil)

Sensores de distancia por cable:

Los sensores de desplazamiento por hilo, también conocidos como sensores de sirga o ecoder de sirga, el sistema de montaje es sencillo, consta en fijar el sensor de distancia a la superficie de medida y anclar el extremo del cable a la superficie móvil, el movimiento provoca que el cable de medida se extraiga y genere un cambio en la señal de salida, proporcional a la distancia que recorre el cable.

Sensores de distancia magnetostrictivos:

Los sensores magnetostrictivos o sensores de imán, su funcionamiento se basa en el efecto Villary, en el que el campo magnético de un imán intercepta una onda y esta se ve reflejada hacia la electrónica, por lo que se mide el tiempo de ida y vuelta de la señal.

Monitoreo de lluvias (pluviómetro)

El pluviómetro está entre los instrumentos meteorológicos más usados en todo el mundo, usualmente viene incorporado en las estaciones meteorológicas y es un elemento que provee de gran información meteorológica cómo la climatología de un lugar, todo lo que esté relacionado con precipitación se recoge por este instrumento.

Principalmente es un dispositivo que es empleado para medir las precipitaciones que caen en una determinada zona en un determinado tiempo, estos datos se registran, al punto de que puede servir para elaborar la ficha climática de la zona, a partir de todos estos datos recogidos durante meses, año tras año, se puede monitorear como fluctúan las precipitaciones a lo largo del tiempo.

DISEÑO

Descripción de la solución propuesta

Descripción general de la solución

La solución propuesta consta de un sistema que mide 3 variables: vibraciones en el terreno, posición del muro estructural y humedad. Estos, con ayuda de sensores, van a permitir ser visualizados en una pantalla y almacenados en una memoria. Los datos medidos por los sensores, que serán llevados por medio de una señal eléctrica, se acondicionarán a un filtrado, un conversor ADC un procesamiento de datos utilizando un microcontrolador, y al final se mostrarán los resultados del procesamiento en una pantalla conectada al mismo.

Los sensores que se utilizarán en el diseño del sistema son:

Acelerómetro de baja frecuencia: Este sensor se utilizará con el fin de medir la inclinación del muro estructural, con el fin de mantener monitoreados hasta los más mínimos cambios de posición de este.

Sensor de Humedad: Este sensor se utilizará con el fin de mantener monitoreada la humedad relativa en el ambiente que pueda influir con la degradación temporal de algunos materiales de estructura, especialmente las vigas de acero que lo comprenden, ya que, al mantener este índice controlado, se puede determinar casi que por completo la integridad de la edificación.

Sensor de Vibración: Este sensor, se utilizará para mantener monitoreado la vibración del muro con respecto a la del suelo, ya que, al ser un terreno con alta probabilidad de sismos, se considera que mantener un monitoreo constante de las frecuencias de vibración del muro estructural, entre otras partes fundamentales de la edificación es bastante importante, con el fin de mantener la integridad de toda la construcción y de todos los que colinden con esta.

Diagrama de Bloques

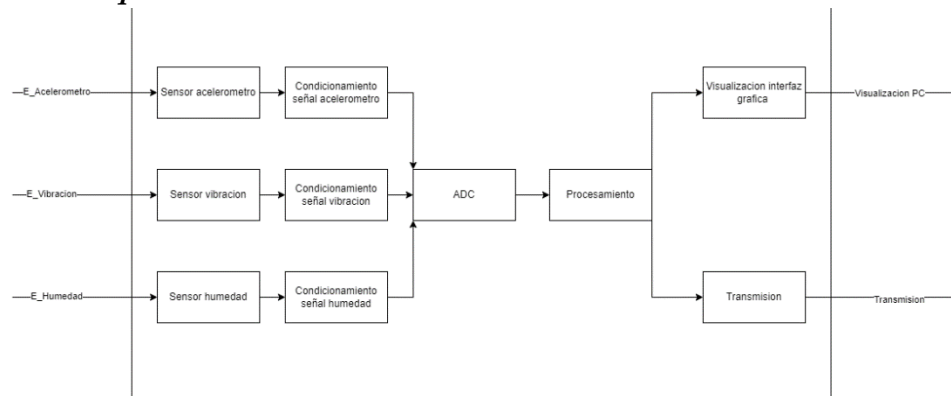


Ilustración 2 Diagrama de bloques de la solución

Limitaciones generales

A continuación, se muestran las limitaciones básicas del sistema completo, estas limitaciones están dadas por los sensores a utilizar, ya que las limitaciones del microcontrolador son menores.

Variable	Valores
Voltaje de operación	0-5 V
Temperatura de operación	-50°C – 50°C
Frecuencias de trabajo	5Hz – 2kHz (sensores)

Tabla. 1: limitaciones generales del sistema

Sensor	Voltaje	Temperatura	Frecuencia
Sensor vibración	0 a 5V	-5°C a 55°C	10 Hz a 200Hz
Sensor Acelerómetro	3 a 6 V	-5°C a 55°C	10 Hz a 500Hz
Sensor Humedad	2.7 a 5.5	-50°C a + 125°C	2 Hz a 100 Hz

Tabla. 2: limitaciones generales de los sensores

ADJUNTO AL DOCUMENTO SE DEJA LA PLANIFICACION DE PROYECTO FINAL EN FORMATO EXCEL.

Mesurando y transductor

En las especificaciones del sistema, se mencionan los transductores que se van a utilizar en el diseño actual, en esta sección se van a explicar a más detalle cada uno de estos transductores, especialmente la referencia y al porqué se escogió para este diseño.

Acelerómetro ADXL 203 EB:

El acelerómetro ADXL 203 EB, es un transductor de dos ejes que opera desde 3V de alimentación a 6V que internamente ya posee un pequeño circuito amplificador dentro del transductor, lo que facilita su uso, ya que el acondicionamiento de la señal es principalmente el filtro antialiasing.

Este transductor cuenta con 8 pines de conexión y 5 utilizables, a continuación, se muestra el esquemático para que se entiendan las abreviaturas a la hora de revisar el protocolo de pruebas.

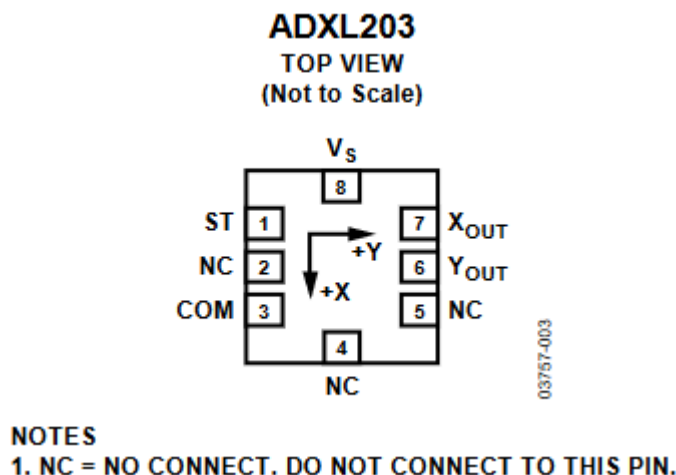


Figure 1. Esquemático del acelerómetro

Cada uno de los pines de salida corresponde a cada uno de los ejes de salida del acelerómetro, estos pines cuando el acelerómetro está en una posición neutral tienen un valor de 2.45 V aproximadamente de salida cuando se alimenta con 4V, a su vez la sensibilidad del transductor es de aproximadamente 1V/g donde g es la aceleración de la gravedad, esta referencia es importante, ya que al no presentarse aceleración lineal, este instrumento puede utilizarse como un sensor de inclinación, en concreto un sensor de posición en grados, mediante software, del muro estructural.

Sensor humedad HIH 4010:

El HIH 4010, es un sensor integrado descubierto que opera en un rango de 2,7V a 5,5V a una corriente de 200uA. Este transductor de humedad es un polímero termoestable recortado con láser que contiene un elemento de detección capacitivo integrado en el chip de acondicionamiento. La construcción multicapa del elemento sensor proporciona excelente resistencia a la mayoría de los peligros de aplicación tales como humectación, polvo, suciedad, aceites y químicos ambientales comunes. Por sus características casi lineales y gran fiabilidad fue escogido para la elaboración de este proyecto. A continuación, se presenta una gráfica de humedad relativa vs voltaje, en la cual se puede apreciar la precisión del sensor cuando es expuesto a diferentes condiciones de humedad relativa y proporciona una medida transducida de voltaje que es directamente proporcional a la HR%. Esta gráfica está bajo la escala de línea recta de mejor ajuste en donde se muestra el valor aproximado por cada 10 unidades de porcentaje de humedad relativa.

FIGURE 4. TYPICAL OUTPUT VOLTAGE (BFSL) VS RELATIVE HUMIDITY (At 0 °C, 70 °C and 5 V.)

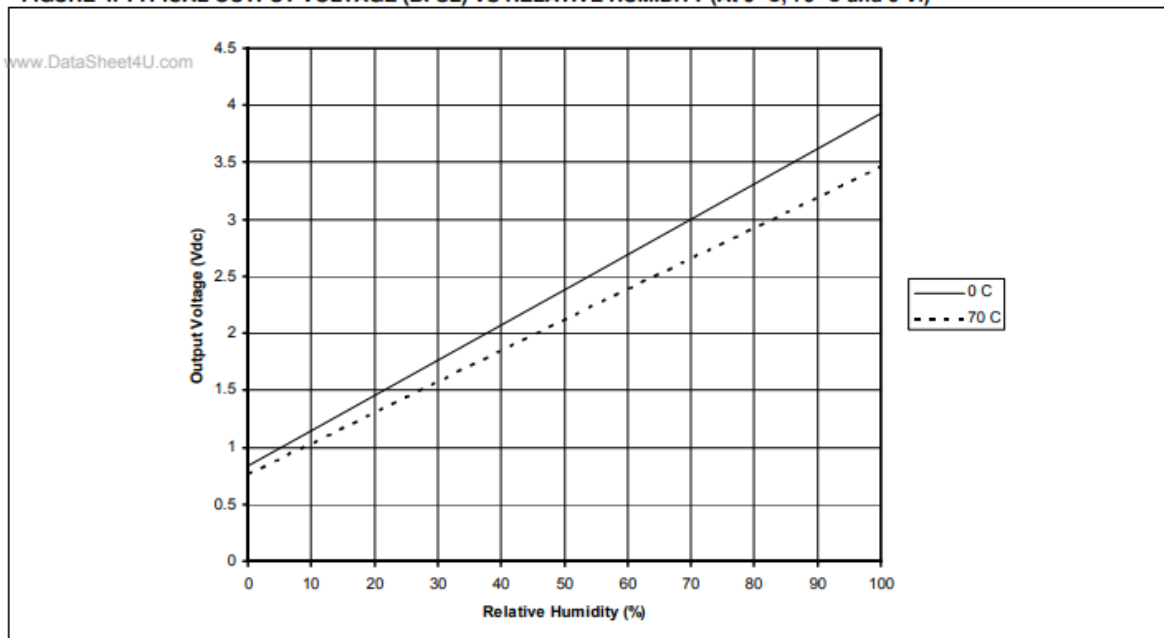


Figure 2. Salida típica de voltaje vs humedad relativa.

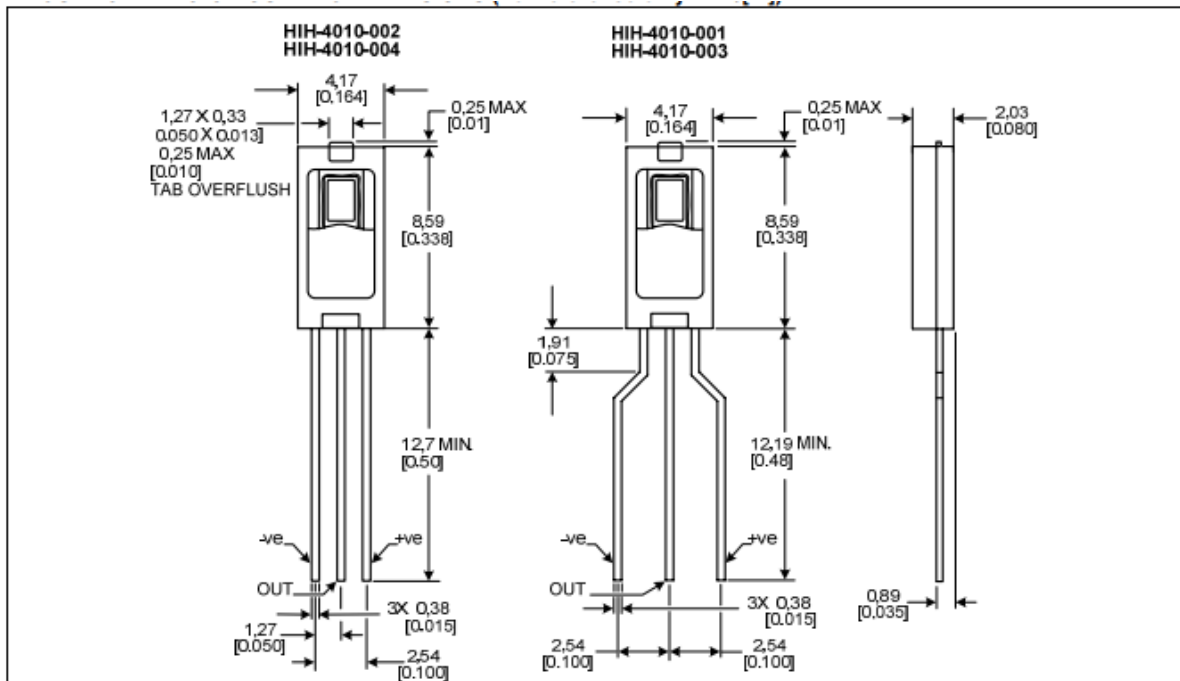


Figure 3. Dimensiones de HIH 4010

Como se puede observar en la ilustración #, el sensor HIH 4010 tiene dimensiones óptimas para ser ubicado en lugares muy pequeños, lo que expande las posibilidades de su aplicación en cualquier escenario. Con esto se reduce el espacio utilizado en el circuito PCB haciendo aun mas portable su uso y su implementación para el fin expuesto en este informe.

FIGURE 8. TYPICAL APPLICATION CIRCUIT

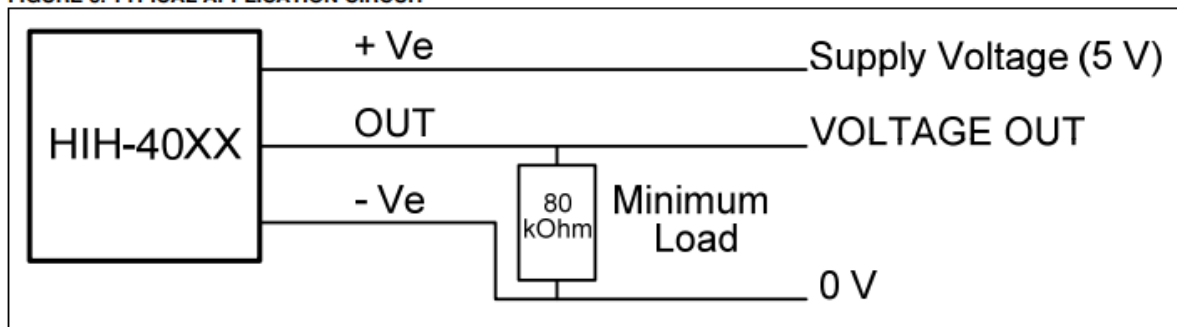


Figure 4. Esquemático de HIH 4010 y pines

La distribución y configuración de sus entradas y salidas es simple, constando de tres pines de cables conductores los cuales pertenecen al voltaje de alimentación que, en este caso, serán 5V para todo el sistema, el voltaje negativo que en este caso estará unido a tierra en 0V y finalmente la salida del sensor que muestra medidas de voltaje respecto a respuestas de humedad relativa, una vez el sensor se encarga de transducir la señal.

TABLE 2. EXAMPLE DATA PRINTOUT

Model	HIH-4010-003
Channel	92
Wafer	030996M
MRP	337313
Calculated values at 5 V V _{OUT} at 0% RH V _{OUT} at 75.3% RH	0.958 V 3.268 V
Linear output for 3.5% RH accuracy at 25 °C Zero offset Slope Sensor RH	0.958 V 30.680 mV/%RH (V _{OUT} - zero offset)/slope (V _{OUT} - 0.958)/0.0307
Ratiometric response for 0% RH to 100% RH V _{OUT}	V _{SUPPLY} (0.1915 to 0.8130)

Figure 5. Tabla de ejemplos de salidas

Finalmente se muestra una tabla en la cual se ofrecen valores para ser tenidos en cuenta una vez se realice el montaje del circuito. Con ayuda de la tabla es posible tener en cuenta unos ejemplos específicos los cuales pueden ayudar a quien lo manipule a obtener valores exactos con base en ecuaciones estipuladas teniendo en cuenta, el offset de la señal en 0 para evitar valores negativos de salida, el voltaje de salida que es la respuesta del sensor una vez transduce la señal de humedad y el valor de la señal de salida en milivoltios por cada unidad de porcentaje de humedad que varia en el proceso de medición.

Sensor Vibración KY-002:

El sensor de vibración KY-002 es un sensor de bajo costo, cargado con un resorte que envuelve una bobina, el cual permite al momento de un movimiento, cerrar el circuito, este se utiliza principalmente para detección de vibraciones de baja frecuencia y para variaciones en la estabilidad de la estructura. Su sensibilidad es de aproximadamente 0.6V./g donde g igualmente hace referencia a la aceleración de la gravedad. El valor de voltaje va a variar debido a que el sensor se comporta como una capacitancia variable.

A continuación, se muestra el esquemático del sensor para que se entiendan las abreviaturas posteriormente.



Figure 6. Esquemático del sensor de vibración

Este sensor es ideal para la aplicación de este diseño, ya que posee una linealidad casi ideal y una respuesta en frecuencia adecuada para la aplicación del proyecto, a continuación, se dejan las especificaciones del fabricante para este sensor.

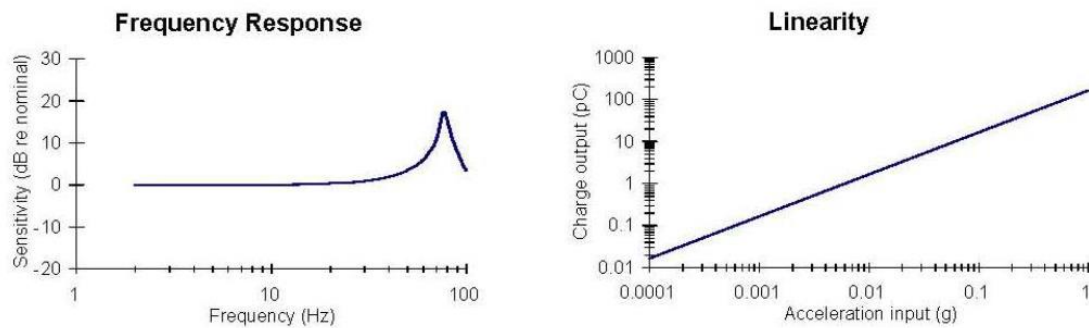


Figure 7. Linealidad y Respuesta en frecuencia del sensor de vibración

Selección de topologías y componentes

Sensor humedad HIH 4010:

Para poder implementar el sensor de humedad funcionando correctamente en su aplicación, fueron necesarias etapas de circuitos construidas mayormente con resistencias, capacitores y amplificadores operaciones que hacen posible la operatividad del transductor. Las etapas son tres y se dividen en generación de Offset utilizando la entrada Vcc, suma de offset a la señal generada por

el sensor como salida y la última etapa que es la de filtrado y amplificación. Estas serán explicadas detalladamente a continuación:

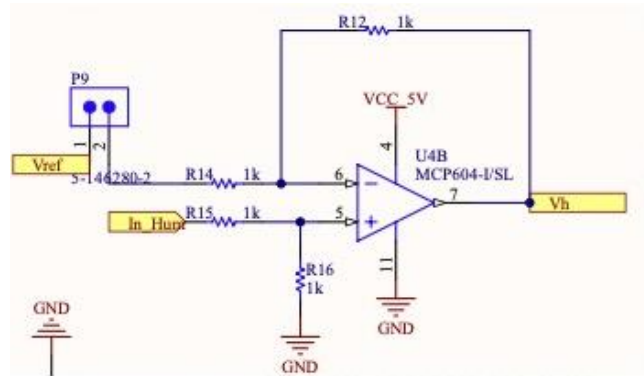


Figure 8. Etapa Sumador de señales

La etapa sumadora se encarga de sumar la señal de salida del sensor tras el proceso de transducción con una señal de voltaje Offset generada a propósito a partir del Vcc del sistema para evitar valores negativos. Sabiendo que el sensor entrega una respuesta de señal sinusoidal, la idea con este offset es permitir que la señal oscile lo suficientemente alto cuando el valor medido sea 0 para evitar que los valles de la señal entren en la región negativa de medición y con ello se garantiza la totalidad de la medición y resolución del sistema.

Esta etapa consta de tres resistencias SMD empaque 0805 con valores de 1kOhms cada una, con la intención de evitar una atenuación o amplificación de las señales sumadas. Adicionalmente se agregan unos Headers que tienen propósitos de medición una vez montado el circuito con los respectivos componentes.

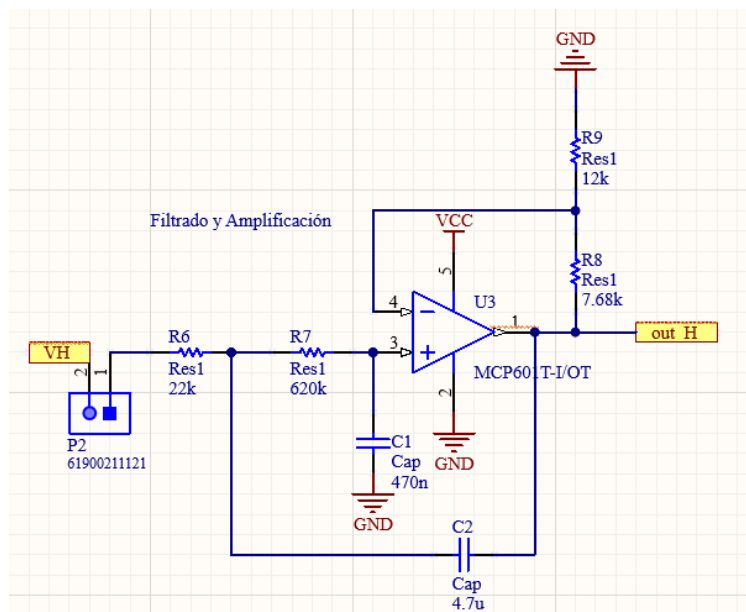


Figure 9. Etapa de filtrado y amplificación. Chevychev, Sellen-key, orden 2.

En la etapa de amplificación y filtrado se obtiene lo siguiente bajo los siguientes criterios:

Ganancia: La medida de voltaje que genera el transductor por cada unidad de HR% en porcentaje es de 0,03165 voltios, teniendo en cuenta que la medida va de 0% a 100% esta medida se multiplica por 100 obteniendo como medida máxima obteniendo 3.165 voltios a 100 HR%. Se divide entonces 5Vcc entre los 3.165 voltios resultantes obteniendo una ganancia final de 1.5797V/V para poder obtener 5V en 100 HR% para tener toda la resolución para el Vref positivo del ADC del PIC.

Filtrado: Teniendo en cuenta que el sensor maneja cambios extremadamente lentos tenemos solo señales que oscilan en bajas frecuencias y es por esto por lo que se decide hacer un filtro pasa bajos con la intención de evitar interferencias de ruido, para ello se diseña el filtro con una frecuencia de corte de 200Hz y banda de paso 20Hz. La etapa está compuesta por componentes pasivos SMD empaque 0805 con los valores que se pueden apreciar en la imagen 11. La topología seleccionada fue la Sallen-Key, el filtro es Cheychev y de orden 2.

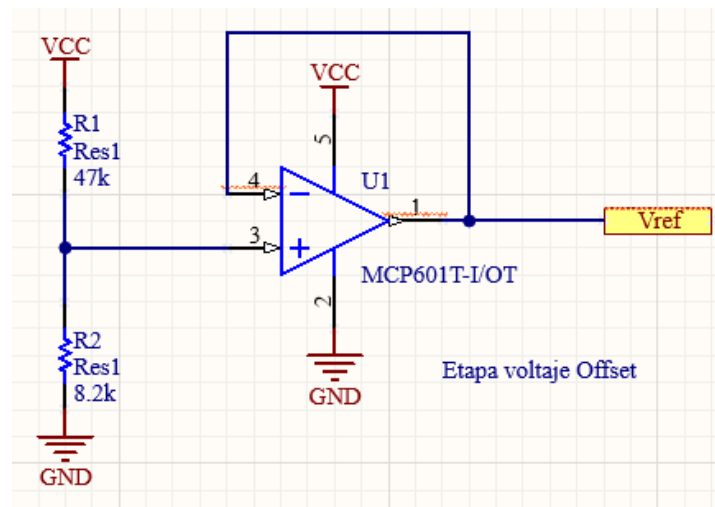


Figure 10. Etapa de voltaje offset

En la etapa de generación de voltaje Offset la intención es añadir una medida de voltaje que intersécate con los 0 de señal sinusoidal de respuesta del sensor. Con esto se garantiza que cuando la medida del sensor de HR% sea 0 los valles de la onda generada en la transducción no entren en la región negativa y con esto se asegura que no haya presencia de voltajes negativos en la medición. Para este fin se hace un divisor de voltaje entre R1 y R2 con la siguiente ecuación. La etapa está compuesta por las resistencias mencionadas anteriormente en montaje SMD con empaque 0805.

$$\frac{V_{cc} * R2}{R1 + R2} = 740mV$$

Para el diseño se estableció una caracterización sobre una humedad del 65% (porcentaje de humedad relativa en Bogotá) donde el sensor marcó un nivel de 2.2V correspondiente a lo esperado.

Acelerómetro ADXL 203 EB:

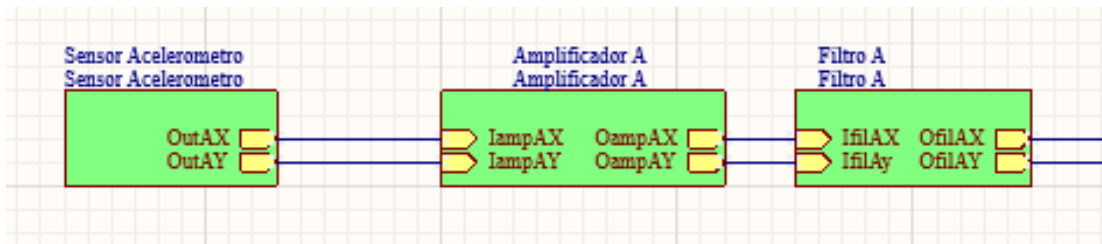


Figure 11. Diagrama de bloques Acelerómetro

Para el caso del acelerómetro, cómo se observa en la Figura anterior, se organizó un diagrama de bloques con sheet symbol en Altium para darle un orden y una mejor percepción de como fue el diseño.

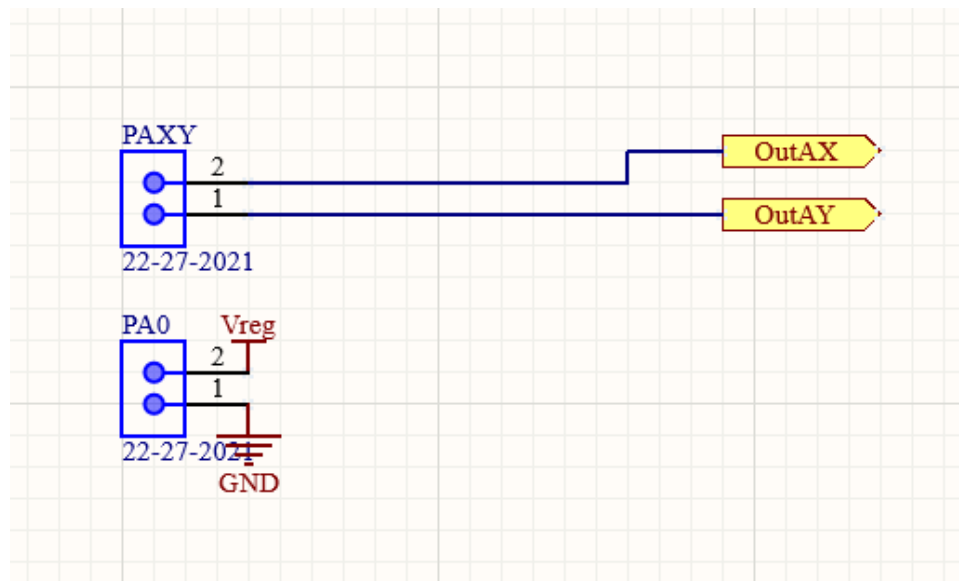


Figure 12. Bloque sensor acelerómetro

Adicionalmente se muestran las conexiones en la PCB para el acelerómetro, ya que la alimentación no va a provenir directamente de las baterías, sino de un regulador de voltaje de 5V con la etiqueta Vreg en el esquemático.

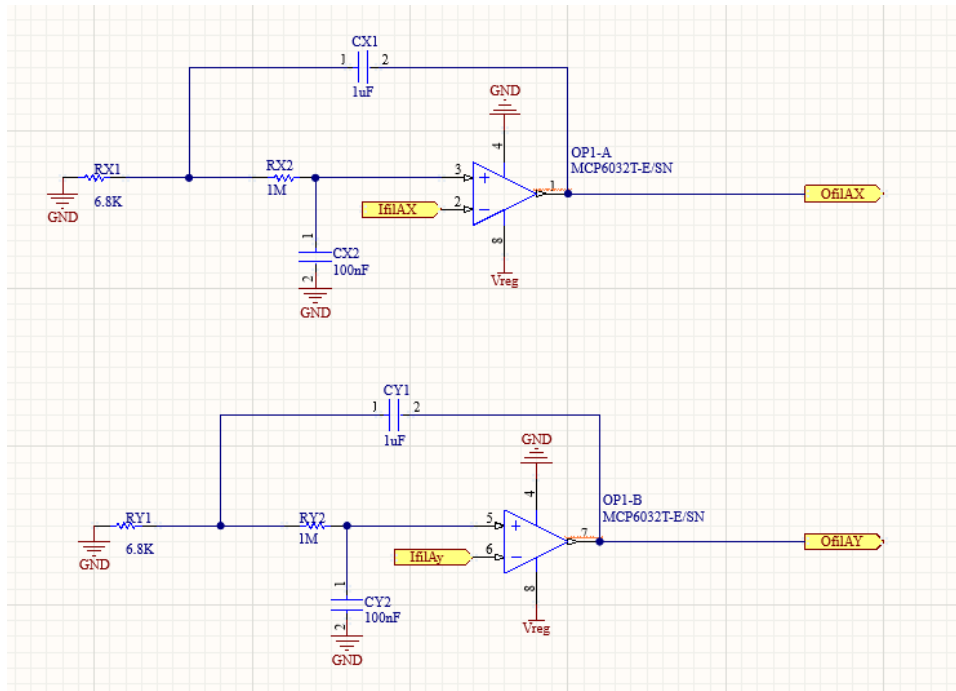


Figure 1513. Bloque filtro sensor acelerómetro

Para el acelerómetro, se decidió utilizar un filtrado con una frecuencia de corte de 10Hz y con un rango dinámico de 60dB a los 200Hz, la topología elegida para este filtro fue un Sallen Key de Orden 2 con una sola Etapa de implementación, al no tener necesidad de amplificación debido a que la salida del sensor parte de los 1.2 V en la posición más negativa (en cuanto a voltaje según la caracterización práctica en el lab), y llega hasta los 4.2 en la parte más positiva, siendo en valores de aceleración $-1g$ y $1g$ respectivamente.

Sensor Vibración KY-002:

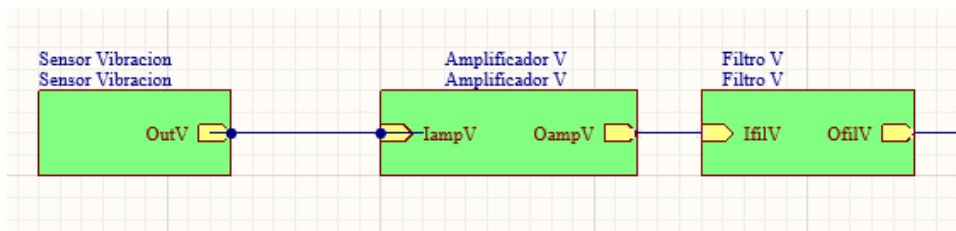


Figure 1614. Diagrama de bloque sensor vibración

Para el caso del sensor de vibración como se observa en la Figura anterior, se organizó un diagrama de bloques con sheet symbol en Altium para darle un orden y una mejor percepción de como fue el diseño.

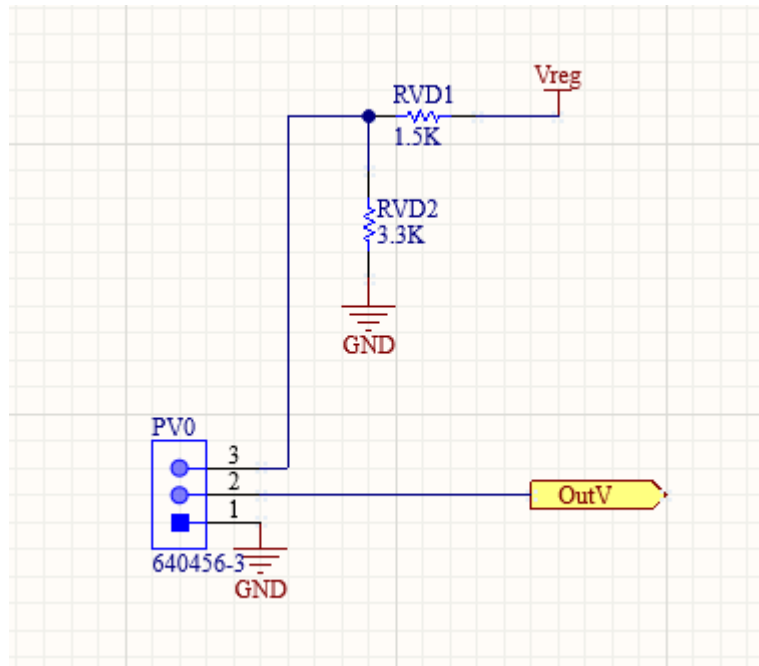


Figure 1715. Bloque sensor vibración

Para la figure anterior Observamos arriba un divisor de voltaje para bajar El Vreg que está en 5V a un voltaje de 3.4V el cual permite el correcto funcionamiento del sensor KY-002.

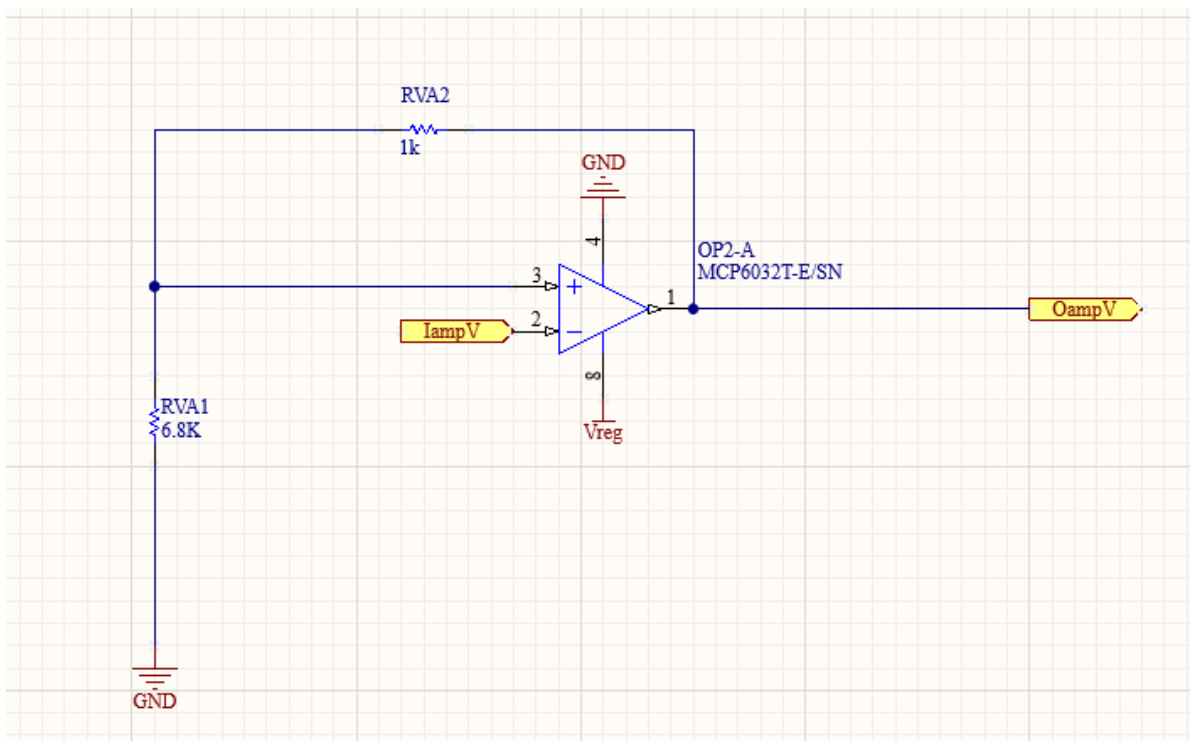


Figure 1816. Bloque amplificación sensor vibración

La siguiente etapa es la de amplificación, en donde se utiliza un amplificador inversor el cual se adecuo para tener una salida de voltaje de alrededor de 4V, dependiendo del movimiento que reciba el sensor este varia con una incertidumbre 0.05V/g. se usó un amplificador operacional MCP6032, de 8 pines, rail to rail a 5V de operación

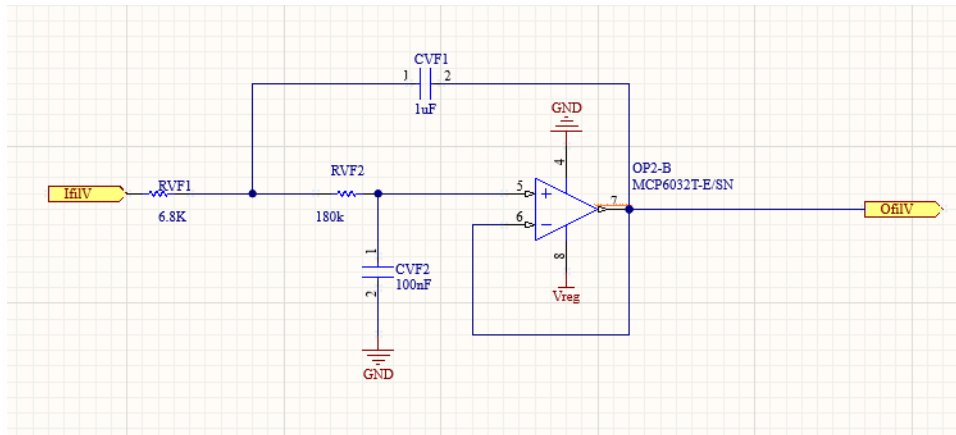


Figure 1917. Bloque filtrado sensor vibracion

Para la última etapa antes de ingresar al PIC se realiza un filtrado el cual tiene una frecuencia de corte de 10Hz y que no permite el paso a señales mayores a 100Hz, se usó un filtro chebyshev de orden 2.

Diagrama esquemático

A continuación, se mostrará el diseño del sistema globalmente, aclarando pequeñas configuraciones externas a los sensores, que afectan la calidad del diseño.

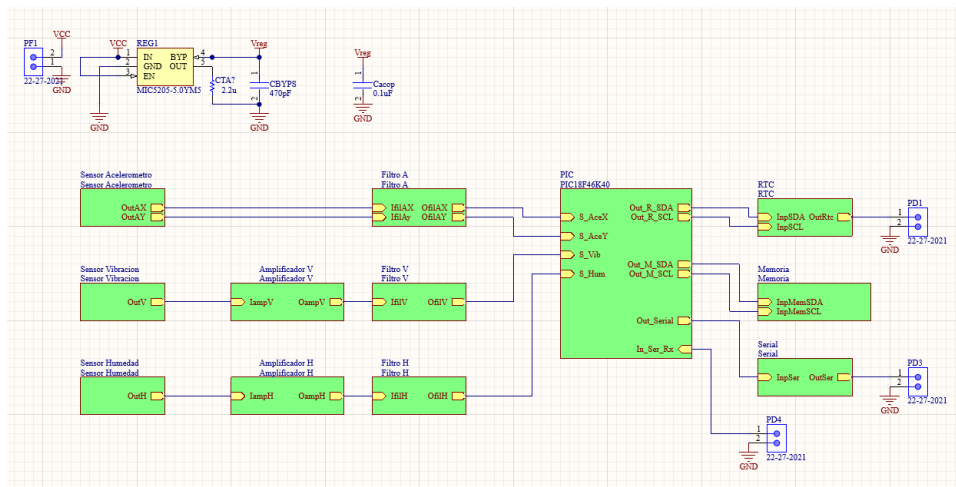


Figure 2018. Diagrama de bloques general del proyecto

Observando las distintas etapas del diseño se distinguen bloques externos al acondicionamiento de las señales de los sensores, la primera y más notoria de todas son los bloques de amplificación, donde los únicos bloques que en efecto que tienen un circuito de amplificación son el bloque del

sensor de humedad y el sensor de vibración, ya que el acelerómetro brinda una salida con voltajes suficientemente altos para su lectura y conversión correcta.

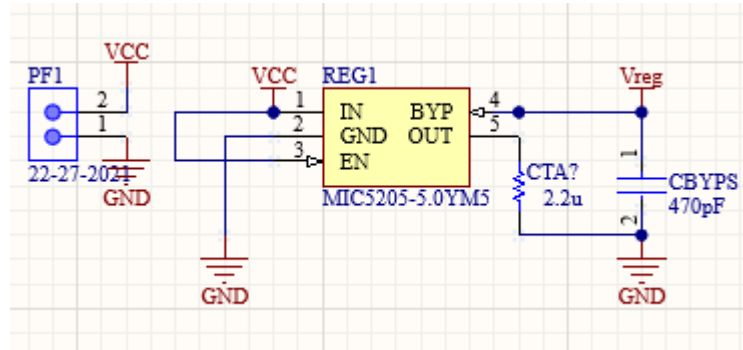


Figure 2119. Esquemático circuito regulador 5V

Una configuración importante es la que enseña la figura 22, donde se muestra un circuito externo sin bloque, este circuito es el de regulación del voltaje, donde se utilizará el dispositivo MIC5205 de entrada mínima 6V y salida de 150mA.

A continuación, se muestra con más detalle los bloques que componen el diagrama principal del sistema.

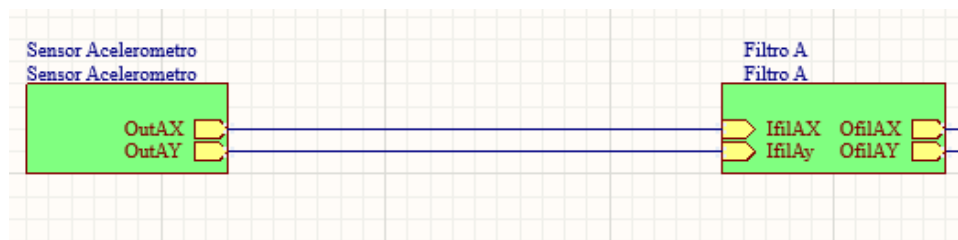


Figure 2220. Diagrama de bloques sensor acelerómetro

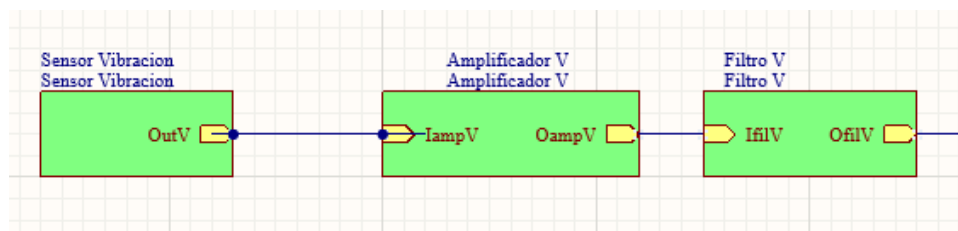


Figure 23. Diagrama de bloques sensor vibración

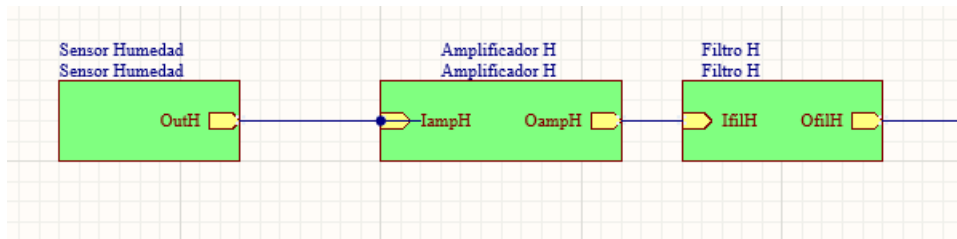


Figure 24. Diagrama de bloques sensor humedad

Ya teniendo clara la estructura analógica del diseño se enseñarán las conexiones digitales, del sistema o más bien, se mostrarán los bloques que van conectados entre sí (ya que las conexiones concretas en la PCB dependen del empaque del microcontrolador, que en el momento preciso se encuentra en envío).

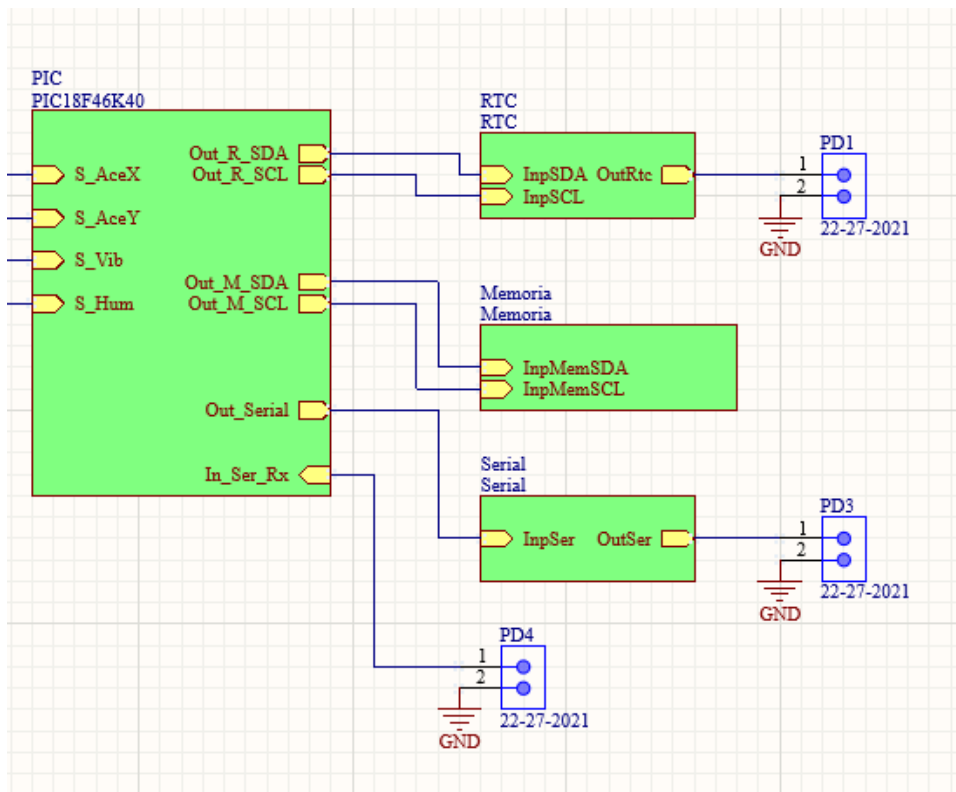


Figure25. Diagrama de bloques parte digital

A continuación, se muestran las conexiones que irán en la PCB que salen del microcontrolador hacia sus periféricos externos (RTC, EPROM, TTL, y SNAP).

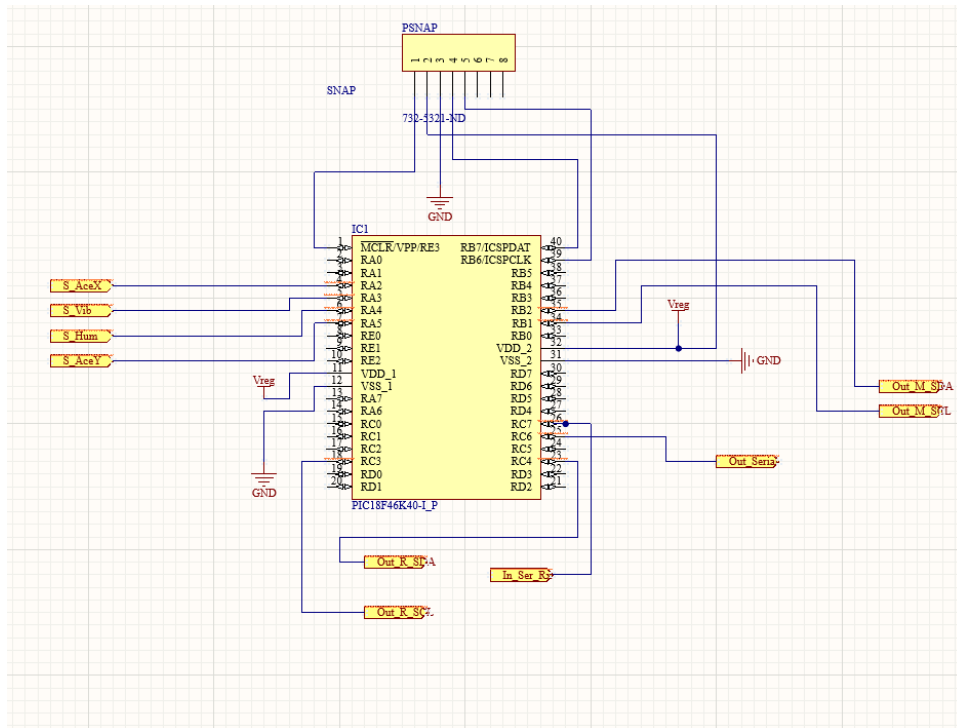


Figure26. Bloque PIC, con conexiones y salidas

Posteriormente se ven las conexiones para hacer uso del protocolo I2C del microcontrolador, donde este va a ser maestro receptor y transmisor de un módulo RTC y de una memoria no volátil EPROM con el fin de guardar los datos enviados a lo largo del funcionamiento del sistema y poder generar así un pequeño historial de datos en la interfaz de usuario.

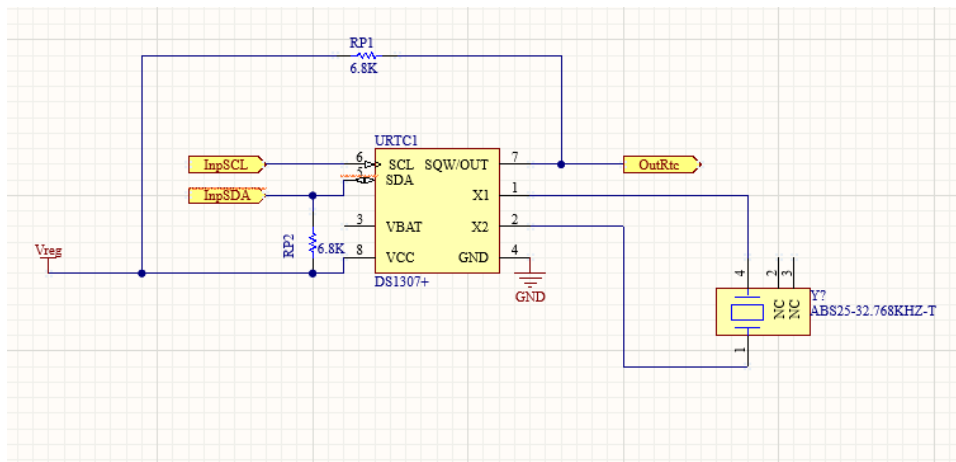


Figure 27. Bloque RTC

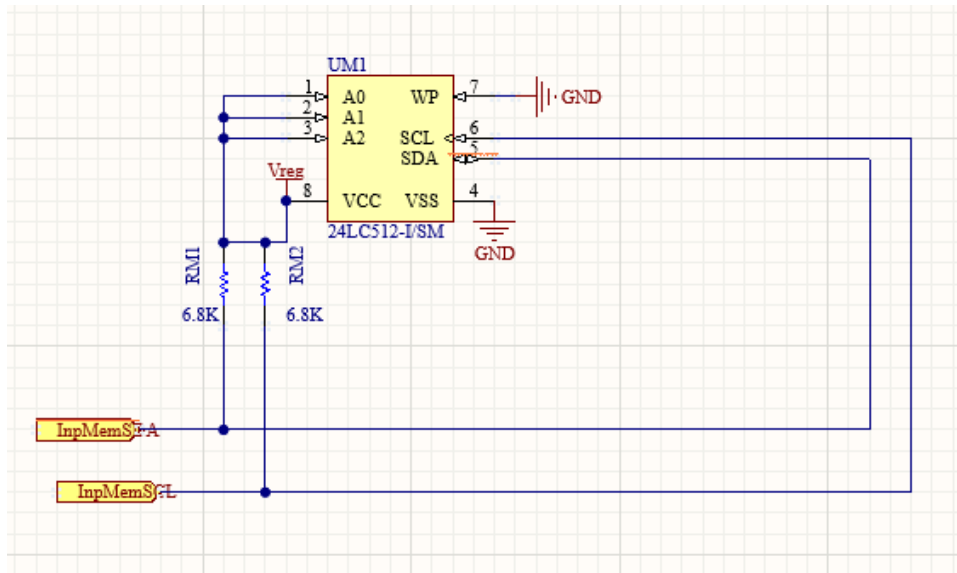


Figure 2821. Bloque Memoria no volatil



Figure 29. Bloque serial

Para el bloque serial, se conecta directamente un header el cual ira conectado al TTL que dará paso a la comunicación serial con el computador.

Simulación de los circuitos

Seguidamente se mostrarán las simulaciones de los sistemas de acondicionamiento de señal, principalmente de los filtros y del caso especial del sensor de humedad que cuenta con la amplificación de la señal dentro de una misma etapa.

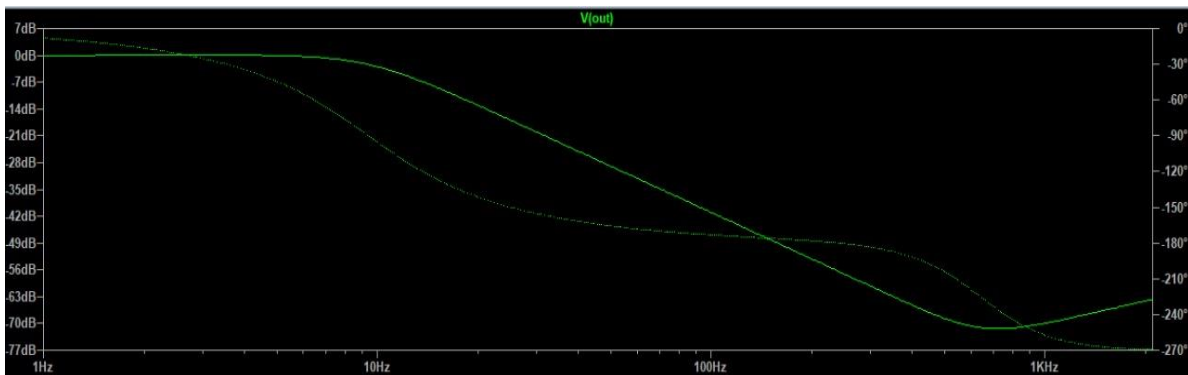


Figure 30. Simulación LTspice acelerómetro

Para el acelerómetro se observa que el rango dinámico se cumple para frecuencias menores a 200Hz, siendo ésta la frecuencia en la que se obtienen los 60dB de atenuación, iniciando este proceso desde los 10Hz de frecuencia de corte.

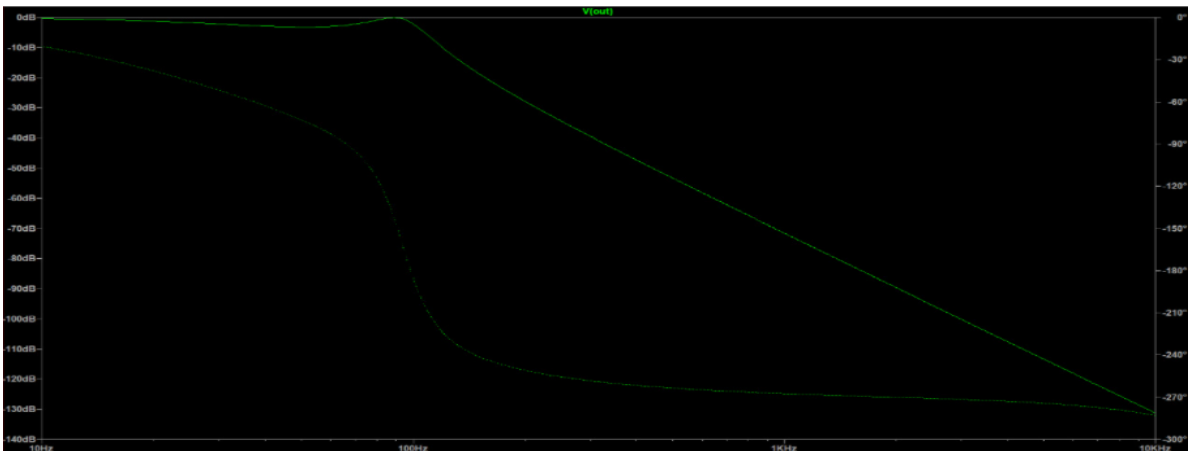


Figure 31. Simulación LTspice vibración

Para el caso del acondicionamiento del sensor de vibración tiene la configuración que es un filtro chevyshev de orden dos, a una frecuencia de corte de 100Hz y a partir de la simulación se tiene un rango dinámico de -60dB a 800Hz como se observa en la Figura 32.

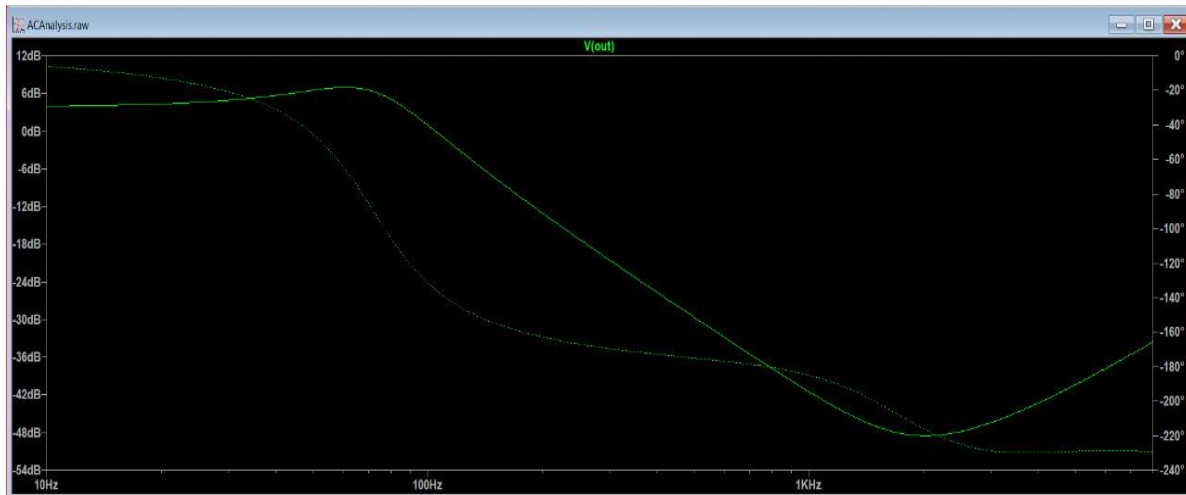


Figure 32. Simulación LTspice sensor humedad

En la generación de la etapa de acondicionamiento del sensor de humedad se obtuvo un circuito capaz de amplificar la señal de entrada por $1.57V/V$ y un filtro de 100Hz de frecuencia de muestreo y 800Hz de banda de paso. Con lo anterior se lograba un rango dinámico de -40dB y en la figura 41 se puede logra observar la simulación en el software LTspice generando el diagrama de Bode en magnitud y fase.

Layout

En las imágenes mostradas a continuación se puede apreciar el layout de la PCB. La placa cuenta con todos los componentes necesarios para el funcionamiento del sistema completo, las conexiones pertinentes entre componentes y las capas necesarias para identificar cada componente, laminar las placas de cobre y la cobertura final para empaquetar todo el circuito y protegerlo de agentes externos.



Figure 33. Layout PCB circuito completo.

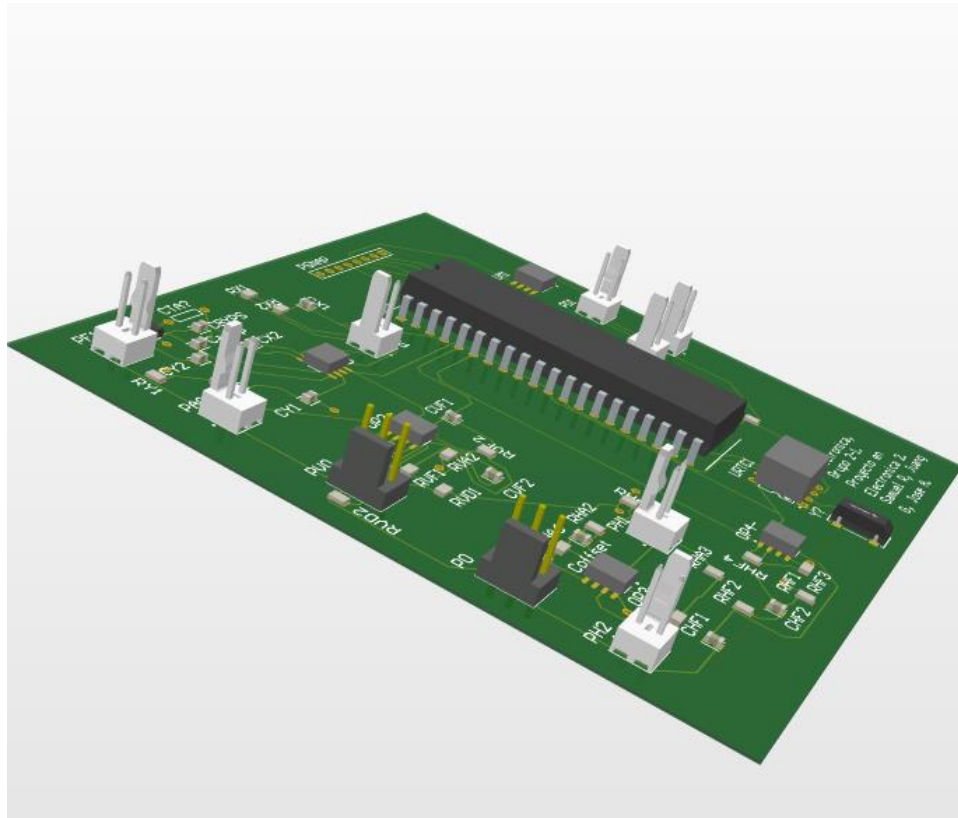


Figure 34. Vista 3D de PCB de circuito completo.

Protocolo de Pruebas

Abreviaturas

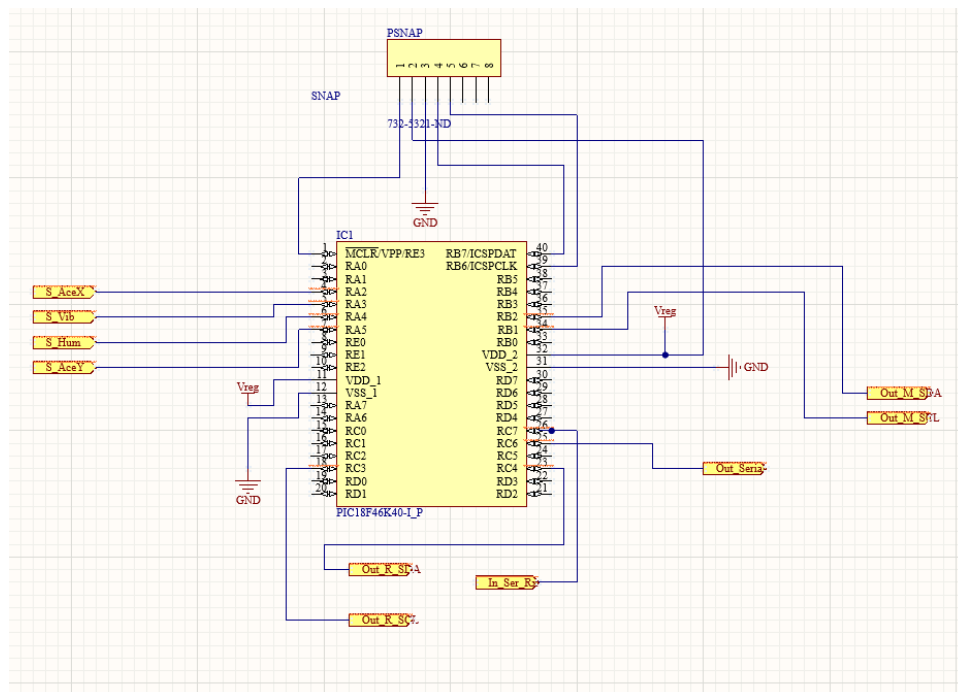


Figure 35. Mapeo del PIC

MCLR/RE3	Master Clear
Vreg	Voltaje regulado a 5V
GND	Tierra
RB7/SPDATA	PGD
RB6/SPCLOCK	PGS

Tabla 1. Pines del Snap

<i>S_AceX</i>	<i>Se utiliza el pin RA2</i>
<i>S_AceY</i>	<i>Se utiliza el pin RA5</i>
<i>S_Vib</i>	<i>Se utiliza el pin RA3</i>
<i>S_Hum</i>	<i>Se utiliza el pin RA4</i>
<i>In_Ser_Rx</i>	<i>Se utiliza el pin RC7</i>

Tabla 2. Pines de entrada al PIC

VCC	Voltaje positivo de las baterías
Vreg	Voltaje de referencia a 5V
GND	Tierra del circuito

Tabla 3. Señales de referencia

Out_Serial	Se utiliza el pin RC6
Out_R_SDA	Se utiliza el pin RC4
Out_R_SCL	Se utiliza el pin RC3
Out_M_SDA	Se utiliza el pin RB2
Out_M_SCL	Se utiliza el pin RB1

Tabla 4. Pines de salida del PIC

Introducción

Para el objeto el cual se le aplicaran las pruebas consta de 2 secciones las cuales son el circuito esquemático siendo esta la PCB donde dado a su correcto funcionamiento tendremos unas óptimas condiciones para analizar y procesar la informacion que sera adquirida, la otra seccion es la parte de validación con respecto a las salidas que se dirigen a el RTC, la memoria ROM y la salida serial.

Definición del problema

Se definirán 3 pruebas escritorio y una prueba de hardware, donde la prueba de hardware será verificada con la correcta realización del diseño del circuito en PCB, esta será el inicio para poder verificar las 3 pruebas escritorio.

Prueba escritorio RTC, se verificará el conteo en segundos que tendrá el circuito interno del RTC el cual nos servirá para comparar los ciclos que tiene de envío el protocolo I2C respecto al Pic.

Prueba escritorio Memoria, se verificará los datos enviados en el protocolo I2C respecto a los programados, observando los intervalos necesarios para que se un proceso correcto y eficiente de transmisión de datos.

Prueba escritorio Serial, se verificará el correcto funcionamiento de la conversión de binario a ASCII de la conversión del ADC a valores binarios, estos siendo comparados con los programados y teniendo en cuenta su previa calibración para hacer de esto una transmisión seria Uart efectiva.

Objetivos

Objetivo General: Comprobar que los valores experimentales están al menos un 15% por encima o por debajo de los teóricos con el fin de garantizar el funcionamiento general del sistema

Objetivos Específicos:

- Verificar el funcionamiento de los periféricos digitales
- Verificar el funcionamiento de los periféricos analógicos.

Desarrollo

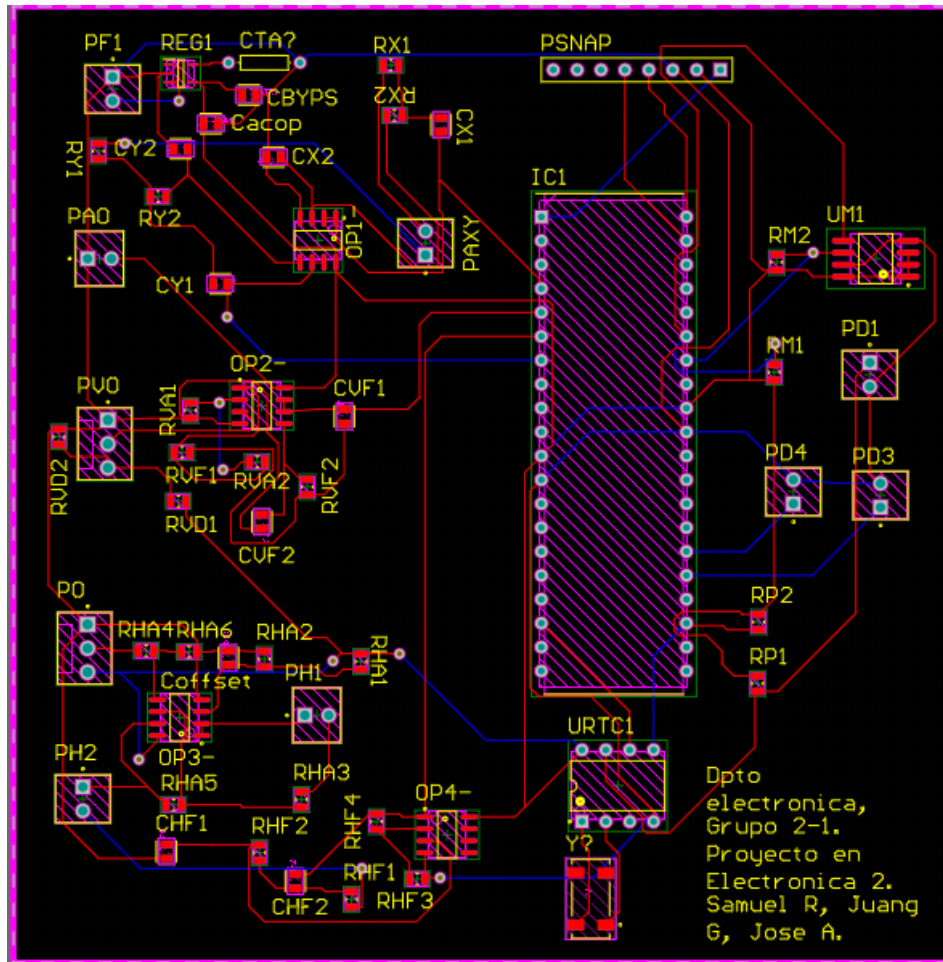


Figure 36. Mapeo del PIC

Equipo necesario para protocolo de prueba:

- Fuente DC Keysight U8031A
- Osciloscopio Digital Angilet DSO-X 2022A
- Generador de funciones Angilet 33500B
- Multímetro digital Agilent 34450A
- Módulo NI USB-6211.
- Computador con Software de procesamiento de señales

Para poder medir el desempeño del circuito tanto en simulación como el circuito impreso y soldado, se establece los protocolos que se deben seguir para tomar las medidas de interés las cuales son:

- Salida en tiempo de cada etapa.
- Polarización
- Respuesta en frecuencia

- Rango dinámico
- Distorsión
- Manejo
- CMRR

Condiciones previas a la prueba.

Las condiciones iniciales de la prueba son las siguientes:

- Tener el circuito completamente desconectado antes de la ejecución de las pruebas, y estas realizarlas casi inmediatamente al momento de conectar el sistema, con el fin de que éste se encuentre en su estado inicial.
- Ubicar las entradas de los sensores y conectar a ellas un generador de señales o en su defecto las salidas de un módulo digital, teniendo en cuenta que la señal generada por este debe ser de tipo RSE y no diferencial.
- En el Header PF1 colocar las baterías o la fuente DC.
- Ubicar el pin de salida del regulador de voltaje (pin 1), y colocar allí la punta de un multímetro.
- Ubicar los pines RA (2,3,4,5) en el slot del PIC, ya que estas son las entradas analógicas de este.

Ejecución de la prueba.

Para este protocolo de pruebas se realizan 3 pruebas importantes para tener en cuenta el funcionamiento de los periféricos digitales las cuales son:

NOTA: Para todas las pruebas de periféricos digitales se debe correr en MPLab el archivo Prueba.X para que esto se pueda llevar a cabo.

Medida de RTC

Para esta medida ubicamos el header PD1 en la PCB, donde como objetivo es observar los ciclos de reloj que recibe el RTC, los cuales tomaremos como indicativos para verificar el correcto funcionamiento del contador RTC con respecto a las salidas del pic en tiempo en segundos.

Medida de Memoria

Para esta medida ubicamos el header PD2 en la PCB, donde como objetivo es observar los valores que recibe del pic, los cuales tomaremos como indicativos para verificarlos con los que se tienen programados en el conjunto de instrucciones para el uso de la memoria.

Medida de salida serial

Para esta medida ubicamos el header PD3 en la PCB, donde como objetivo es observar la conversión binaria a ASCII la cual será enviada con el protocolo Uart, el cual serán recibidos por pantalla de computador y a partir de estos verificaremos el correcto funcionamiento de la conversión para cada sensor.

Para las mediciones de los elementos analógicos no es necesario subir ningún script al sistema, únicamente se deben tener los instrumentos de medida mencionados anteriormente en el documento.

Salida en tiempo

la salida en tiempo es la señal de salida de voltaje vs tiempo, esta deberá medirse en el impreso al final de los pines RA (2-5), usando una punta de prueba registrando los valores de voltaje a lo largo del tiempo, para así poder usar la herramienta Matlab para poder graficar dichos valores, o en su defecto utilizar el osciloscopio para verificar el comportamiento de la señal (atenuación en la frecuencia explicada en el documento de diseño).

Polarización

la medida de polarización se refiere a los valores de voltajes de interés en el circuito, estos valores son sin una señal de entrada, por lo cual la fuente de entrada deberá apagarse y simplemente dejar prendidas las fuentes de polarización VCC y V_{reg}, una vez hecho esto se deberá medir los valores de voltaje en todos los pines que estén conectados a estas fuentes.

Respuesta en frecuencia

la respuesta en frecuencia se refiere al bode del sistema, que ganancia en dB se obtiene para varias frecuencias de la señal, para esto se deberá hacer un barrido de frecuencia de la fuente de entrada del circuito (generador mencionado al inicio o módulo) y registrar los valores de amplitud de la salida (Pines RA), esto se deberá verificar teniendo frecuencias clave de medida, ya que comparar resultados de una medida con un barrido y ciertos puntos de prueba manual es importante para rectificar la veracidad de la medida tomada, como se debe tener bode de magnitud y fase, se deberán procesar los datos con la herramienta de Signal Express o Waveform utilizando la entrada del barrido como señal de excitación y la señal de RA como señal resultante.

Esta última indicación se debe tomar para todos los casos posteriores, con la señal de excitación tomada como la salida del generador de la entrada, y la señal resultante como la salida hacia los pines RA del PIC.

Rango dinámico

Esta medida es crítica ya que esto define la precisión y resolución de medida del sistema, esto solo tiene sentido al digitalizar, por lo cual se deberá medir la señal con su FFT, con el fin de medir el SINAD y ENOB, esto último se hace con una herramienta de procesamiento de software, tanto la FFT como las medidas siguientes, en laboratorio se deberá medir la salida y registrando los valores en tiempo para poder procesarlo, esta no se debe hacer con fuente de prueba, esta debe ser con el sensor instalado.

Distorsión

La distorsión es el fenómeno causado por la no linealidad de los componentes, además del ruido eléctrico que tenga el circuito, para hallar la distorsión armónica total (THD) se deberá de nuevo sacar la transformada de Fourier o FFT, para esto se debe usar un software de procesamiento o directamente con un osciloscopio si es posible, de no ser posible se deberá tomar la medida de voltaje vs tiempo y pasar por un software de procesamiento.

Implementación

Mediciones Analógicas

Ahora, ya teniendo en cuenta los criterios de diseño mostrados en las entregas pasadas del proyecto, se procedió a evaluar el funcionamiento de cada uno de los componentes analógicos del diseño, y a la vez hallar las discrepancias entre la implementación teórica y la implementación real de cada elemento del sistema.

Impedancia de entrada

Inicialmente se parte de la demostración de una impedancia mayor a 1Mohm, para esto se utilizó la caja de impedancias en serie con las entradas de cada procesamiento analógico por sensor, y se colocó un voltaje de 2 voltios DC en estas entradas, junto con un DVM y se monitoreó el punto de unión entre la entrada y la caja de impedancias, hasta que el voltaje que se muestra en el DVM llega a los 0.5V.



Figure 37. Medición de la impedancia de entrada

Filtro	Impedancia obtenida
Acelerómetro	1,120Mohm
Vibración	1,199Mohm
Humedad	>1,299Mohm

Diagramas de bode Filtros analógicos

En cuanto a los diagramas de bode se tomaron los pines de entrada PAX y PAY y las salidas de los pines 1 y 7 del OPI, estas últimas no tenían headers de prueba, por lo que se colocaron las puntas del

osciloscopio en los pins de la PCB, este procedimiento se repitió para cada uno de los acondicionamientos de los sensores, ya que el ancho de banda que se requiere por sensor es el mismo con cortes entre 10Hz y 20Hz con rango dinámico de al menos -69Db s en 800Hz.

Mediante un barrido en frecuencia de 1Hz hasta 1KHz, se realizaron las medidas de todos los acondicionamientos de los sensores. Los resultados se muestran a continuación:

Bode acelerómetro filtro analógico

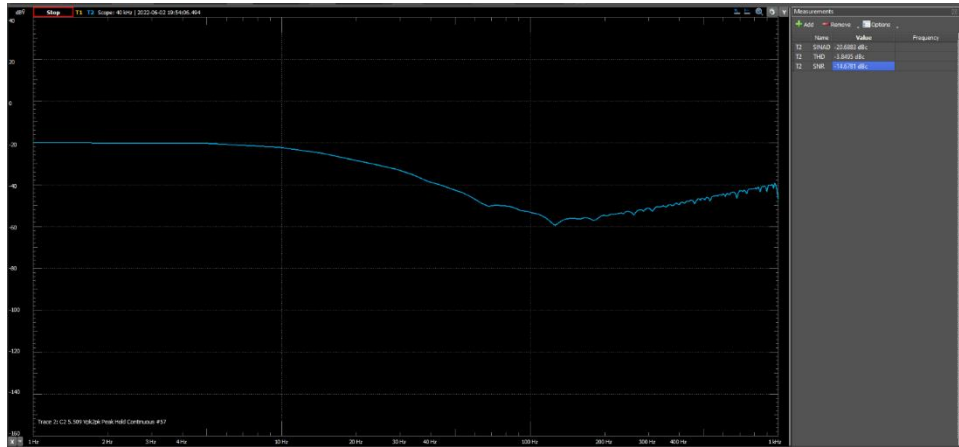


Ilustración 38

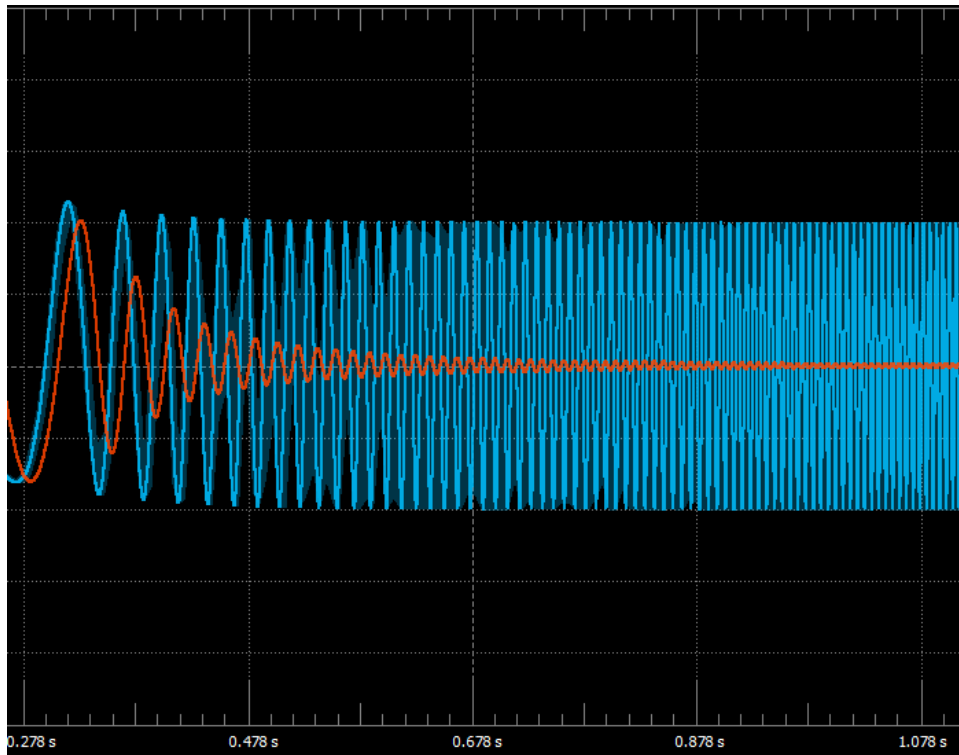


Ilustración 39

Figure 38. Diagrama de bode del acelerómetro (arriba) Comportamiento del filtro en tiempo(abajo).

En este caso se observa una mejoría bastante interesante, en cuanto con la simulación si se toma en cuenta el rango dinámico, ya que se obtiene la atenuación de los -60 dBs en la banda de 200Hz , pero a la vez, se obtiene una atenuación constante de la entrada con respecto a la salida de -20dBs según el Analog Discovery, pero en la señal de tiempo no se observa una diferencia en amplitud en la banda de paso, este comportamiento pudo darse debido a movimientos en la punta (cable) de medición (Al todos los filtros manejar un ancho de banda similar se observó el mismo comportamiento en tiempo en todos, con variaciones mínimas alrededor de los $15\text{-}20\text{Hz}$ pero nada de manera relevante).

Medidas del acelerómetro

	Name	Value	Frequency
T2	SINAD	-20.6883 dBc	
T2	THD	-3.8495 dBc	
T2	SNR	-14.6781 dBc	

Figure 40. Medidas con respecto al acelerómetro

Con respecto a las mediciones del acelerómetro, se obtuvo un desempeño bastante notable, ya que la relación entre la señal recibida y el ruido expresada en términos de Potencia (dBs) se mantiene en un margen negativo, a su vez el valor de la distorsión armónica se mantuvo menor al 4% por lo que se puede decir que la fidelidad del sistema de procesamiento analógico es bastante alta para este tipo de aplicaciones, a su vez el SINAD mantuvo un valor bastante bueno de 20dB en términos de potencia. Cabe aclarar que al ser estos valores los resultados de la salida, se debe tomar en cuenta el signo negativo.

Bode vibración filtro analógico

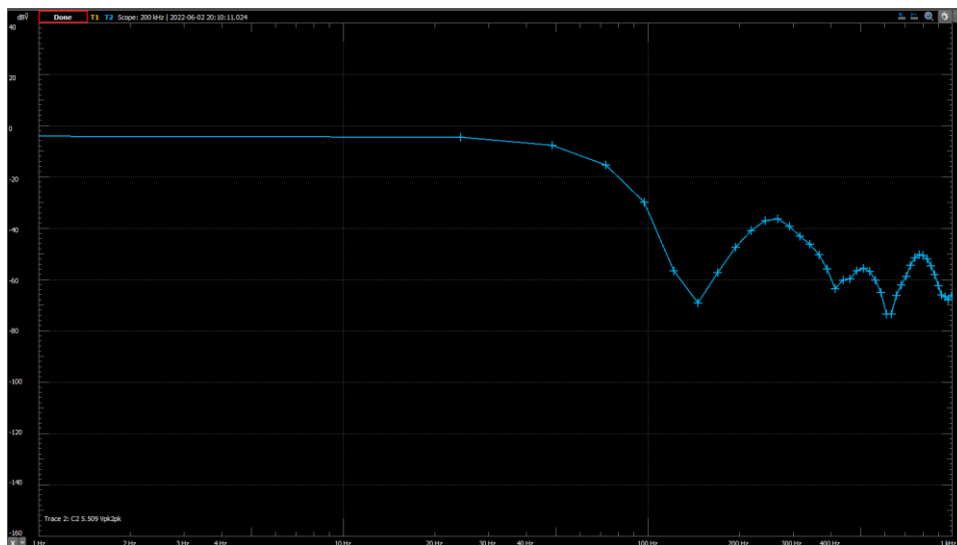


Figure 41. Diagrama de bode del acelerómetro (arriba) Comportamiento del filtro en tiempo(abajo).

Medidas del sensor de vibración

T2	SINAD	-0.8657 dBc	
T2	THD	-13.6185 dBc	
T2	SNR	17.7 dBc	

Ilustración 42 DNR sensor vibración

Bode humedad filtro analógico

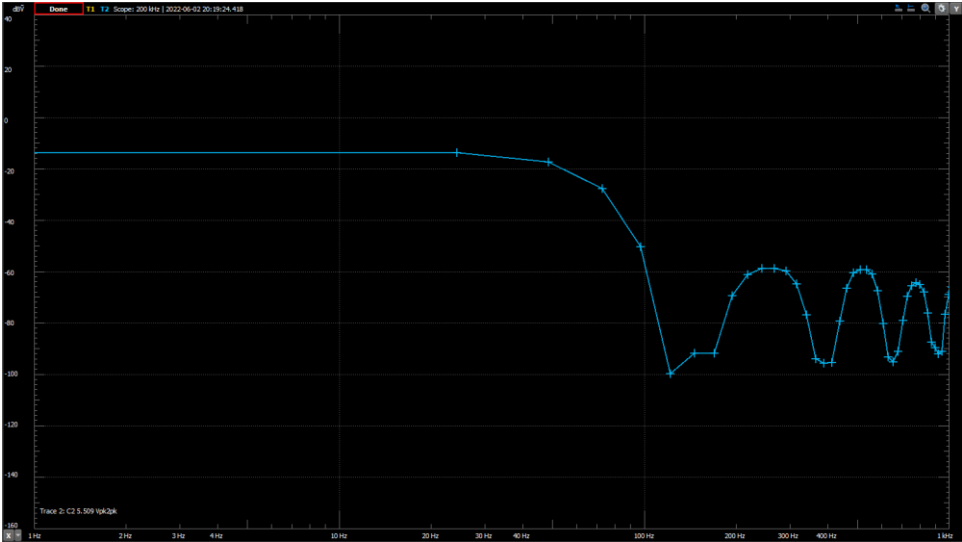


Ilustración 43 Espectro en frecuencia sensor humedad

Medidas del sensor de Humedad

	Name	Value	Frequency
T2	SINAD	-9.9309 dBc	
T2	THD	2.431 dBc	
T2	SNR	0.3931 dBc	

Ilustración 44 SNR sensor Humedad

Consumo

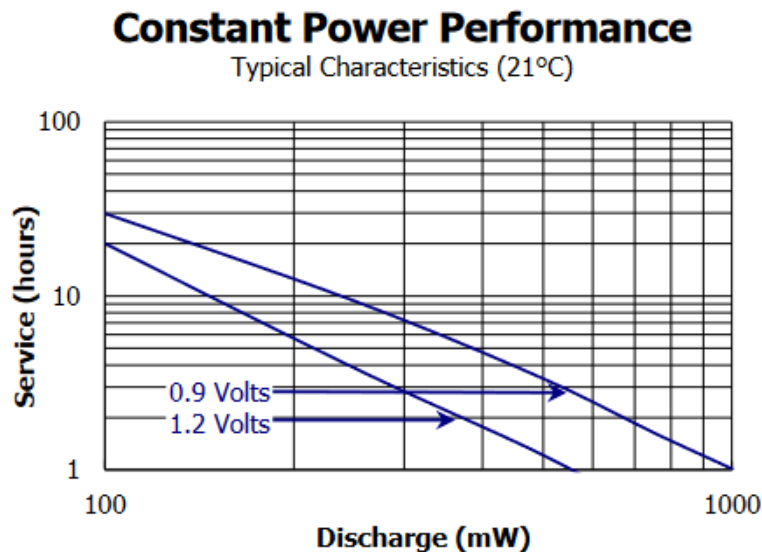
Consumo en modo normal de operación

Voltaje	Corriente	Potencia
4.97	336.6mA	1.67W

Consumo en modo de bajo consumo

Voltaje	Corriente	Potencia
2.0	6.3mA	12.6 mW

NOTA: Si se toma una capacidad total de mAh que se provee por el fabricante Energizer, la tasa de descarga a 1.2 volts (límite de bajo consumo con ADC funcional, tomando en cuenta una sola batería) se estimó la duración del sistema en bajo consumo de aproximadamente 300 horas, y en consumo norma, por la polarización de señales y los sensores que se utilizaron, este tiempo se vería reducido en gran medida, ya que el consumo usual es aproximadamente 1000 veces mayor que en bajo consumo, pero con una fidelidad de datos mucho más alta.



Parte digital

Filtro digital FIR

En el proceso de diseño del filtro analógico se escogieron ciertos parámetros a conveniencia para tener los mejores resultados posibles ante las características de cada sensor y todo el sistema. Se diseñó un filtro FIR pasábamos de mínimo orden, con una frecuencia de muestreo de 1kHz, frecuencia de paso de 20Hz y frecuencia de corte de 200Hz, esto debido a que el

comportamiento de los sensores es lento y gradual. El diseño se hizo a través de la herramienta Filter Designer de Matlab y se puede observar entonces el diagrama de bode del filtro en donde se puede observar que el ripple empieza en los 200Hz y la magnitud de este está por debajo de los 50dB corroborando el cumplimiento de lo requerido para la implementación del filtro. Para lograr obtener una correcta cuantización se tiene en cuenta que se quiere una relación SNR con rango dinámico de 60dB y se implementa la siguiente ecuación:

$$SNR = 6.02 N + 1.76 \text{ dB}$$

En donde SNR es Signal to Noise Relation y N el número de bits que se necesitan para cumplir con lo deseado. La ecuación se implementa para saber la cantidad de bits que son requeridos para que, bajo las condiciones y parámetros del sistema, el filtro digital funcione de manera óptima. Para esto se despeja de la ecuación el N obteniendo como resultado 9.674 y bajo este criterio se decide entonces usar 10 bits de cuantización y se decide hacerlo en punto fijo.

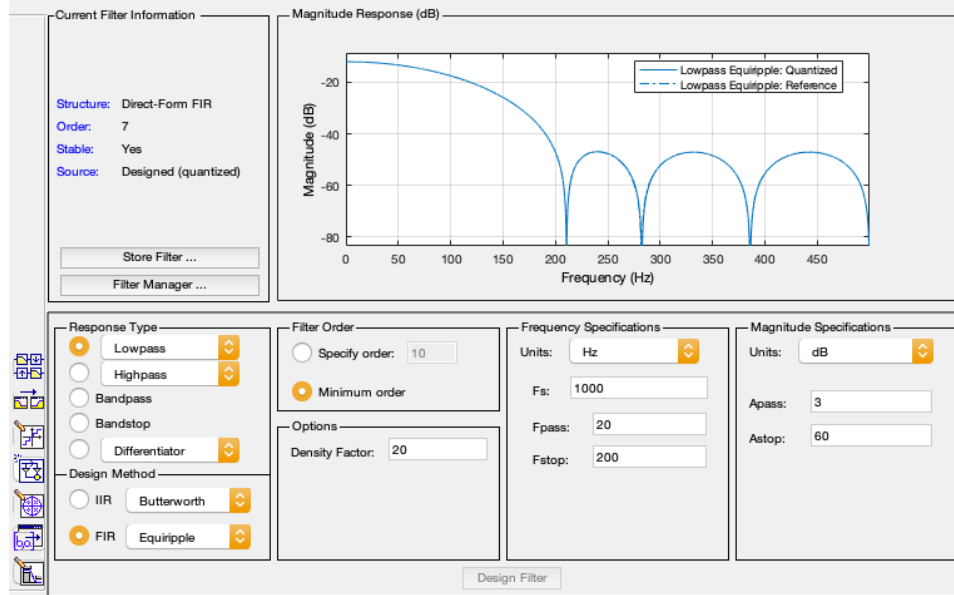


Ilustración 45 Diseño filtro FIR digital

Habiendo diseñado el filtro se procede a extraer los coeficientes, que en este caso son simétricos, para implementarlos al código fuente del proyecto en el microcontrolador obteniendo lo siguiente:

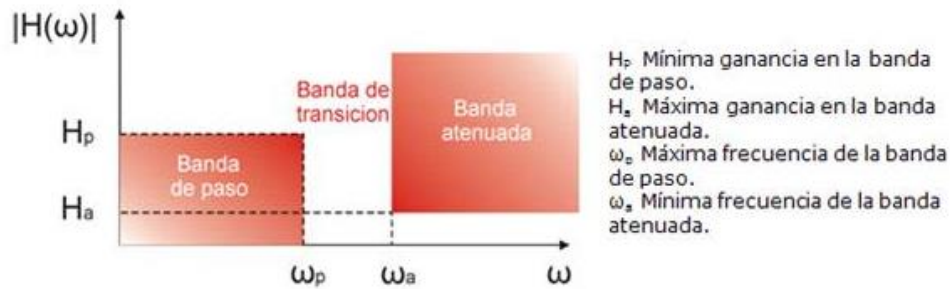
```
const int BL = 8;
const int16_T B[8] = {
    640, 1552, 2624, 3344, 3344, 2624, 1552, 640
}
```

Para poder determinar el orden del filtro se utilizaron las siguientes ecuaciones:

$$\alpha(\omega) = 10 \log \frac{1}{|H(\omega)|^2} = -20 \log |H(\omega)|$$

Ecuación 1 Ecuación Alpha

Donde se utiliza la encerrada en la caja azul para los fines de la práctica. La anterior es para calcular el parámetro de discriminación K_d en términos de α_p y α_a utilizando la ecuación 1 y teniendo los valores $H(\omega_p) = 20\text{Hz}$ y $H(\omega_a) = 200\text{Hz}$. Reemplazando en la ecuación encerrada en la caja azul se obtienen los valores -26.02 y 46.02 respectivamente.



Ecuación 46 diagrama de ganancias de banda

Para obtener el valor de K_d se aplica entonces la ecuación para el parámetro de discriminación:

$$K_d \equiv \sqrt{\frac{1/H_p^2 - 1}{1/H_a^2 - 1}} = \sqrt{\frac{10^{\alpha_p/10} - 1}{10^{\alpha_a/10} - 1}}$$

Donde sí reemplazamos con los valores de Alpha respectivos obtenidos anteriormente resulta $K_d = 0.998$. Teniendo dicho valor se prosigue a calcular el valor del parámetro de selectividad el cual se calcula a partir de la siguiente ecuación:

$$K_s \equiv \frac{\omega_p}{\omega_a}$$

Donde $\omega_p = 20$ y $\omega_a = 200$; $K_s = 0.1$.

Teniendo ya los valores de parámetros de discriminación y selectividad se puede entonces calcular el orden requerido para que el filtro funcione óptimamente bajo la siguiente ecuación de diseño:

$$n \geq \frac{\ln K_d}{\ln K_s}$$

Resultando un $n \geq 1$. Donde n es el número de orden del filtro Butterworth a partir de los procedimientos de diseño para implementación en el sistema propuesto. Teniendo en cuenta eso el orden se obtiene un filtro orden 7 cumpliendo con los requerimientos necesarios.

En cuanto al criterio de sobremuestreo, este no se tomó mucho en cuenta, ya que la aplicación actual implica cambios muy leves en los datos, y en cuanto a los filtros, para una aplicación con un rango dinámico acertado, se mantuvo una frecuencia de un valor fijo de 1K, ya que al implementar en el ADC una frecuencia menor, el auto trigger se desincronizaba con el Timer utilizado, por lo que se mantuvo este valor, que de por sí implicaba un sobremuestreo de más de 1000 veces las frecuencias esperadas de los fenómenos.

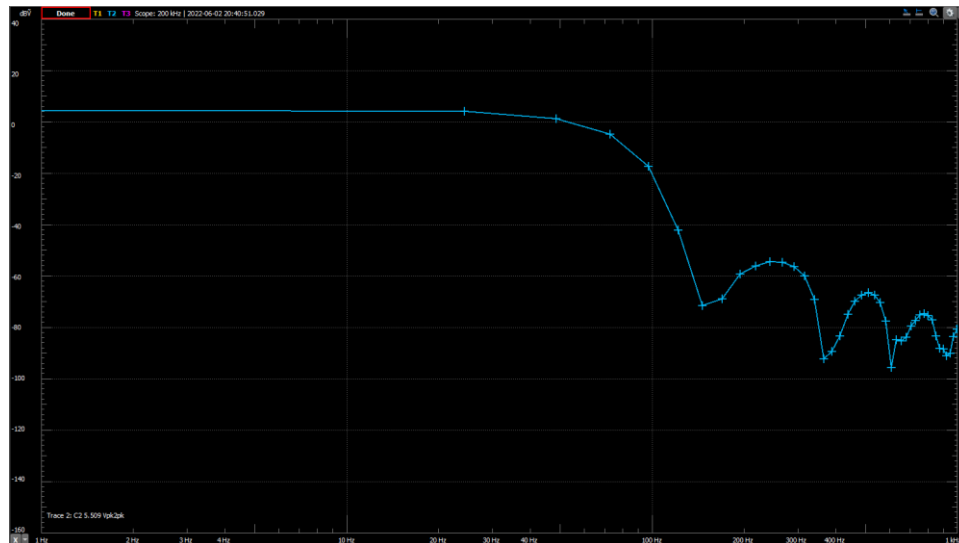


Ilustración 47 Espectro en frecuencia

	Name	Value	Frequency
T2	SINAD	-7.9295 dBc	
T2	SNR	-2.1653 dBc	
T2	ENOB	-1.60954	

Ilustración 48 Resultados de sistema

Código del PIC

```
/**
Generated Main Source File

Company:
    Microchip Technology Inc.

File Name:
    main.c

Summary:
    This is the main file generated using PIC10 / PIC12 / PIC16 /
PIC18 MCUs

Description:
    This header file provides implementations for driver APIs for
all modules selected in the GUI.
    Generation Information :
        Product Revision   : PIC10 / PIC12 / PIC16 / PIC18 MCUs -
1.81.7
        Device            : PIC18F46K40
        Driver Version     : 2.00
*/

/*
(c) 2018 Microchip Technology Inc. and its subsidiaries.

Subject to your compliance with these terms, you may use
Microchip software and any
    derivatives exclusively with Microchip products. It is your
responsibility to comply with third party
    license terms applicable to your use of third party software
(including open source software) that
    may accompany Microchip software.

THIS SOFTWARE IS SUPPLIED BY MICROCHIP "AS IS". NO WARRANTIES,
WHETHER
    EXPRESS, IMPLIED OR STATUTORY, APPLY TO THIS SOFTWARE,
INCLUDING ANY
```

IMPLIED WARRANTIES OF NON-INFRINGEMENT, MERCHANTABILITY, AND FITNESS

FOR A PARTICULAR PURPOSE.

IN NO EVENT WILL MICROCHIP BE LIABLE FOR ANY INDIRECT, SPECIAL, PUNITIVE,

INCIDENTAL OR CONSEQUENTIAL LOSS, DAMAGE, COST OR EXPENSE OF ANY KIND

WHATSOEVER RELATED TO THE SOFTWARE, HOWEVER CAUSED, EVEN IF MICROCHIP

HAS BEEN ADVISED OF THE POSSIBILITY OR THE DAMAGES ARE FORESEEABLE. TO

THE FULLEST EXTENT ALLOWED BY LAW, MICROCHIP'S TOTAL LIABILITY ON ALL

CLAIMS IN ANY WAY RELATED TO THIS SOFTWARE WILL NOT EXCEED THE AMOUNT

OF FEES, IF ANY, THAT YOU HAVE PAID DIRECTLY TO MICROCHIP FOR THIS

SOFTWARE.

*/

```
#include "mcc_generated_files/mcc.h"
```

```
#include <stdio.h>
```

```
#include <stdlib.h>
```

```
#include "/filtros.h"
```

```
#include "/i2c.h"
```

```
#include "/rx.h"
```

```
#include "/filtros.h"
```

```
#include "/i2c.c"
```

```
#include "/rx.c"
```

```
//METER EL ARCHIVO .H DE LOS FILTROS
```

```
////////////////////////////////////VARIABLES
```

```
 Globales////////////////////////////////////
```

```
long Valor_ADC, Valor_ADCF;
```

```
char Ax, Ay, Hum, Vib; //Datos ya tratados para enviarse al serial
```

```
char Ax_adc, Ay_adc, Hum_adc, Vib_adc ; //Resultados del adc que entran en las
```

```
//funciones de conversion
```

```

int Conteo_ADC, cont; // contador para cambiar el source del ADC
int unidad, decena, centena; // salida para UART de cada sensor
char ID; //Variable para la transmisi3n del identificador
//////////////////////////VARIABLES DE LOS
FILTROS//////////////////////////

#define BL 8
const int16_t B[BL] = {640,1544,2608,3328,3328,2608,1544,640};
int x[BL]; //filtro fir
int k = 0;
//////////////////////////VARIABLES TRANSMISION Y
RECEPCION//////////////////////////
long arreglo; //vector para guardar los datos de i2c para enviar o
recibir
//////////////////////////FUNCIONES
UTILIZADAS//////////////////////////
void Interrupcion_S(void);
void Enviar_Sensores(void);
char Identificador(int);
void BCD(long);
long filtrarFIR(long);
void i2c(void);

/*
                                Main application
*/
void main(void)
{
    // Initialize the device
    SYSTEM_Initialize();

    // Enable the Global Interrupts
    INTERRUPT_GlobalInterruptEnable();

    // Disable the Global Interrupts
    //INTERRUPT_GlobalInterruptDisable();

    // Enable the Peripheral Interrupts
    INTERRUPT_PeripheralInterruptEnable();

```

```

// Disable the Peripheral Interrupts
//INTERRUPT_PeripheralInterruptDisable();

TMR2_Initialize();
ADCC_Initialize();
ADCC_SetADInterruptHandler(Interrupt_S);
ADCC_StartConversion(channel_ANA2);
TMR2_Start();
Ax = '0';
Ay = '0';
Hum = '0';
Vib = '0';
ID = 0;
Conteo_ADC = 0;
while (1)
{
    arreglo = rx();//Funcion para recibir write y read

}
}
void Enviar_Sensores(){

    TX1REG = ID;
    while (TXSTAbits.TRMT == 0)
        ;
    TX1REG = unidad + 48;
    while (TXSTAbits.TRMT == 0)
        ;
    TX1REG = 46;
    while (TXSTAbits.TRMT == 0)
        ;
    TX1REG = decena + 48;
    while (TXSTAbits.TRMT == 0)
        ;
    TX1REG = centena + 48;
    while (TXSTAbits.TRMT == 0)

```

```

        ;
    TX1REG = 0x0A;
    while (TXSTAbits.TRMT == 0)
        ;
    TX1REG = 0x0D;
    while (TXSTAbits.TRMT == 0)
        ;

}

void Interrupcion_S() { //Rutina de interrupción principal

    TMR2IF = 0;
    ADIF = 0;

    Valor_ADC = ((adc_result_t) ((ADRESH << 8) + ADRESL));

    Valor_ADC = (0.9879 * Valor_ADC); //Conversion para tener
    el valor ADC de 0 a 1000
    if (Valor_ADC >= 1000){
        Valor_ADC = 1000;
    } //Asegurar lecturas dentro del rango de medicion

    ID = Identificador(Conteo_ADC); //Función para determinar
    el sensor

    Valor_ADCF = filtrarFIR(Valor_ADC); //Envío del valor ADC
    para los filtros

    BCD(Valor_ADCF);
    if (cont == 100){
        cont = 0;
        Enviar_Sensores(); //Transmisión de datos
        i2c(read,write,adressH, adress1, &data); //Llamado a
    función de lectura, escritura, etc de la memoria.
    }
    else {
        cont++;
    }
}

```

```

    }
    Conteo_ADC++;
    TMR2_Stop();
    TMR2_WriteTimer(0);

    if (Conteo_ADC > 3){
        Conteo_ADC = 0;
        __delay_us(1);
        TMR2_Start();
        ADCC_StartConversion(channel_ANA2);

    }
    else if (Conteo_ADC == 0){
        __delay_us(1);
        TMR2_Start();
        ADCC_StartConversion(channel_ANA2);
    }
    else if (Conteo_ADC == 1){
        __delay_us(1);
        TMR2_Start();
        ADCC_StartConversion(channel_ANA3); //Cambiar de canales
para probar
    }
    else if (Conteo_ADC == 2){
        __delay_us(1);
        TMR2_Start();
        ADCC_StartConversion(channel_ANA4);
    }
    else if (Conteo_ADC == 3){
        __delay_us(1);
        TMR2_Start();
        ADCC_StartConversion(channel_ANA5);
    }
    else {}

}

```

```

void BCD ( long num ){
    centena = ((num/2) % 100) % 10 ;
    decena = ((num/2) / 10)% 10;
    unidad = (num/2) / 100;
}

char Identificador (int sens){
    char Out;
    if (sens == 0){
        Out = 'A';
    }
    else if (sens == 1){ Out = 'V'; }
    else if (sens == 2){ Out = 'H'; }
    else if (sens == 3){ Out = 'D'; }
    return Out;
}

long filtrarFIR(long in)
{
    RD0=1;
    int i = 0;
    x[k]= in;
    int inx = k;

    long y = 0;

    for(i=0; i<BL; i++)
    {

        y += (uint16_t)x[inx] * (uint32_t)B[i]; //Pac
        inx = inx != 0 ? inx - 1 : BL - 1;
    }
    k++;
    k = (k>=BL) ? 0 : k;
    RD0=0;
}

```



```

return y>>8;

}

/**
End of File
*/

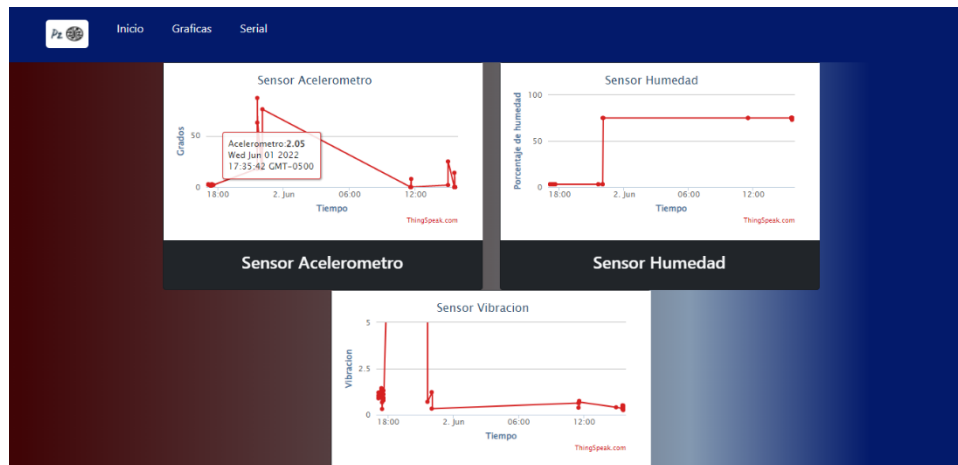
```

Posteriormente al procesamiento de cada muestra promedio, esta se envía al módulo de memoria, mediante i2c para si eventualmente se necesita algún dato sea posible requerirlo en la interfaz de usuario, esto se hace mediante el envío de la etiqueta del sensor con el dato tomado por el puerto serial (TTL), y dentro de una modificación en la base de datos, se genera el valor de memoria en hardware donde se encuentra el dato.

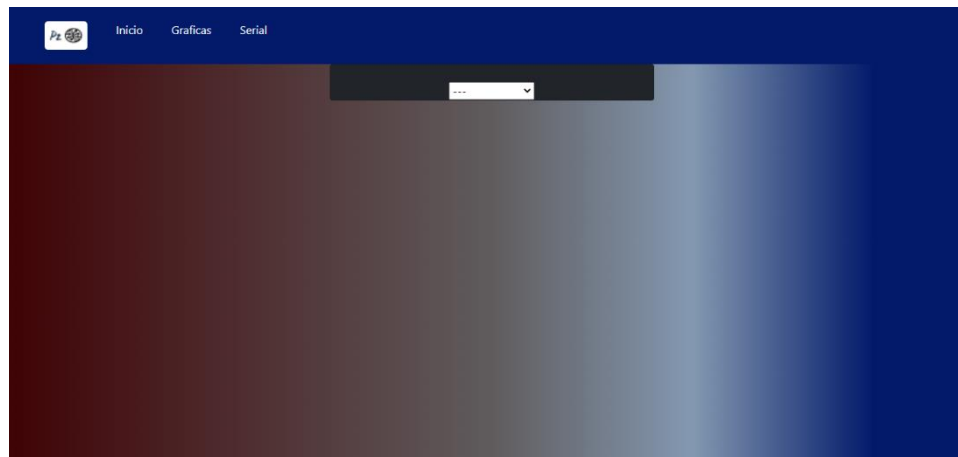
Interfaz de usuario



Página de inicio de la interfaz de usuario para el proyecto final, se realizó con las tecnologías de MERN stack, las cuales están constituidas por una base de datos NoSQL llamada MongoDB, Express que es el encargado de la conexión entre backend y frontend, React que es toda la interfaz gráfica y Node siendo el backend de todo el proyecto, todas estas tecnologías están basadas en javascript, además se utilizó un script en Python el cual era el encargado de enviar los datos de los sensores tanto a ThingSpeak y a la base de datos.



Página de graficas de los valores, teniendo 3 graficas las cuales plotean los valores de los sensores de Humedad, Vibración y Aceleración, estos se reciben de forma serial y son enviados con un script de Pyhton a ThingSpeak, además son enviados a una base de datos NoSQL llamada MongoDB



Pagina serial, donde se encuentra un seleccionador para mostrar los datos del sensor deseado

The image shows a web interface for the serial communication. It features a dropdown menu with a downward arrow, indicating a selection option for the sensor data to be displayed. Below the dropdown, there is a table with columns for sensor ID, timestamp, and value.

Sensor	Timestamp	Value
0X0	2022-06-03T03:43:46.732	0
0X1	2022-06-03T03:43:46.732	0
0X2	2022-06-03T03:43:46.732	0
0X3	2022-06-03T03:43:46.732	0
0X4	2022-06-03T03:43:46.732	0
0X5	2022-06-03T03:43:46.732	9
0X6	2022-06-03T03:43:46.742	10
0X7	2022-06-03T03:43:46.742	14
0X8	2022-06-03T03:43:46.742	14
0X9	2022-06-03T03:43:46.742	12
0XA	2022-06-03T03:43:46.742	9

Selección Acelerómetro, para este observamos que consta de 3 secciones las cuales son la casilla de hora en donde se indica una hora y se mostraran los datos de esa hora en adelante, los check de

Modo Normal y Modo Bajo consumo los cuales nos determinan estos modos de funcionamiento del sistema y por último se observa el listado de datos, el cual están organizados en primera columna posición de memoria, segunda columna hora del RTC y tercera columna valor del sensor.

Para este sensor los valores de la columna 3 están dados en grados de inclinación

Posición de memoria	hora del RTC	valor del sensor
0X0	2022-06-03T03:45:7.918Z	0.34
0X1	2022-06-03T03:45:7.918Z	0.37
0X2	2022-06-03T03:45:7.918Z	0.36
0X3	2022-06-03T03:45:7.918Z	0.35
0X4	2022-06-03T03:45:7.918Z	0.43
0X5	2022-06-03T03:45:7.918Z	0.42
0X6	2022-06-03T03:45:7.919Z	0.43
0X7	2022-06-03T03:45:7.919Z	0.33
0X8	2022-06-03T03:45:7.919Z	0.19
0X9	2022-06-03T03:45:7.919Z	0.23
0XA	2022-06-03T03:45:7.919Z	0.31

Selección Vibración, para este observamos que consta de 3 secciones las cuales son la casilla de hora en donde se indica una hora y se mostraran los datos de esa hora en adelante, los check de Modo Normal y Modo Bajo consumo los cuales nos determinan estos modos de funcionamiento del sistema y por último se observa el listado de datos, el cual están organizados en primera columna posición de memoria, segunda columna hora del RTC y tercera columna valor del sensor.

Para este sensor los valores de la columna 3 están dados en voltaje donde en este solo observamos las perturbaciones que ha tenido el sensor

Posición de memoria	hora del RTC	valor del sensor
0X0	2022-06-03T03:35:37.948Z	75
0X1	2022-06-03T03:35:37.948Z	75
0X2	2022-06-03T03:35:37.948Z	75
0X3	2022-06-03T03:35:37.948Z	75
0X4	2022-06-03T03:35:37.950Z	75
0X5	2022-06-03T03:35:37.950Z	75
0X6	2022-06-03T03:35:37.950Z	75
0X7	2022-06-03T03:35:37.950Z	75
0X8	2022-06-03T03:35:37.950Z	75
0X9	2022-06-03T03:35:37.950Z	75
0XA	2022-06-03T03:35:37.950Z	75

Selección Humedad, para este observamos que consta de 3 secciones las cuales son la casilla de hora en donde se indica una hora y se mostraran los datos de esa hora en adelante, los check de Modo Normal y Modo Bajo consumo los cuales nos determinan estos modos de funcionamiento del sistema y por último se observa el listado de datos, el cual están organizados en primera columna posición de memoria, segunda columna hora del RTC y tercera columna valor del sensor.

Para este sensor los valores de la columna 3 están dados en porcentaje de humedad

```
const mongoose = require("mongoose");
const { Schema, model } = mongoose;

const datoHSchema = new Schema({
  _id: {
    type: String,
    required: true
  },
  val: {
    type: String
  },
  date: {
    type: Date,
  }
},
{timestamps: true}
);

module.exports = model('datoH', datoHSchema);
```

En la figura anterior se observa el modelo de la base de datos, la cual recibe 3 datos los cuales son el _id que es la posición en memoria, val que es el valor que viene de los sensores y por último date que es los datos de RTC, para los 3 sensores cada uno cuenta con su propia base de datos con el mismo modelo, siendo una base de datos local por temas de practicidad y de tiempos para su manejo.

Anexos

Código fuente de la interfaz de usuario: <https://github.com/juan-gonzalezr/proyecto2pf>

Referencias

- Alldatasheet.com. (n.d.). *PIC18F46K40 PDF, pic18f46k40 description, Pic18f46k40 Datasheet, pic18f46k40 view*:: Alldatasheet :: ALLDATASHEET. Retrieved April 2022, from <https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/1132053/MICROCHIP/PIC18F46K40.html>
- Alldatasheet.com. (n.d.). *24LC256 pdf, 24lc256 description, 24lc256 datasheet, 24lc256 view*:: Alldatasheet :: ALLDATASHEET. Retrieved April 2022, from <https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/74858/MICROCHIP/24LC256.html>
- *Que es un depurador ?* (s. f.). <https://docs.microsoft.com>. Recuperado 10 de abril de 2022, de <https://docs.microsoft.com/es-es/visualstudio/debugger/what-is-debugging?view=vs-2022>
- *I2C*. (s. f.). <https://www.factor.mx>. Recuperado 10 de abril de 2022, de <https://www.factor.mx/portal/base-de-conocimiento/i2c/>
- *Maquinas de estados*. (s. f.). <https://www.ibm.com>. Recuperado 10 de abril de 2022, de <https://www.ibm.com/docs/es/bpm/8.5.7?topic=types-state-machines>