

**SISTEMA DE OBTENCIÓN DE ENERGÍA A PARTIR DE VIBRACIONES MECÁNICAS EN
ESTRUCTURAS**



Pontificia Universidad
JAVERIANA
Bogotá

JUAN DIEGO PINEDA RODRÍGUEZ
JUAN SEBASTIÁN RADA CONTRERAS

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA
BOGOTÁ DC
2018**

**SISTEMA DE OBTENCIÓN DE ENERGÍA A PARTIR DE VIBRACIONES MECÁNICAS EN
ESTRUCTURAS**

**JUAN DIEGO PINEDA RODRÍGUEZ
JUAN SEBASTIÁN RADA CONTRERAS**

**Trabajo de grado presentado para optar por el título de
Ingeniero Electrónico**

Director:
Ing. Camilo Otálora Sanchez M.Sc.

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA
BOGOTÁ DC
2018**

TABLA DE CONTENIDO

LISTA DE FIGURAS	2
LISTA DE TABLAS	3
1. INTRODUCCIÓN	4
2. MARCO CONCEPTUAL	6
2.1. <i>Harvesting</i> de energía vibratoria	6
2.2. Vibraciones estructurales	7
2.3. Fenómeno piezoeléctrico	7
2.4. Osciladores forzados con amortiguación	10
2.5. Modelo circuital del transductor	12
2.6. Protocolos de comunicación	14
2.6.1. Comunicación serial (UART)	14
2.6.2. ZigBee	15
2.7. Memoria EEPROM y Flash	16
3. DESARROLLO Y PROTOCOLOS DE PRUEBAS	17
3.1. Caracterización del entorno	17
3.1.1. Puente de ingeniería	18
3.2. Selección de componentes y diseño	19
3.2.1. Sintonización del transductor	19
3.2.2. LTC3331	20
3.2.3. Microcontrolador PIC18F25K40	21
3.2.4. XBee Serie 1	21
3.2.5. LTC3588	22
3.3. Diseño de circuitos impresos y soporte	23
3.4. Estimación de la potencia	24
3.5. Simulación	25
3.5.1. Modelo del transductor en Matlab	25
3.6. Medidas previas	26
3.6.1. Generador	26
3.6.2. Mesa vibratoria	26
3.6.3. Puente de Ingeniería	27
4. RESULTADOS	28
4.1. Generador de funciones con el sensor piezoeléctrico	28
4.2. Mesa vibratoria	30
4.3. Puente peatonal del Edificio de Ingeniería	31
4.3.1. Potencia obtenida	33
5. CONCLUSIONES Y TRABAJOS A FUTURO	35
6. ANEXOS	36
Referencias	37

LISTA DE FIGURAS

1.	Material piezoeléctrico configurado en modo d a) 33 b) 31	9
2.	Material piezoeléctrico configurado en modo cantilever	9
3.	Sistema masa-resorte simple	10
4.	Circuito RLC sin fuente	12
5.	Circuito equivalente del transductor. Tomada de [29]	12
6.	Acople electromecánico	13
7.	Circuito reducido equivalente del transductor	13
8.	Esquema de paquete en transmisión serial	14
9.	Modelo simplificado de la interfaz UART	15
10.	Diagrama general de bloques del sistema	17
11.	Configuración espacial de los sensores vista desde arriba.	18
12.	Configuración espacial de los sensores vista de lado.	18
13.	Sistema coordinado para el puente de ingeniería	18
14.	Espectro de la señal obtenida.	19
15.	gráfica y tabla para sintonización del transductor	20
16.	Esquema de conversión ADCC	21
17.	Esquemático del módulo LTC3588	22
18.	Módulo montado en proto - impreso.	22
19.	Módulos LTC3588.	22
20.	Esquemático del integrado LTC3331 implementado	23
21.	Esquemático del PIC	23
22.	Render de los soportes	24
23.	Soporte fijado	24
24.	Respuesta paso del sistema mecánico simulado	25
25.	Diagrama de BODE de magnitud del sistema mecánico simulado	25
26.	Respuesta paso del sistema eléctrico simulado	26
27.	Diagrama de BODE de magnitud del sistema eléctrico simulado	26
28.	Montaje piezoeléctrico, vista lateral	27
29.	Montaje piezoeléctrico, vista frontal	27
30.	Montaje piezoeléctrico en el puente, vista lateral	28
31.	Montaje piezoeléctrico puente, vista frontal	28
32.	Circuito impreso LTC3331	28
33.	Circuito impreso microcontrolador	28
34.	Prueba verificación con sensor	29
35.	PGOOD con generador en la entrada	29
36.	Vout	30
37.	(Arriba) Vout con supercapacitor. (Abajo) PGOOD.	30
38.	Prueba en puente de ingeniería con sensor LTC3588	31
39.	Prueba en puente de ingeniería con LTC3331	32
40.	PCB LTC3331	36
41.	PCB PIC y XBee	36

LISTA DE TABLAS

1.	Densidad de potencia de algunas fuentes	6
2.	Valores de vibración típicos	7
3.	Potencia Estimada.	25
4.	Frecuencias y amplitudes de medición.	27
5.	Tiempos aproximados de carga del condensador.	31
6.	Tiempo necesario para cargar el condensador.	33
7.	Potencia real obtenida en el puente de ingeniería.	33

1. INTRODUCCIÓN

Hoy en día existe la creciente necesidad de generación de energía limpia para el uso en toda clase de actividad humana, debido al deterioro del medio ambiente y sus consecuencias para el ser humano y todo ser vivo en el planeta. Recientemente se explora la obtención de electricidad a partir de fuentes renovables, convirtiendo la energía contenida en distintos fenómenos físicos en energía eléctrica. Dichos fenómenos pueden ser el sol, el viento o el agua, permitiendo tener las potencias necesarias para alimentar todo tipo de elementos y dispositivos electrónicos, tales como sensores de baja potencia o luces de emergencia. Uno de los fenómenos físicos mencionados, generado en parte por el ser humano, son las vibraciones presentes en el ambiente en el cual aquél está inmerso, ya sea en edificios, puentes o carreteras.

Para reducir la dependencia del uso de energías provenientes de combustibles fósiles y fuentes contaminantes, y optimizar el uso energético en toda actividad humana, es importante el desarrollo de fuentes de energía limpia, mediante la concepción e implementación de sistemas de conversión y almacenamiento de energía (eólica, hídrica, vibratoria). La investigación y el desarrollo de tecnología de cosecha de energía (Energy Harvesting) es relativamente reciente, con mayor crecimiento en los últimos años en el área de energía solar y eólica, llegando a tener grandes “granjas” de paneles solares y turbinas eólicas, debido a la potencia que es posible obtener a partir de estos métodos. Específicamente, la energía proveniente de vibraciones puede ser encontrada en diversas estructuras construidas por el ser humano, tales como los puentes, vías férreas, edificios y carreteras, por lo que su implementación puede realizarse en casi cualquier sitio donde haya presencia humana.

Ha tomado fuerza la investigación en obtención de energía a partir de vibraciones mecánicas, principalmente con el objetivo de alimentar sensores de baja potencia para el monitoreo de diversas estructuras, como se puede evidenciar en la fuente [2], en donde se utiliza un cosechador electromagnético para generar electricidad a partir de vibraciones en puentes, generadas por el paso de vehículos y por el viento, permitiendo la autonomía de sensores de monitoreo del estado del puente, logrando alimentar las baterías de los sensores con vientos de 9 m/s y una potencia pico de 354 mW. De manera similar, en las fuentes [3], [5] y [6] se logra alimentar sensores presentes en la estructura del puente, salvo que en las primeras dos fuentes ([3] y [5]), se utilizan cosechadores piezoeléctricos, que según la fuente [4], son más sensibles que los electromagnéticos a la hora de producir energía a partir de vibraciones de baja magnitud. Ahora bien, los sistemas de cosecha no se implementan únicamente en puentes, sino también en vías férreas, como es posible notar en las fuentes [7] y [8], donde los autores generan electricidad a partir de las vibraciones en las vías férreas con dos tipos de cosechadores; piezoeléctricos en la fuente [7], aprovechando el hecho que las vibraciones en vías férreas son de mayor frecuencia (del orden de los cientos de Hz), y un sistema de conversión de movimiento vibratorio a movimiento rotativo (flywheels) en la fuente [8], obteniendo una mayor potencia (del orden de los watts). Por otro lado, existen casos en los que se unen dos tipos de cosechadores para hacer más eficiente la conversión, como en la fuente [9], donde se detalla el novedoso diseño y fabricación de un cosechador energético de vibraciones híbrido, es decir, compuesto por material piezoeléctrico y por una configuración electrostática. De manera similar integrando dos sistemas, en este caso con objetivos diferentes, en el artículo [1] se utiliza la vibración generada en los sistemas de reducción de vibración en edificios altos (por lo general rascacielos) para cosechar energía, eso se hace con un sistema masa-resorte, logrando un generador electromagnético que genera 60 mW a 3.3 Hz. Este método de obtención de energía es común en edificios con tecnología de amortiguadores de masa (TMD por sus siglas en inglés), aprovechando la magnitud del movimiento generado en edificios por acción del viento. Finalmente, la fuente [10] describe el uso de cosechadores magneto-estáticos para la recolección de energía en estructuras y edificios, utilizando el fenómeno de levitación magnética. En continuación con las referencias mencionadas, este trabajo de grado busca explorar una de las diferentes alternativas de obtención de energía a partir de vibraciones mencionadas previamente.

El objetivo es entonces, en general, implementar un dispositivo capaz de almacenar energía proveniente de un sensor piezoeléctrico, que convertirá la energía cinética generada en estructuras a energía eléctrica utilizable para diferentes aplicaciones, siendo la más común, por ejemplo, el uso en redes de sensores inalámbricos (o *WSNs* por sus siglas en inglés) para cargar las pequeñas baterías de los mismos. Este objetivo se logra mediante la medición previa de las vibraciones en algunas estructuras de la universidad para conocer sus características, luego se realiza un modelo circuital que permita estimar la energía que se puede extraer del dispositivo de harvesting y por último, se diseña e implementa una forma de conversión y almacenamiento de la energía proveniente del cosechador, midiendo variables importantes como voltajes de salida y eficiencia y comparándolas con lo esperado. De igual manera, en este documento se exponen las teorías básicas que deben conocerse para implementar el sistema y las herramientas electrónicas utilizadas para diseñarlo.

2. MARCO CONCEPTUAL

Como se menciona anteriormente, a continuación se enuncian brevemente los conceptos que permitirán llevar a cabo los objetivos del presente trabajo de grado, al dar las herramientas necesarias para facilitar el diseño y el análisis tanto de los resultados como del comportamiento esperado del sistema.

2.1. *Harvesting* de energía vibratoria

El presente trabajo de grado gira en torno a la transformación de energía cinética en energía eléctrica y su posterior almacenamiento, proceso denominado en inglés como *energy harvesting*, energía que puede provenir de diferentes fuentes, tales como humanas, industriales, de transporte y estructurales:

- *Humana*, en la cual por medio de la locomoción habitual del ser humano es posible extraer en promedio 67 W de potencia a bajas frecuencias [27], siendo el tobillo el punto donde se obtienen mayores aceleraciones.
- *Industrial*, donde las vibraciones son obtenidas a partir de la maquinaria en las industrias de manufactura y procesos, cuya máxima aceleración se da normalmente a la frecuencia de la línea a la cual esté conectada dicha maquinaria (50 - 60 Hz). Sin embargo, los desplazamientos de la vibración son mucho más pequeños comparados con los de aplicación humana.
- *Transporte*, siendo, en el caso de los automóviles, las llantas y los elementos de suspensión en los que se pueden encontrar mayores vibraciones, pues en otras zonas, la amplitud de aquellas se reduce en gran medida gracias al sistema de amortiguación. La amplitud también se ve afectada en gran medida por las condiciones de la vía, la velocidad y el tipo de automóvil. En otras formas de transporte, las vibraciones dependen de los motores.
- *Estructural*, alrededor de la cual gira este trabajo, logrando obtener energía vibratoria desde puentes y edificios, en donde las amplitudes y las frecuencias son generadas por diferentes factores como viento, temperatura, maquinaria, cercanía a autopista o vías de tren para el caso de edificios y velocidad y cantidad de vehículos pasando para el caso de los puentes.

Para estas fuentes existen diversos métodos de transducción, como la *electromagnética*, *generación electrostática* y *piezoeléctrica*. Cabe destacar que es esta última la que será utilizada en el presente trabajo.

A continuación se encuentran las densidades de potencia comunes de diferentes fuentes (tomado de [16] y [17]):

Fuente de energía	Densidad de potencia
Ruido Acústico	0.003 $\mu\text{W}/\text{cm}^3$ @75 dB 0.96 $\mu\text{W}/\text{cm}^3$ @100 dB
Solar	10 - 100 mW/cm^2
Termoeléctrico	30 - 60 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$
Piezoeléctrico	100 - 330 $\mu\text{W}/\text{cm}^3$
Vibración (microgenerador) (Maquinaria)	200 - 800 $\mu\text{W}/\text{cm}^3$
Vibración (Humana)	4 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$

Cuadro 1: Densidad de potencia de algunas fuentes

En este trabajo se utilizará, en particular, la conversión de energía mecánica a eléctrica por medio de piezoeléctricos, en donde la densidad de potencia (dada en W/m^3) se da en $\mu W/cm^3$ puesto que varios parámetros del transductor (como la capacitancia C_p , la rigidez) dependen de las dimensiones de la lámina (largo, ancho, alto).

2.2. Vibraciones estructurales

Para el presente trabajo es necesario conocer las características generales que rigen las vibraciones en estructuras, esta palabra entendida como construcciones, pues la palabra en sí tiene un espectro muy amplio: “una estructura es una combinación de partes unidas entre ellas para crear un marco de soporte, que pueden ser parte de un edificio, barco, máquina, vehículo espacial, motor o cualquier otro sistema” (traducido de [11]). Se definen 4 tipos de fuentes de vibración:

- **Vibración libre**, que se da debido a las características mecánicas propias de la estructura en respuesta a algún impacto o desplazamiento, la frecuencia de vibración será entonces la natural del sistema
- **Vibración forzada**, que es la respuesta de la estructura a una excitación repetitiva, y la frecuencia de la vibración estará dada por la frecuencia de la excitación,
- **Vibración aleatoria**, que es la combinación de excitaciones externas, como lo es el paso de automóviles, de personas, movimientos en la base etc. Este tipo de vibración se analiza mediante métodos estadísticos y análisis en frecuencia por transformada de Fourier para determinar las principales componentes de frecuencia.
- **Desbalance rotativo**, para casos en los que, como su nombre lo dice, la rotación de una parte del sistema está desbalanceada, generando vibración de la estructura completa.

La siguiente tabla muestra vibraciones típicas en algunas estructuras (tomada de [12]):

	Frecuencia [Hz]	Amplitud [mm]
Umbral de percepción humana	1 - 8	0.1
Vibración de edificios y maquinaria	10 - 100	0.1 - 1
Oscilación de edificios altos	1 - 5	10 - 1000

Cuadro 2: Valores de vibración típicos

El presente trabajo de grado gira en torno a las vibraciones **aleatorias** edificios, particularmente los puentes. Otros tipos de vibración no son considerados.

2.3. Fenómeno piezoeléctrico

En la naturaleza se pueden encontrar diferentes materiales cuyas moléculas se encuentran organizadas en patrones simétricos formando redes elementales. Estas se repiten indefinidamente formando una estructura cristalina, las cuales, al ser sometidas a tensiones mecánicas sobre su superficie, generan una polarización eléctrica capaz de inducir cargas en su superficie creando una diferencia de potencial a lo largo de su área exterior. este comportamiento también se genera de manera inversa, es decir, al aplicarle al cristal una tensión eléctrica, este tiende a vibrar a una frecuencia específica y bastante estable, dada por las dimensiones y características del material y se conoce como la frecuencia natural del material.

El efecto piezoeléctrico fue inicialmente descubierto por los hermanos Pierre Curie y Jacques Curie en el año 1880. Un año después Gabriel Lippmann encontró que los materiales piezoeléctricos se deformaban al estar sometidos bajo un campo eléctrico.

Como se explicó anteriormente, los materiales piezoeléctricos pueden convertir la tensión mecánica en electricidad, y la electricidad en vibraciones mecánicas. El mejor ejemplo de éste comportamiento en la naturaleza se encuentra en el cuarzo. El cuarzo básicamente es dióxido de silicio (SiO_2) aunque en el ambiente generalmente se encuentra con impurezas de litio, sodio, potasio, titanio o hierro, sus átomos forman una estructura hexagonal repetitiva cristalina. Este material se puede considerar como un compuesto iónico, es decir, está formado por enlaces iónicos entre dos átomos (Si y O) que separados entre sí no son eléctricamente neutros. El átomo de silicio aislado posee carga positiva mientras que el de oxígeno cuenta con carga negativa, es decir que cada ion de (Si^{4+}) está rodeado por un tetraedro de iones (O^{2-}), como se puede evidenciar en la figura 2, esto es consistente debido a que por su carga eléctrica el oxígeno sólo puede neutralizar la mitad de la carga de un silicio. Haciendo un análisis electrostático detallado podemos ver que en cada tetraedro (SiO_4) se encuentra, además del ion de Silicio (Si^{4+}), con cuatro mitades de los iones de oxígeno (O^{2-}) adyacentes, y de ésta manera se logra obtener cuatro cargas positivas con cuatro negativas, haciendo que la estructura termine globalmente neutra. El momento de dipolo del tetraedro es la suma vectorial de los cuatro dipolos correspondientes al (Si^{4+}) y a las cuatro mitades del (O^{2-}). Al apretar un cristal de cuarzo, los tetraedros deformados hacen que el momento de dipolo resultante no sea nulo, creando una polarización eléctrica debido al trabajo sobre la red molecular, obteniendo una diferencia de potencial sobre la superficie del cristal.

Titanato Zirconato de Plomo (PZT) es el material piezoeléctrico más utilizado en el momento. Para temperaturas por debajo del nivel de Curie (T_C), los elementos del PZT que se cristalizan como cristales de perovskita se alejan de su centro de masa formando dipolos eléctricos con la estructura tetragonal/romboïdal característica de otros cristales como el cuarzo. Cuando la temperatura se eleva sobre el nivel de Curie ($T > T_C$) los cristales se despolarizan perdiendo sus características piezoeléctricas.

Cabe destacar que las redes cristalinas formadas por otros materiales tales como la cerámica PZT, se comporta físicamente de manera similar al cuarzo, sin embargo, este tipo de material no se encuentra libremente en la naturaleza sino es producido por procesos de sintetización de bajo costo en laboratorios especializados. Al ser fabricados sintéticamente, su durabilidad no es comparable con materiales de cristal menos sensibles (fosfato de galio, cuarzo, entre otros) que cuentan con mayor estabilidad a largo plazo.

Debido al uso del material piezoeléctrico como sensor y no como actuador, existen tres modos principales de configuración para un funcionamiento óptimo del mismo, descritos con el tensor piezoeléctrico de acople d. Un tensor es un objeto geométrico que describe relaciones lineales entre vectores, escalares y otros tensores. En este caso el tensor de acople muestra la respuesta del material piezoeléctrico ante determinadas perturbaciones en distintas direcciones, magnitudes y ángulos.

En la Figura (1) se puede observar los distintos modos en que el sensor piezoeléctrico es usado en aplicaciones de Harvesting:

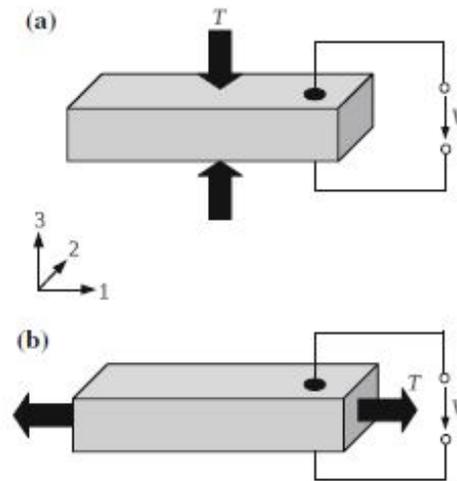


Figura 1: Material piezoeléctrico configurado en modo d a) 33 b) 31

En la figura, el primer subíndice del tensor d (3) implica que el voltaje es generado a lo largo del eje z y el segundo subíndice (3 o 1) muestra la dirección del estrés aplicado sobre el material. En ambos casos el voltaje es medido sobre la dirección perpendicular al eje z .

El modo d_{31} es el más usado en aplicaciones de harvesting cuando dos o más capas de material piezoeléctrico son apiladas entre sí. Cuando el piezoeléctrico se dobla hacia abajo, las capas superiores del material comprimen las capas adyacentes, creando una diferencia de potencial sobre los terminales del sensor. El mismo fenómeno ocurre cuando el material se dobla hacia arriba. De igual forma, las capas del material pueden estar conectadas entre sí en serie o en paralelo. Si están conectadas en serie, con respecto a una sola capa, el voltaje se dobla, la capacitancia se divide a la mitad y la corriente permanece igual. Sin embargo la conexión en paralelo entre capas es preferible y la más usada porque la corriente y la capacitancia son dobladas mientras que el voltaje se mantiene constante. Cabe destacar que los cambios de configuración sólo modifican la relación entre voltaje y corriente mientras que la potencia de salida permanece constante.

En la Figura 2 se puede observar la configuración del sensor usada para maximizar su eficiencia. En ella el movimiento en z se convierte en una elongación en la dirección de 1 denotada con la letra ϵ :

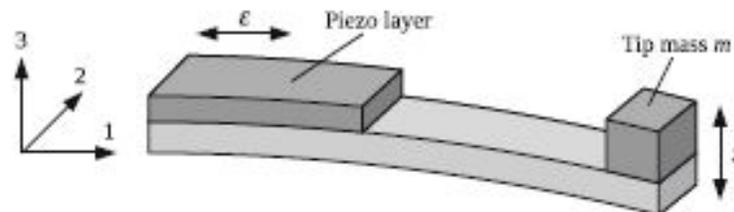


Figura 2: Material piezoeléctrico configurado en modo cantilever

Entender estas características de s materiales piezoeléctricos es importante para determinar qué configuración geométrica resulta más eficiente la obtención de energía. En el caso de este trabajo de grado, se usa la configuración en voladizo (cantilever).

2.4. Osciladores forzados con amortiguación

Debido a la naturaleza de la aplicación, en la cual el transductor piezoeléctrico producirá la mayor cantidad de potencia en el momento en el que su frecuencia de resonancia sea la natural de oscilación de la estructura en la cual se encuentre ubicado, es necesario entender los conceptos de osciladores y resonancia, para poder estimar la potencia que podrá ser extraída y cómo deberá configurarse el transductor para lograr la máxima potencia de entrada. Se toma inicialmente un oscilador simple sin amortiguamiento:



Figura 3: Sistema masa-resorte simple

En donde se cumplen dos propiedades básicas: existe una componente inercial (la masa) y una de almacenamiento de energía potencial (el resorte). Con esto, se plantea la siguiente ecuación:

$$-ky = ma \quad (1)$$

Siendo a la segunda derivada de la posición y de la masa con respecto al tiempo, teniendo como resultado:

$$-ky = m \frac{d^2y}{dt^2}$$

Sin embargo, debido a que la presente aplicación se trata de un sistema real, existe una componente de amortiguamiento en la ecuación anterior, quedando de la forma

$$-ky - b \frac{dy}{dt} = m \frac{d^2y}{dt^2}$$

Donde b es la constante de amortiguación. Ahora, dividiendo entre la masa queda:

$$-\omega_0^2 y - \gamma \frac{dy}{dt} = \frac{d^2y}{dt^2}$$

Donde $\omega_0^2 = \frac{k}{m}$ y $\gamma = \frac{b}{m}$.

Ahora, se tiene una fuerza impulsora que hace que el sistema se mantenga oscilando a pesar del amortiguamiento, de forma sinusoidal, con lo que la expresión queda de la siguiente manera:

$$\frac{F_o}{m} \cos(\omega t) = \frac{d^2y}{dt^2} + \gamma \frac{dy}{dt} + \omega_0^2 y \quad (2)$$

ó

$$F_0 \cos(\omega t) = m \frac{d^2y}{dt^2} + b \frac{dy}{dt} + ky \quad (3)$$

Siendo una ecuación diferencial no homogénea de segundo orden.

Según lo anterior es posible modelar el actuador/sensor piezoeléctrico como un oscilador forzado amortiguado donde las vibraciones actúan como las fuerzas externas que mantienen el oscilador en movimiento. La fuerza aplicada modifica la frecuencia de vibración del circuito forzándolo a tomar su frecuencia determinada. Este tipo de osciladores se modelan como sistemas de segundo orden de la forma:

$$\ddot{x} + 2\xi\omega_0\dot{x} + \omega_0^2x = \frac{F}{m} \quad (4)$$

donde (4) corresponde a la ecuación completa del sistema con el término fuente o ecuación no homogénea mientras que (5):

$$\ddot{x} + 2\xi\omega_0\dot{x} + \omega_0^2x = 0 \quad (5)$$

se define como la ecuación homogénea debido a que si $x(t)$ es solución de (5) entonces $cx(t)$ donde c es un valor constante será también solución de (5).

Debido a la linealidad del sistema, cualquier excitación periódica o vibración mecánica a la que se someta el oscilador puede descomponerse en una superposición de excitaciones armónicas, de tal forma que la respuesta total del sistema se puede obtener sumando la contribución de cada una de las respuestas por separado. Ahora bien, para encontrar la solución a la ecuación diferencial (4) con condiciones iniciales $x(0) = a$ y $\dot{x}(0) = b$ se requiere la suma entre la solución de la ecuación homogénea asociada $\ddot{x} + 2\xi\omega_0\dot{x} + \omega_0^2x = 0$ y una solución particular de la ecuación completa. Las dos constantes indeterminadas que aparecen se hallan con las condiciones iniciales $x(0) = a$ y $\dot{x}(0) = b$.

El teorema de Fourier establece que cualquier excitación periódica puede descomponerse en una superposición de excitaciones armónicas de tal forma que para encontrar la respuesta de la excitación periódica original basta con encontrar la respuesta de cada una de las armónicas que la conforman y superponerlas al final. Por esta razón es importante encontrar la respuesta particular ante una entrada sinusoidal. Por lo tanto se obtiene:

$$\ddot{x} + 2\xi\omega_0\dot{x} + \omega_0^2x = \frac{f(t)}{m} \quad (6)$$

si $f(t) = f_0 \cos(\Omega t)$ y $A_0(t) = \frac{f_0}{m}$ (6) queda de la forma:

$$\ddot{x} + 2\xi\omega_0\dot{x} + \omega_0^2x = A_0 \cos(\Omega t) \quad (7)$$

Despejando la ecuación y resolviendo la ecuación diferencial de segundo orden (7) se obtiene que la respuesta forzada para la excitación $f(t) = A_0 \cos(\Omega t)$ es:

$$X(t) = \frac{\frac{f_0}{m}}{\sqrt{(\omega_0^2 - \Omega^2)^2 + (2\xi\omega_0\Omega)^2}} \cos(\Omega t + \delta(\Omega)) \quad (8)$$

Adicionalmente, teniendo en cuenta que que la potencia del sistema de segundo orden se puede obtener mediante el producto de la fuerza por la derivada de la posición enunciada en (8), es posible obtener la potencia promedio en (9):

$$-\frac{1}{2}\Omega F_0 A(\Omega) \sin\delta(\Omega) T \quad (9)$$

Y la potencia máxima se obtiene haciendo $\Omega = W_0$ como se puede evidenciar en (10) :

$$\frac{\frac{T}{2} \frac{f_0^2}{mW_0Q}}{\left(\frac{W_0}{\Omega} - \frac{\Omega}{W_0}\right) + \frac{1}{Q^2}} \quad (10)$$

2.5. Modelo circuital del transductor

En la sección 2.4 se llegó a una ecuación diferencial que caracteriza un oscilador mecánico forzado con amortiguamiento. Con base en esto, es posible llegar al modelo de un oscilador eléctrico, utilizando las leyes de Kirchhoff, dando como resultado una ecuación equivalente, y por ende facilitando el análisis y la simulación de la presente aplicación.

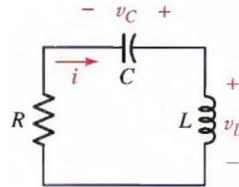


Figura 4: Circuito RLC sin fuente

Teniendo el circuito de la figura 4, por medio de las leyes de voltaje de Kirchhoff se obtiene la ecuación:

$$iR + \frac{q}{C} + L \frac{di}{dt} = 0$$

Y sabiendo que $i = \frac{dq}{dt}$ la ecuación queda:

$$0 = L \frac{d^2q}{dt^2} + R \frac{dq}{dt} + \frac{q}{C}$$

Ahora, añadiendo el forzamiento, la ecuación queda:

$$V_0 \cos(\omega t) = L \frac{d^2q}{dt^2} + R \frac{dq}{dt} + \frac{q}{C} \quad (11)$$

Donde $\omega_0^2 = \frac{1}{LC}$ y $\gamma = \frac{R}{L}$.

Que es equivalente a la ecuación 3, por lo que se simplifica el modelo del transductor en el siguiente circuito:

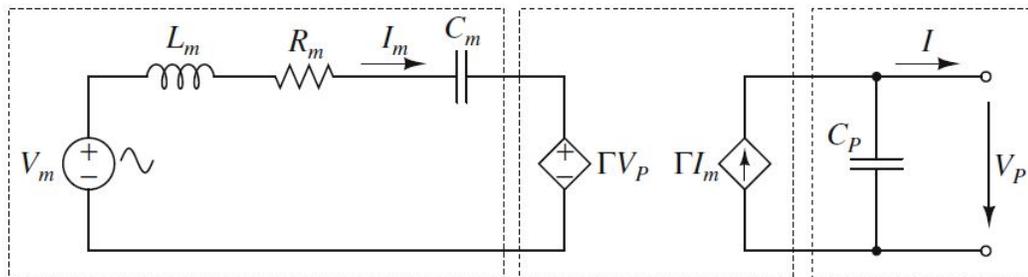


Figura 5: Circuito equivalente del transductor. Tomada de [29]

En el circuito de la figura 5, se pueden identificar 3 bloques principales, encerrados en una línea punteada:

- El equivalente circuital del resonador, correspondiente a la parte mecánica del piezoeléctrico, al lado izquierdo, donde $L_m = m$ (masa del transductor), $V_m = ma$, $R_m = d$ (constante de amortiguación mecánica) y $C_m = \frac{1}{k}$ (inverso de la constante de rigidez del resorte).

- El acople electromecánico en el medio donde Γ es el factor de acople electromecánico generalizado (GEMC por sus siglas en inglés) y equivale a $\frac{d_{31}b}{S_{11}^E}$, siendo d_{31} el coeficiente del efecto piezoeléctrico para el modo 31, b el ancho del transductor y S_{11}^E el primer coeficiente de rigidez del material piezoeléctrico. Es importante tener en cuenta este factor pues permite conocer qué tanta energía mecánica está siendo convertida en energía eléctrica. Este bloque puede reducirse a un transformador con relación $1 : \Gamma$, de acuerdo con la figura 6:

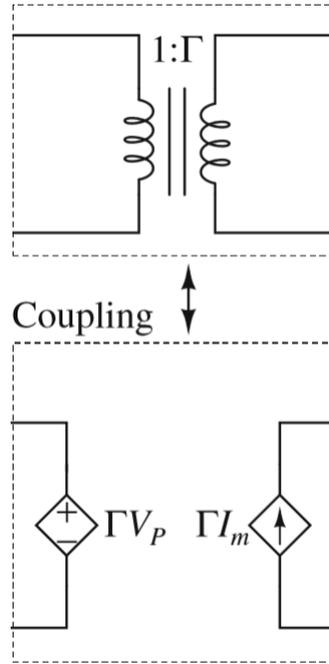


Figura 6: Acople electromecánico

- La parte eléctrica del transductor en el extremo derecho, donde C_p es la capacitancia de los terminales eléctricos.

Teniendo en cuenta lo anterior, el circuito se puede reducir a:

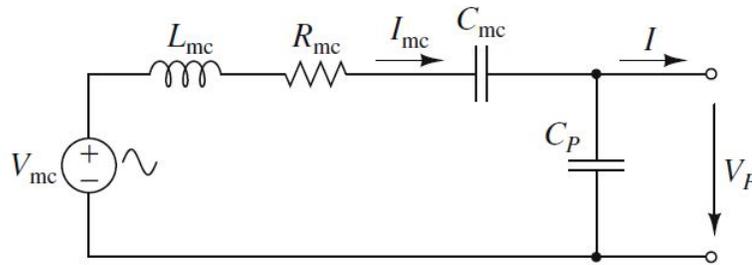


Figura 7: Circuito reducido equivalente del transductor

En donde $L_{mc} = \frac{L}{\Gamma^2}$, $R_{mc} = \frac{d}{\Gamma^2}$, $V_{mc} = \frac{ma}{\Gamma}$, $C_{mc} = \frac{\Gamma^2}{k}$ y $\Gamma = K_{31} \sqrt{K_p C_p}$.

K_{31} , K_p y C_p son constantes que dependen de las características del material y se pueden obtener del *datasheet* del transductor.

Ahora bien, para hallar la constante de amortiguación d , se utiliza la siguiente expresión:

$$P_{lim} = \frac{(ma)^2}{8d}$$

Donde P_{lim} es la potencia máxima obtenida del transductor, cuyo valor teórico se puede encontrar de igual manera en el *datasheet*.

2.6. Protocolos de comunicación

2.6.1. Comunicación serial (UART)

En el desarrollo de sistemas electrónicos se vuelve necesaria la comunicación entre las partes de los sistemas, así como la comunicación hacia afuera, ya sea hacia otro dispositivo (*Machine-to-Machine*) o hacia un usuario que desee acceder a los datos del dispositivo. Para ello existen diversos protocolos de comunicación, tanto seriales como paralelos. El primero transmite todos los datos (bits y paquetes de bits) a través de un sólo cable, un bit por vez. La comunicación serial asíncrona no requiere de un reloj para sincronizar los bits recibidos y transmitidos, por lo cual es posible reducir la cantidad de cables necesarios para la comunicación, sin embargo se requiere un sistema complejo para transmitir y recibir los datos sin errores. Para esto, los sistemas seriales definen las siguientes características:

- *Bits de sincronización*: Son los bits que marcan el inicio y el fin de la transmisión, donde el bit de *inicio* pasa de 1 a 0 para indicar el inicio y el bit de *fin* (o los bits de fin, pueden ser 2), pasa al valor alto 1 que marca el fin de la comunicación.
- *Bits de paridad*: Son bits opcionales que se utilizan para la detección de errores en la transmisión; tienen valor 1 o 0 dependiendo si los datos transmitidos son pares o impares, y le permiten al receptor detectar un error si la paridad de los datos cambió en la recepción. Si existe bit de paridad, el tamaño de los datos es de 8 bits.
- *Bits de datos*: Normalmente la longitud de los datos es entre 5 y 9 bits, y son estos los que llevan el mensaje deseado. Se envía el bit menos significativo primero en la mayoría de los casos.
- *Baudios*: Se refiere a la velocidad de transmisión de bits, dado en bits por segundo *bps*. los valores más comunes para la tasa de baudios son 1200, 2400, 4800, 9600, 19200, 38400, 57600 y 115200, siendo 9600 baud la más utilizada.

Con base en lo anterior, se puede organizar el paquete de datos de la siguiente manera:

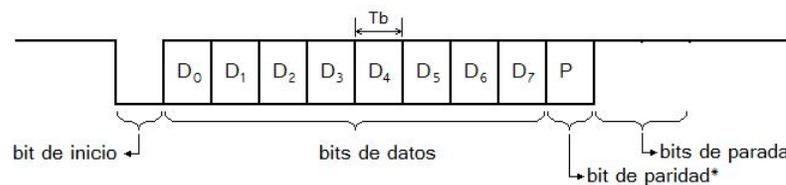


Figura 8: Esquema de paquete en transmisión serial

Los microcontroladores y circuitos integrados usualmente comunican a nivel TTL (*Transistor - Transistor Logic*) para niveles bajos de 0 V y altos de 3.3 o 5 V.

Ahora bien, existen periféricos para realizar la conversión de datos paralelos a una interfaz de comunicación serial, y son los periféricos UART: *Universal Asynchronous Receiver / Transmitter*, que reciben líneas de

datos seriales y a la salida tienen dos cables: R_x y T_x correspondientes a las líneas de transmisión y recepción. UART como tal no es un protocolo de comunicación, sino un periférico que se encarga de transmitir y recibir datos seriales de forma *Full - Duplex*, es decir, puede recibir y transmitir simultáneamente.

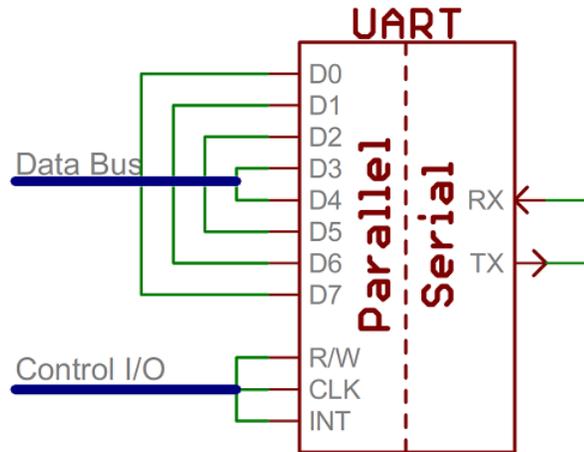


Figura 9: Modelo simplificado de la interfaz UART

Este tipo de comunicación es el que será utilizado en este trabajo de grado, pues es la forma de comunicación de los protocolos ZigBee, explicados en la siguiente sección.

2.6.2. ZigBee

Zigbee es un conjunto de protocolos para comunicación inalámbrica de bajo consumo y bajo costo, con el fin de maximizar la vida de las baterías mediante bajas tasas de transmisión (entre 20 kB/s y 250 kB/s) y la implementación de funciones *sleep* de los dispositivos, que les permite activarse para transmitir datos y volver a desactivarse por largos periodos de tiempo (horas e incluso días). Se basa en el estándar IEEE 802.15.4 (Redes inalámbricas de área personal WPAN, diseñado para redes en el hogar). Los dispositivos bajo el conjunto de protocolos ZigBee operan en la banda ISM (2.4 GHz) y suelen ser menos costosos que otras tecnologías como Bluetooth o WiFi. Su alcance es entre 10 y 75 m y las redes ZigBee pueden soportar hasta 65 000 nodos, dependiendo de la banda de frecuencia seleccionada y cuanto pérdida de datos es tolerada para la aplicación.

Los tipos de dispositivo en una red ZigBee asumen diferentes roles, como lo son:

- **Coordinador:** Tiene capacidad de memoria y de cómputo, se encarga de iniciar y controlar la red. No puede entrar en *sleep* y sólo puede haber uno por red.
- **Enrutador (Router):** Puede servir como puente de datos hacia los nodos de la red, y también puede realizar cálculos y almacenar datos.
- **Dispositivo final (End Device):** Transmite o recibe información de *routers* o coordinadores. Puede entrar en *sleep* para ahorrar energía.

El grupo de protocolos ZigBee y los dispositivos XBee en este trabajo fueron seleccionados debido a la necesidad de reducir al máximo la potencia necesaria para poder recopilar información sobre el sistema de *harvesting* y optimizar el objetivo principal del trabajo: obtener y almacenar energía.

2.7. Memoria EEPROM y Flash

La necesidad de hablar de las memorias EEPROM radica en que el micro-controlador utilizado en este trabajo de grado es el PIC18F25K40, que tiene una memoria EEPROM que se caracterizan por permitir el almacenamiento y la sobre-escritura de datos por medio de los voltajes de operación, además de mantener la información por largos periodos de tiempo sin necesidad de estar alimentado a una fuente de poder. Otra característica relevante es que poseen una interfaz serial, la cual, a través de unos cuantos pines que son utilizados para entrada o salida de datos en forma serial, habilitación, reloj de sincronismo el cual es programable, direccionamiento de dispositivos y por último los pines de alimentación del circuito. Los datos y la dirección de las posiciones de memoria utilizarán únicamente uno o dos pines, dependiendo del tipo de comunicación utilizada. La velocidad de transferencia de datos puede variar desde lo $100KH_z$ hasta los $600MH_z$, dependiendo del tipo de memoria y del sistema de comunicación utilizados, que como se menciona anteriormente depende de la programación del PIC.

Las características principales de este tipo de memorias son:

- Se pueden conectar fácilmente con microprocesadores o microcontroladores, algunas de estas memorias tienen pines para realizar esta labor.
- Transferencia de datos de manera serial, lo que permite el ahorro del micro para dedicarlo a otras funciones.
- El bajo consumo de corriente es ideal en aplicaciones en las cuales se posean restricciones de diseño y/o se desee implementar en circuitos con fuentes no constantes de energía.

3. DESARROLLO Y PROTOCOLOS DE PRUEBAS

El sistema implementado es el mostrado en la siguiente figura:

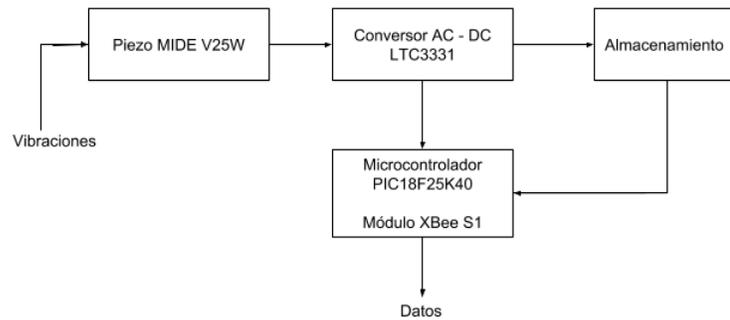


Figura 10: Diagrama general de bloques del sistema

Donde:

- El bloque del convertor AC - DC se encarga de convertir la señal AC del piezoeléctrico en un voltaje DC para cargar un condensador de entrada C_{Vin} , que activará un convertor Buck interno para cargar un condensador de salida C_{Vout} a un voltaje programado mediante bits de entrada en el convertor.
- El bloque de microcontrolador es un dispositivo que se encarga de recoger y almacenar los datos la señal de datos de salida, al igual que una señal que indica si el voltaje en C_{Vout} está al 92% del voltaje programado previamente (PGOOD), con el fin de monitorear estos valores. El módulo XBee conectado se encarga de transmitir los valores recogidos por el microcontrolador y enviarlos, a petición de un usuario, hacia un dispositivo final como lo es un computador. El microcontrolador sólo envía los datos en el momento en el que reciba un carácter de habilitación desde el usuario, caso contrario almacena los datos y hace que el XBee entre en modo *sleep*, luego de esto el microcontrolador entra en modo sleep hasta que la siguiente señal PGOOD llegue al dispositivo.
- El bloque de almacenamiento es un supercapacitor, con el fin de almacenar la energía por un largo período de tiempo y que pueda brindar la potencia suficiente para transmitir datos y activar el microcontrolador.

Los componentes de los bloques fueron seleccionados de acuerdo con los objetivos del trabajo así como valores de referencia tomados. El detalle de los bloques, sus componentes y parámetros del sistema se muestran a continuación.

3.1. Caracterización del entorno

Con el fin de poder estimar correctamente la potencia que sería obtenida con el sistema a implementar, y de igual manera para tener conocimiento sobre las frecuencias de oscilación de las estructuras para poder sintonizar correctamente el transductor, se hicieron medidas previas en las estructuras de interés, en los momentos de menor y de mayor tráfico.

Las medidas se realizaron con ayuda de tres acelerómetros sísmicos *Wilcoxon 731A* configurados espacialmente para medir las vibraciones en los ejes x , y y z , como se ve en las figuras 6 y 7.



Figura 11: Configuración espacial de los sensores vista desde arriba.



Figura 12: Configuración espacial de los sensores vista de lado.

3.1.1. Puente de ingeniería

Las medidas se realizaron en la sección media del puente así como en uno de sus extremos. Para documentarlas más ordenadamente, se estableció un sistema coordinado, dependiendo de la posición de los sensores, de la forma vista en la figura 13.

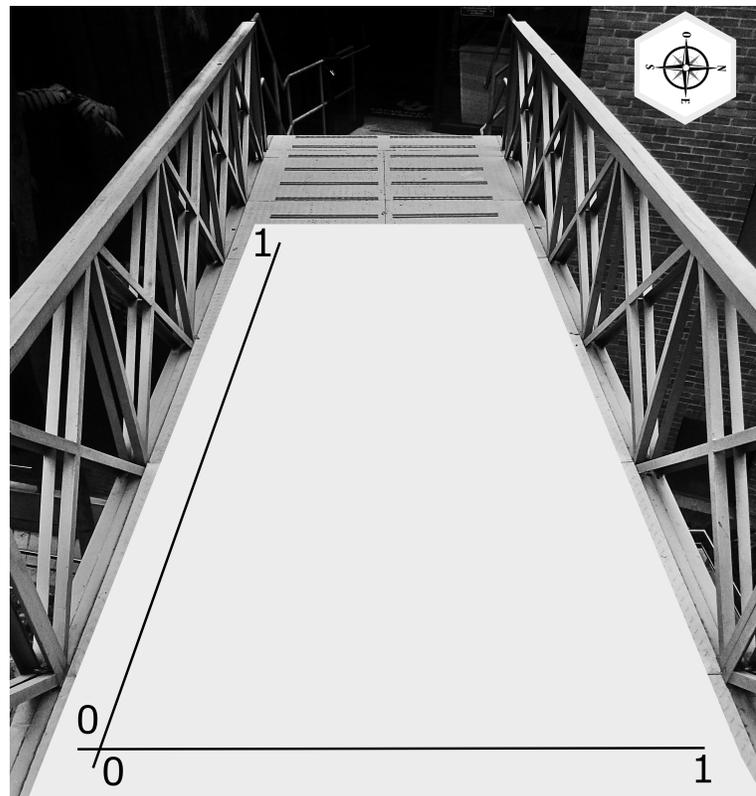


Figura 13: Sistema coordinado para el puente de ingeniería

En donde el 0 del eje x es la posición sur del puente y el 0 del eje y es la zona media del puente. De esta manera, el sensor ubicado en el medio del puente y en el lado norte sería la posición $\{0,1\}$, y así sucesivamente con las demás posiciones.

Bajo tráfico

Se tomaron 4 medidas en condiciones de bajo tráfico, en las posiciones $\{0,0\}$, $\{1,0\}$, $\{1,1\}$ y $\{0,1\}$, obteniendo las siguientes respuestas:

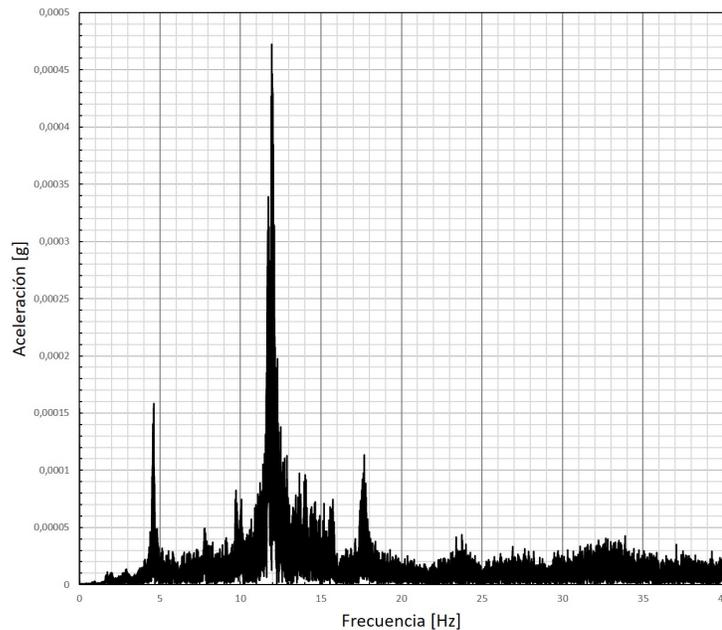


Figura 14: Espectro de la señal obtenida.

Las figuras anteriores corresponden a la medida $\{0,0\}$, todas las demás medidas tienen magnitudes similares con un pico de frecuencia alrededor de los 12 Hz, con lo que es posible concluir que, bajo estas condiciones, la frecuencia natural del puente es la mencionada.

3.2. Selección de componentes y diseño

3.2.1. Sintonización del transductor

Se utilizó un transductor piezoeléctrico V25W de Mide Technologies, cuya frecuencia natural es de 120Hz . Para que el transductor entregue la máxima potencia (entre en resonancia) es necesario sintonizarlo a la frecuencia natural de la estructura en la cual va a ser instalado mediante masas puestas en su extremo. El fabricante brinda una guía para su sintonización:

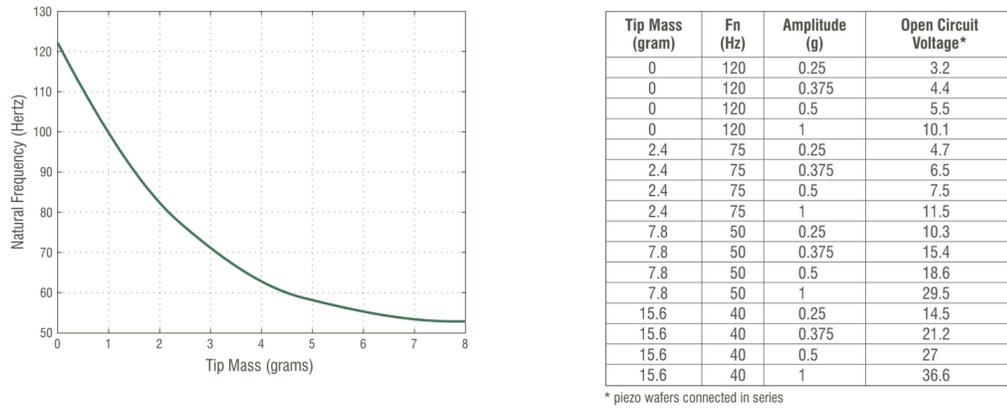


Figura 15: gráfica y tabla para sintonización del transductor

Para sintonizar en diferentes frecuencias a las encontradas en la tabla, se puede añadir una masa hasta alcanzar el máximo voltaje. Se puede encontrar con más detalle en la referencia [30].

3.2.2. LTC3331

Es necesario seleccionar componentes de muy bajo consumo para poder obtener la mayor cantidad de potencia posible al reducir las pérdidas en aquellos. Para ello, se escogió el integrado LTC3331 de Linear Technologies, que consiste en un rectificador y un convertidor buck de alta eficiencia, permitiendo obtener un voltaje DC regulado a partir de diferentes fuentes como paneles solares, *harvesting* de energía vibratoria por generadores electromagnéticos o piezoeléctricos. El integrado tiene las siguientes características:

- Puente rectificador de diodos *schottky*, lo que permite una mayor eficiencia en la conversión de fuentes alternas a una fuente DC constante.
- Salida DC dedicada especialmente para carga de baterías ajustable a diferentes valores desde 1.8 a 5 V.
- Salida de máximo 50 mA.
- Indicador lógico de salida PGOOD, que se pone en alto en el momento en el que el condensador de salida está a más del 92% del voltaje de salida programado.

En este caso, se utilizará únicamente la función Buck del integrado para *energy harvesting*, permitiendo la carga de la batería conectada en el pin BAT_OUT.

Se escogió este integrado sobre otros debido al conversor Buck - Boost integrado que permite cargar baterías (por ejemplo de litio) mediante otro pin sin necesidad de conectar otros integrados (como reguladores) para manejo de potencia. La hoja de especificaciones se encuentra en la referencia [18] para consulta a profundidad.

3.2.3. Microcontrolador PIC18F25K40

Se utilizó un microcontrolador PIC18F25K40 de 8 bits de Microchip para monitorear el voltaje de salida del LTC3331 y otras señales de interés en la presente aplicación, se escogió debido a que posee las siguientes características de interés principales:

- Alimentación de 2.3 a 5.5 V.
- Consumo Extra Bajo de potencia (*eXtreme Low - Power XLP*), con un consumo de 50 nA en modo *sleep* y 8 μA @ 32 kHz, lo cual lo hace el microcontrolador adecuado para la aplicación, pues es necesario reducir al mínimo el consumo de potencia a la hora del monitoreo para no descargar la batería que se carga.
- *ADCC, Conversor Análogo - Digital con Computación*, una variación de ADC propio de Microchip que toma un número fijo de muestras y las promedia para entregar un valor filtrado de la señal, para mejorar la visualización y facilitar la toma de datos, permitiéndole al usuario evitar rutinas de código para el tratamiento de los datos del ADC:



Figura 16: Esquema de conversión ADCC

- Memoria EEPROM de 256 Bytes.
- Periférico UART con velocidad de transmisión ajustable en el configurador.

El microcontrolador tiene más características que salen del alcance de la aplicación, las características completas pueden verse en la hoja de datos del fabricante en la referencia [19]. Existen otros microcontroladores de Microchip de la misma familia (K40), así como de otras con características de *eXtreme Low - Power*, sin embargo sus especificaciones son más avanzadas (procesador de más bits, más bytes de memoria, etc), lo que en esta aplicación sale de sus alcances.

3.2.4. XBee Serie 1

Se utiliza un módulo XBee con el fin de facilitar la transmisión de datos entre el microcontrolador y un dispositivo externo como un computador u otro microcontrolador. Se elige este dispositivo debido al bajo consumo de potencia propio del conjunto de protocolos ZigBee, el cual permite llevar el módulo XBee del lado del microcontrolador a modo *sleep* siempre que no sea necesaria la transmisión de datos, reduciendo el consumo de energía y por ende aumentando la duración de la batería o supercapacitor que se conecte a la salida del sistema de *harvesting* LTC3331. El módulo XBee del microcontrolador es entonces configurado como *End device* para poder ser llevado a modo *sleep* y el XBee del otro extremo se configura como Coordinador. La velocidad de transmisión se fija en 9600 Baudios sin bits de paridad.

3.2.5. LTC3588

Con el fin de poder comparar los resultados con el circuito implementado para el LTC3331 (formas de onda de las señales, valores de entrada y comportamiento general), se adquirió el módulo LTC3588 de SparkFun, que implementa un sistema de *Energy Harvesting* con el integrado LTC3588 de Linear Technologies. El módulo tiene la siguiente configuración (de la referencia 20):

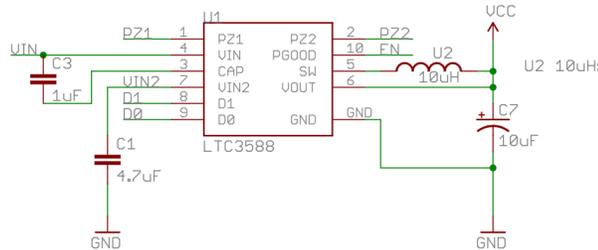


Figura 17: Esquemático del módulo LTC3588

El integrado tiene un comportamiento similar al LTC3331; tiene un voltaje de salida programable por medio de dos bits y una salida lógica PGOOD que se pone en alto cuando el voltaje en el condensador de salida es lo suficientemente alto. A continuación se muestra el módulo:

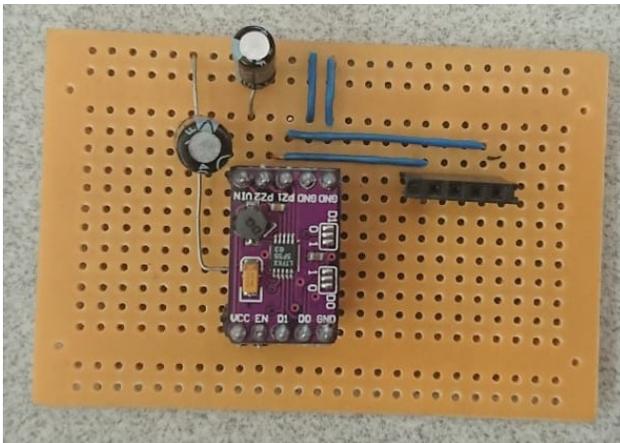


Figura 18: Módulo montado en proto - impreso.

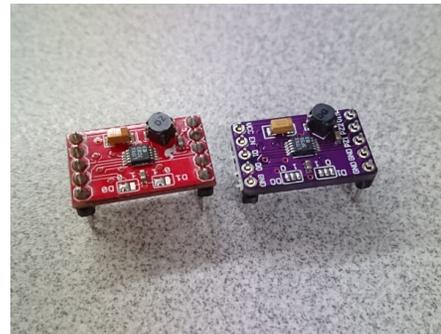


Figura 19: Módulos LTC3588.

Se escogió el LTC3331 en vez del LTC3588 puesto que el primero tiene un cargador de batería, lo que evita utilizar más integrados en la aplicación en los que se pueda perder potencia. El LTC3588 es sólo para tener una referencia con la cual comparar los voltajes de salida y PGOOD del LTC3331.

3.3. Diseño de circuitos impresos y soporte

Los esquemáticos de circuitos del sistema a implementar se muestran a continuación:

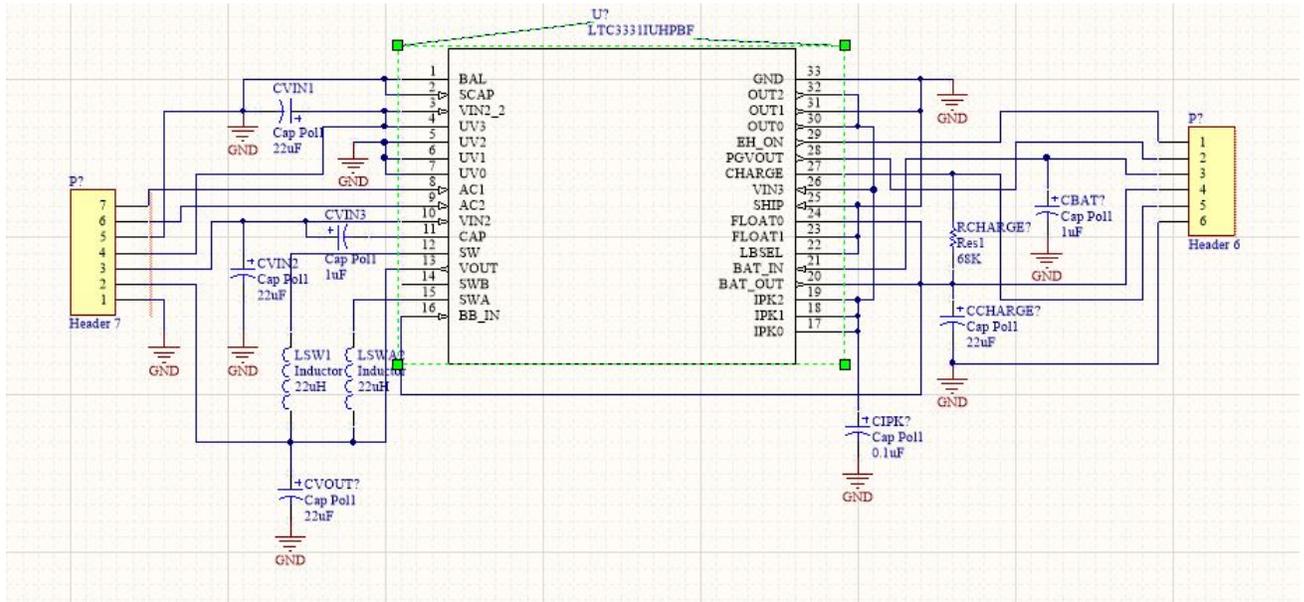


Figura 20: Esquemático del integrado LTC3331 implementado

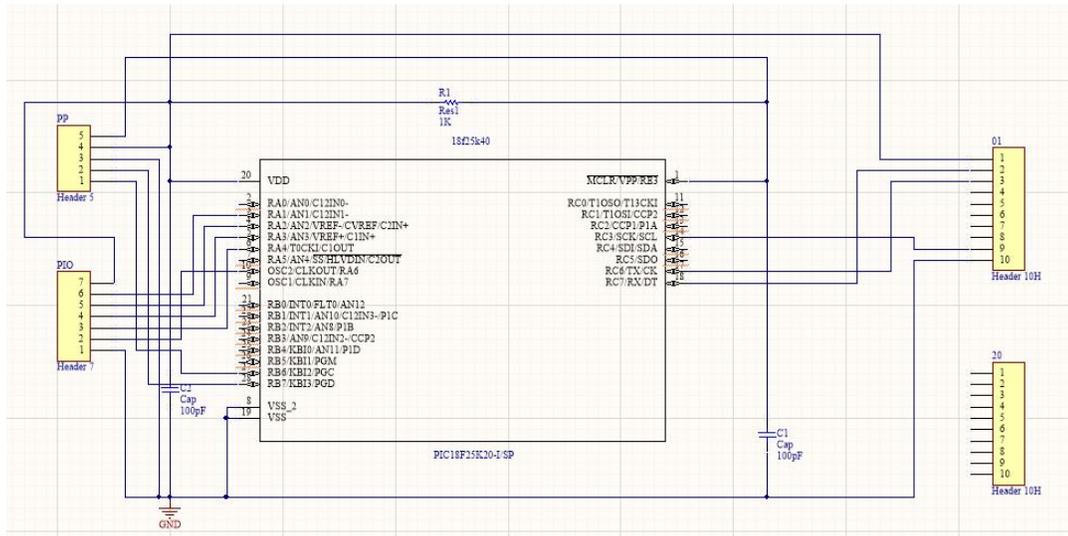


Figura 21: Esquemático del PIC

Ambos circuitos se conectan utilizando los headers evidentes en el esquemático. El circuito de la figura 41 tiene pines disponibles para conectar el XBee.

Como consecuencia del objetivo del presente trabajo, es necesario fijar fuertemente el transductor piezoeléctrico a la plataforma que vibra, por lo cual se diseñó un prototipo de soporte en madera que lo fije:



Figura 22: Render de los soportes

Y el soporte final del piezoeléctrico final es:

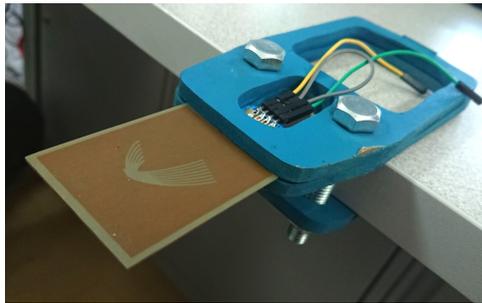


Figura 23: Soporte fijado

3.4. Estimación de la potencia

Mediante el uso de las ecuaciones de segundo orden desarrolladas en las secciones anteriores, y con el modelo circuital simplificado del transductor piezoeléctrico, se logró obtener un aproximación de la potencia promedio para las medidas tomadas en la sección 3.1.1, dando como resultado promedios de potencia de alrededor de $300 \mu W$, lo cual es acorde con la literatura consultada. El código está implementado en MatLab, Anexo 4.

Posición	Frecuencia [Hz]	Potencia Estimada [mW]
0,0	11.94	0.266
0,1	12.17	0.146
1,0	12.21	0.438
1,1	12.05	0.428
0,0	8.23	3.10
0,1	10.46	9.90
Promedio	11.17	
	Promedio Poca gente	0.3195
	Promedio mucha gente	6.5

Cuadro 3: Potencia Estimada.

3.5. Simulación

3.5.1. Modelo del transductor en Matlab

Se realizó, en primer lugar, una simulación de las funciones de transferencia del sistema, desde el modelo mecánico simplificado (masa-resorte forzado con amortiguación), hasta el modelo circuital reducido de la figura 7. Esto con el fin de poder verificar la frecuencia para la posterior sintonización del transductor y poder estimar la potencia entregada por el mismo. Es pertinente ver: la respuesta paso del sistema para poderla comparar con la respuesta real para verificar la proximidad del modelo con el sistema real y el diagrama de BODE para poder saber qué masa en la sintonización permite ajustar la frecuencia de resonancia.

Los resultados de la simulación para el sistema mecánico, a partir de la ecuación diferencial (ecuación 3) son los siguientes:

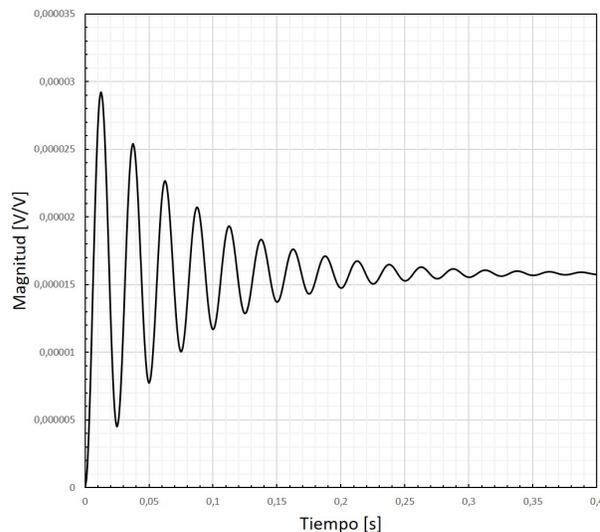


Figura 24: Respuesta paso del sistema mecánico simulado

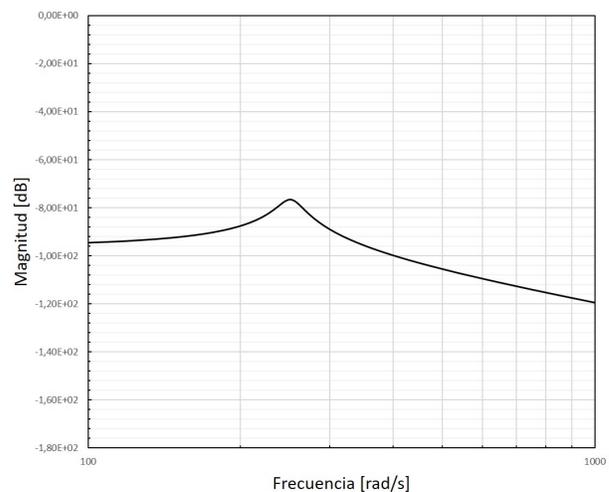


Figura 25: Diagrama de BODE de magnitud del sistema mecánico simulado

Con lo cual es posible evidenciar que efectivamente se tiene un sistema oscilante con frecuencia de resonancia en este caso en 40 Hz. El paso siguiente es comparar este resultado con el modelo circuital presentado en la sección 2.5, en el cual se obtiene la función de transferencia siguiente:

$$\frac{V_P}{V_{mc}} = \frac{C_{mc}}{L_{mc}C_{mc}C_Ps^2 + R_{cm}C_{cm}C_Ps + (C_{cm} + C_P)} \quad (12)$$

Con esto se obtienen entonces las siguientes respuestas:

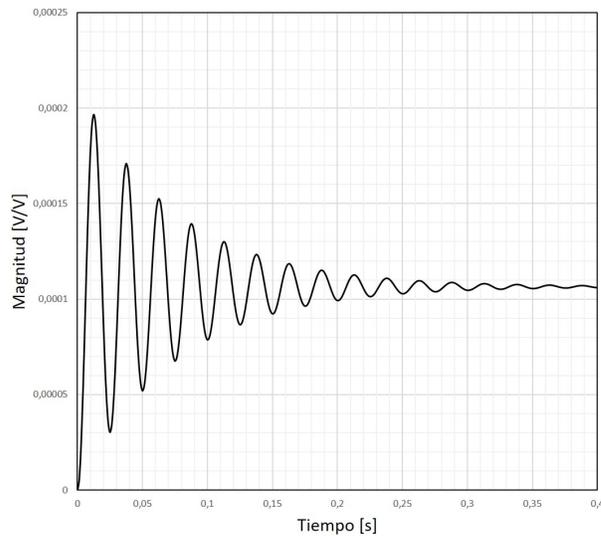


Figura 26: Respuesta paso del sistema eléctrico simulado

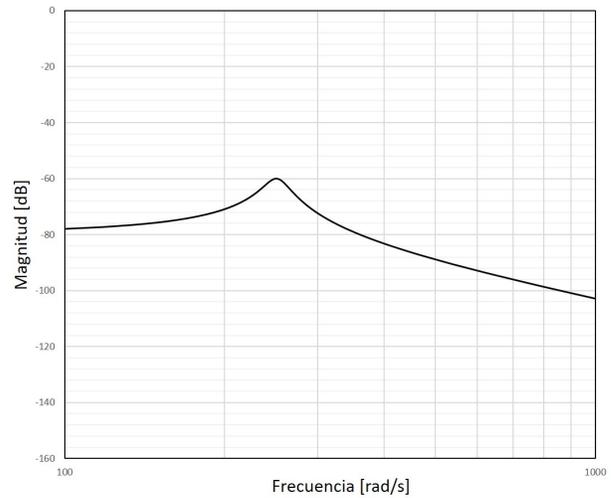


Figura 27: Diagrama de BODE de magnitud del sistema eléctrico simulado

A partir de las cuales es posible verificar el modelo circuital equivalente, con única diferencia en las magnitudes debido a efectos del GEMC.

3.6. Medidas previas

Para las medidas, el dispositivo LTC3588 se ajustó, con los bits de selección, para que entregara 1.8 V, y el LTC3331 se ajustó para entregar 3.6 V a la salida. Con base en esto, se procedió a realizar los montajes correspondientes para realizar las pruebas.

3.6.1. Generador

Primero se utilizó un generador de funciones para emular el comportamiento del piezoeléctrico, cuyo voltaje es una señal AC de amplitud variable, dependiendo de las vibraciones. En este caso se utilizaron tonos puros (frecuencias y amplitudes fijas) para entrar a los integrados y ver los voltajes de entrada de ambos (LTC3588 y LTC3331) así como las señales PGOOD.

3.6.2. Mesa vibratoria

Con el fin de tener un entorno controlado para obtener energía a partir del piezoeléctrico y del sistema, se realizaron medidas con la plataforma vibratoria del laboratorio de ingeniería civil, ajustando frecuencias y amplitudes de vibración típicas de puentes, de acuerdo con la siguiente tabla:

Frecuencia [Hz]	Amplitud pico [mm]	Aceleración [m/s^2]	Aceleración [g]
10	0.5	1.97	0.20
	1	3.94	0.40
	1.5	5.92	0.60
15	0.5	4.44	0.45
	1	8.88	0.91
	1.5	13.32	1.36
20	0.5	7.9	0.81
	1	15.79	1.61
30	0.5	17.77	1.91

Cuadro 4: Frecuencias y amplitudes de medición.

El montaje en la mesa vibratoria se muestra a continuación.



Figura 28: Montaje piezoeléctrico, vista lateral



Figura 29: Montaje piezoeléctrico, vista frontal

3.6.3. Puente de Ingeniería

Fue necesario fijar el piezoeléctrico a una tabla de madera pues el grosor del suelo del puente no permitía ajustar correctamente el sensor. Se hizo de la siguiente manera:

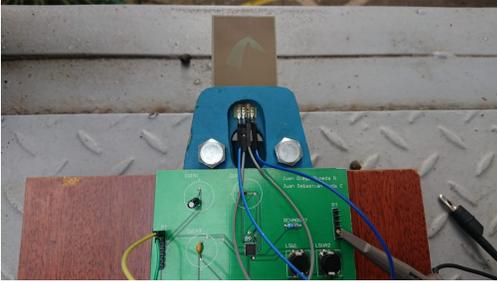


Figura 30: Montaje piezoeléctrico en el puente, vista lateral

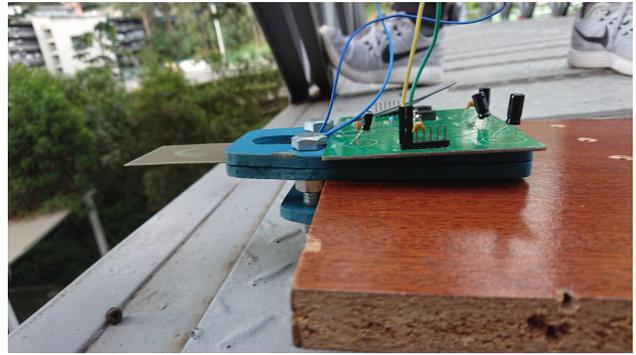


Figura 31: Montaje piezoeléctrico puente, vista frontal

4. RESULTADOS

Los circuitos implementados que se muestran a continuación reflejan, en primer lugar, el circuito de *Harvesting* LTC3331 y el circuito de monitoreo y comunicación con el PIC18F25K40 y XBee.

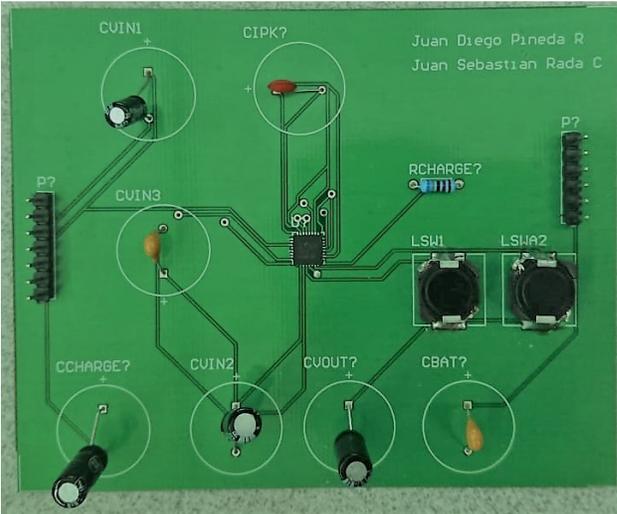


Figura 32: Circuito impreso LTC3331

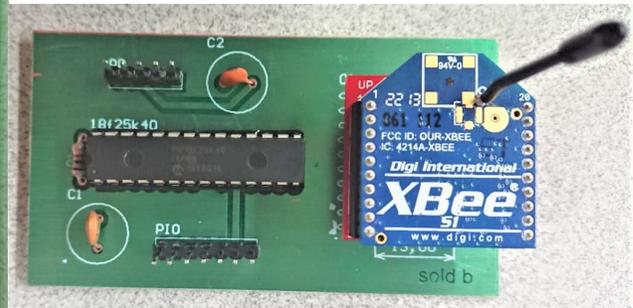


Figura 33: Circuito impreso microcontrolador

4.1. Generador de funciones con el sensor piezoeléctrico

Para la verificación del funcionamiento del sensor se hicieron pruebas manuales, en las que se le realizaba un esfuerzo mecánico sobre el transductor para obtener su curva de circuito abierto conectado en serie. Como se puede apreciar en la siguiente figura las perturbaciones fueron de 1V aproximadamente, y tienen forma similar a los de las figuras [24] y [26], con lo cual se concluye que el modelo aproxima de manera correcta el sistema real.

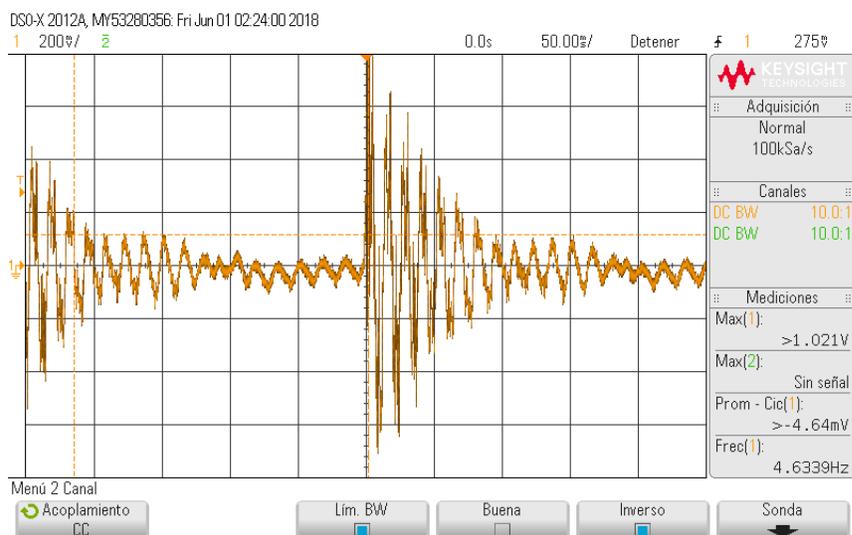


Figura 34: Prueba verificación con sensor

A continuación se ven las señales de Vout (figura 36) y PGOOD (figura 35) obtenidos con el generador:

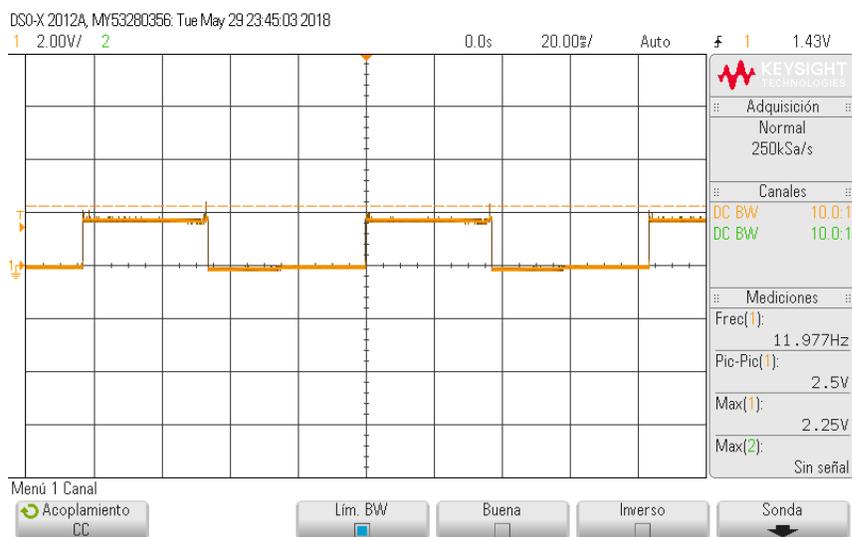
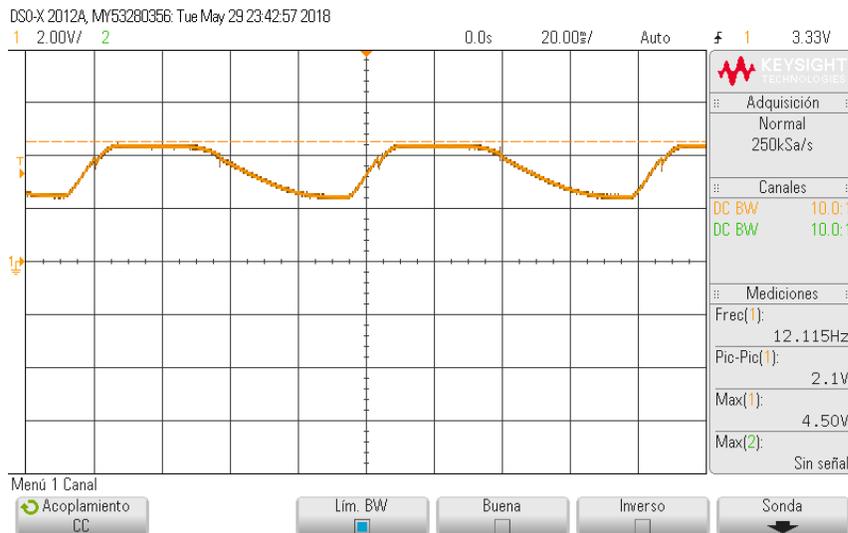
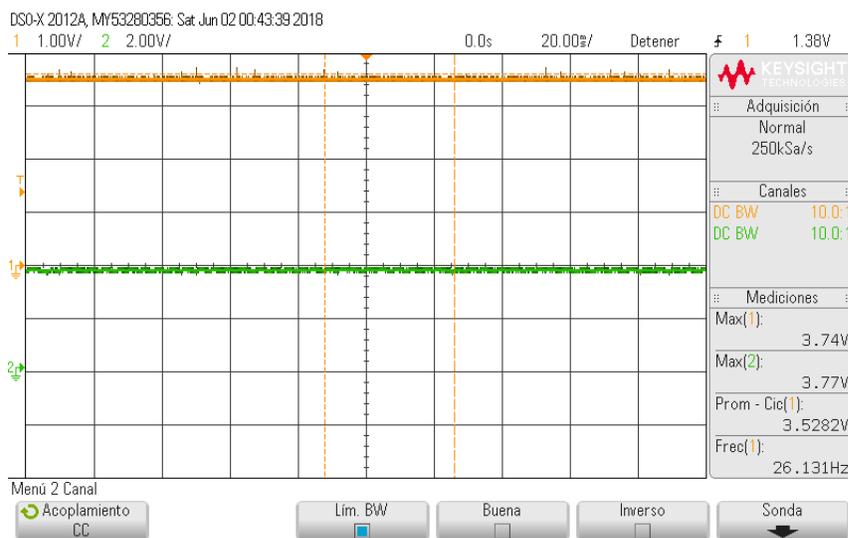


Figura 35: PGOOD con generador en la entrada

Figura 36: V_{out}

Las dos figuras previas, como mencionado, son los valores obtenidos a manera de prueba con un generador. La señal de PGOOD es cuadrada, pues la señal de V_{out} no es constante; su valor cambia de acuerdo con la señal sinusoidal de entrada que hace que el voltaje en el condensador varíe, entrando y saliendo del rango de habilitación de PGOOD.

Figura 37: (Arriba) V_{out} con supercapacitor. (Abajo) PGOOD.

En la figura 37, se ve que el voltaje de salida V_{out} es constante al conectar el supercapacitor a la salida, y en consecuencia la señal de PGOOD se mantiene en alto.

4.2. Mesa vibratoria

En el momento de realizar las mediciones sobre la mesa vibratoria, según los valores de la tabla 4, se pudo evidenciar que el condensador cargó hasta un valor entre 1.3 - 2 V en los tiempos indicados en la tabla 5. Sin embargo debido a las altas magnitudes de las amplitudes de la mesa vibratoria, el voltaje del transductor piezoeléctrico disminuyó considerablemente.

Frecuencia [Hz]	Amplitud pico [mm]	Aceleración [g]	Tiempo para cargar [s]
10	0.5	0.20	-
	1	0.40	-
	1,5	0.60	60
15	0.5	0.45	-
	1	0.91	40
	1.5	1.36	10
20	0.5	0.81	15
	1	1.61	-
30	0.5	1.91	-

Cuadro 5: Tiempos aproximados de carga del condensador.

4.3. Puente peatonal del Edificio de Ingeniería

Los resultados en el puente de ingeniería se presentan a continuación:

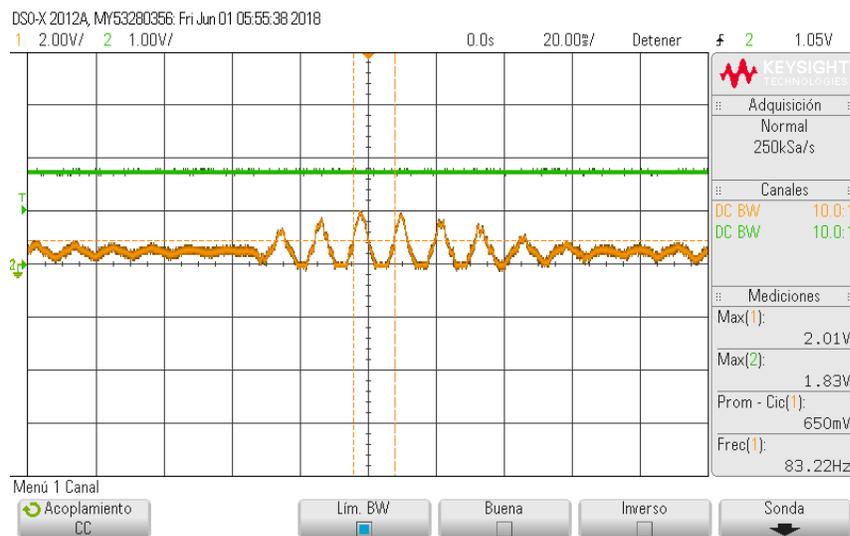


Figura 38: Prueba en puente de ingeniería con sensor LTC3588

Como se puede apreciar en la imagen anterior, las pruebas con el sensor LTC3588 fueron exitosas dado que su voltaje a la salida fue obtenido con la programación en sus bits de selección de voltaje out, siendo estas de 00 para un valor de 1,8 V.

Ahora, que se asegura el correcto funcionamiento con el sensor LTC3588 que pertenece a la misma familia de sensores, se procede a probar el presente sistema que aumenta su complejidad, con lo cual se obtiene:

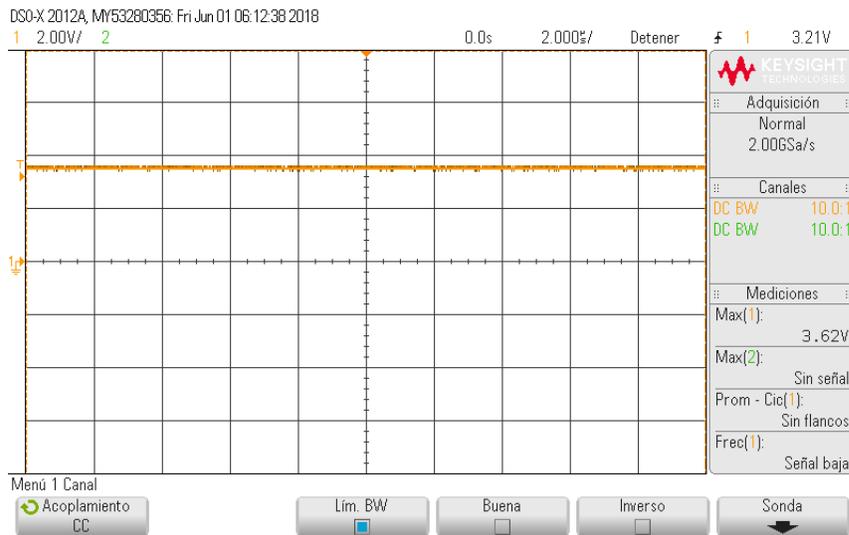


Figura 39: Prueba en puente de ingeniería con LTC3331

Es importante recalcar que el máximo valor de voltaje en la configuración escogida es de 3,6 V, siendo este el valor leído por el osciloscopio. Se comprueba entonces el correcto funcionamiento del circuito implementado.

Se procede entonces a cargar un super condensador el cual almacenará la energía procedente del piezoeléctrico, cumpliendo con los objetivos planteados del trabajo en desarrollo.

4.3.1. Potencia obtenida

Para poder conocer la potencia obtenida, se calcula la energía almacenada en el condensador de salida (de 10 mF), según la ecuación:

$$E_c = \frac{1}{2}CV^2 \quad (13)$$

Donde C es la capacitancia y V es el voltaje en el condensador. Con el condensador utilizado y el voltaje programado en el LTC3331 (3.6 V), se tiene que la energía del condensador es:

$$E_c = 0,0648 \text{ J}$$

Teniendo en cuenta que $E = Pt$ y $1 \text{ W} = 1 \text{ J/s}$, se puede, en primer lugar, calcular el tiempo necesario para cargar el condensador de acuerdo con la potencia estimada en la tabla 3:

Posición	Potencia Estimada [mW]	Tiempo [s]	Tiempo [min]
0,0	0.266	243	4
0,1	0.146	444	7.4
1,0	0.438	148	2.5
1,1	0.428	151	2.5
0,0	3.10	7.9	-
0,1	9.90	6.2	-

Cuadro 6: Tiempo necesario para cargar el condensador.

Con base en la tabla 6, es entonces posible, ver que la potencia estimada es similar a la potencia real obtenida (analizando el tiempo que el condensador demora en cargarse), permitiendo concluir que el estimador de potencia es capaz de predecir de manera aproximada la potencia cosechada. La siguiente tabla permite calcular la potencia real obtenida:

	Tiempo [s]	Potencia obtenida [mW]
Bajo tráfico	480	0.135
Alto tráfico	15	4.32

Cuadro 7: Potencia real obtenida en el puente de ingeniería.

Cabe destacar que el tiempo que se demora el condensador en cargarse (y por ende la potencia que se obtiene) depende enteramente de la cantidad de personas que pasan en ese determinado período de tiempo, pudiendo variar según la hora del día.

Con base en esto, y con los consumos aproximados del microcontrolador y del XBee, es posible ver cuánto tiempo el sistema de *harvesting* es capaz de alimentar la etapa de monitoreo:

- Consumo de microcontrolador: 50 nA @ 1.8 V en modo *sleep*, es decir, 90 nW.
- 32 $\mu\text{A}/\text{MHz}$ @ 1.8 V, es decir, trabajando a 16 MHz, el consumo es de 0.92 mW.
- El consumo del XBee es de 50 mA en transmisión, 10 μA en *sleep*, teniendo un consumo en vatios de 165 mW y 33 μW respectivamente.

Con estos consumos, el capacitor de salida es capaz de alimentar el microcontrolador y el XBee durante 0.4 s, lo cual, en esta aplicación, es suficiente para que el ADCC convierta y se envíen los datos (una muestra de 10 bits tarda 11.5 μs). El algoritmo del controlador está diseñado para que sólo envíe datos 3 veces (PGOOD

llegue 3 veces), luego de eso no se envía nada y el microcontrolador permanece en *Sleep* al igual que el XBee. Como extensión de la aplicación, puede agregarse un supercapacitor de mayor capacidad, para aumentar la energía almacenada y aumentar el tiempo que se alimenta el microcontrolador, permitiendo la mejora del algoritmo para tareas más complejas (seguimiento del máximo punto de potencia).

5. CONCLUSIONES Y TRABAJOS A FUTURO

Gracias a este trabajo de grado se pudieron aplicar nuevas técnicas de obtención de energía a partir de fuentes no convencionales, en este caso vibraciones mecánicas, sin embargo es necesario mayor desarrollo en la tecnología de piezoeléctricos, con el fin de mejorar la eficiencia en la conversión y poder llegar a niveles más altos de potencia promedio generada. El estudio de las vibraciones en estructuras más profundo permitiría un mejor análisis de los sistemas en cuestión y poder diseñar los transductores en función de estas características. En cuanto a la presente implementación, ésta no es más que un prototipo hacia futuro y enfocado hacia la producción, los circuitos podrían ser diseñados con dimensiones más pequeñas y con componentes de menor tamaño, así como modulares para poder acoplar múltiples transductores y aumentar la obtención de energía. Adicionalmente, es posible de igual manera acoplar sistemas de *Harvesting* de piezoeléctricos con otros métodos tales como electromecánicos, para aumentar la obtención de energía obtenida (sistemas Híbridos). En cuanto al transductor, podría mejorarse y facilitarse la sintonización del mismo con masas ajustables, pues el Mide V25W no tiene cómo acoplar de manera firme las masas, es necesario hacerlo con prensas o masas con pegante. Los objetivos del trabajo de grado, a pesar de las dificultades, fueron cumplidos satisfactoriamente, sin embargo, para lograr una mejor caracterización del sistema, podrían medirse más estructuras que las medidas en el presente trabajo, con diferentes longitudes (en el caso de los puentes), alturas (tales como torres de telefonía, rascacielos, estaciones de bus y de trenes) frecuencias y usos (vehicular, peatonal), con el fin de obtener un modelo más robusto con el cual predecir con mayor precisión las magnitudes de las vibraciones.

Este trabajo y lo que se usó para comunicar (XBee y el protocolo ZigBee), permite la posibilidad de establecer redes no sólo de obtención de energía (*energy harvesting*), sino también de monitoreo y control de diversas variables, como sensores de presión que además de medir parámetros importantes, generen energía. Por ende es posible llevar estas redes a aplicaciones IoT que interconecten regiones con necesidad de generar energía limpia y de comunicarse con los principales centros urbanos.

Las vibraciones y la extracción de energía a partir de ellas depende de la estructura en la que se encuentre ubicado el transductor, lo cual fue evidente en este trabajo al medir en un puente poco transitado, por lo que la carga de los condensadores no es rápida, es por ello que se realizaron pruebas en entornos controlados como lo son las mesas vibratorias para no depender del tráfico aleatorio del puente.

6. ANEXOS

Anexo 1. Layout circuito LTC3331

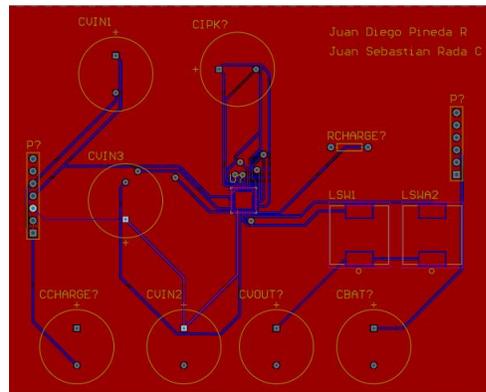


Figura 40: PCB LTC3331

Anexo 2. Layout circuito PIC y XBee

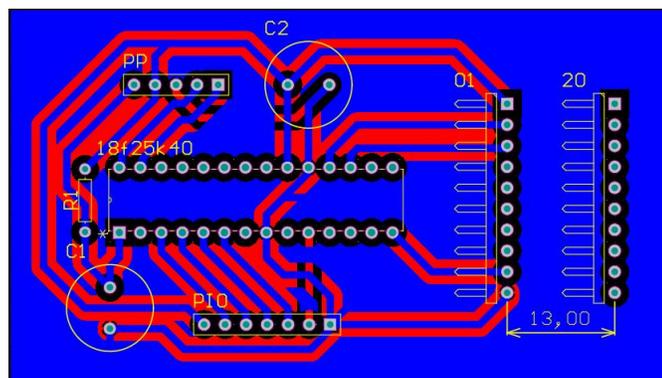


Figura 41: PCB PIC y XBee

Anexo 3. Código MPLAB principal PIC

(En documento adjunto: <http://bit.ly/2J42z3A>)

Anexo 4. Código Matlab de estimación de potencia

(En documento adjunto: <http://bit.ly/2J42z3A>)

Referencias

- [1] L. Zuo, X. Tang, "Simulation and experiment validation of simultaneous vibration control and energy harvesting from buildings using Tuned Mass Dampers", in *American Control Conference*, United States, 2011, pp 3134 - 3139.
- [2] I. Muhammad y U.K. Farid, "Electromagnetic-based Bridge Energy Harvester Using Traffic-Induced Bridge's Vibrations and Ambient Wind", in *International Conference on Intelligent Systems Engineering*, Pakistan, 2016.
- [3] M. Peigney, D. Siegert. "Piezoelectric energy harvesting from traffic-induced bridge vibrations". *Smart Materials and Structures*, vol 22, pp. 095019, 2013.
- [4] E. Arroyo. "Récupération d'énergie à partir des vibrations ambiantes: dispositif électromagnétique et circuit électronique d'extraction synchrone". Ph.D dissertation, Université de Grenoble, Grenoble, 2012.
- [5] F. Khan and I. Ahmad, "Review of Energy Harvesters Utilizing Bridge Vibrations", *Shock and Vibration*, vol. 2016, pp. 1-21, 2016.
- [6] M. Shi, "Energy harvesting from wind-induced vibration of suspension bridges", Maestría, Instituto Tecnológico de Massachusetts, 2013.
- [7] M. Wischke, G. Biancuzzi, G. Fehrenbach, Y. Abbas and P. Woias, "Vibration harvesting in railway tunnels", *Power MEMS2010*, pp. 123 - 126, 2010
- [8] T. Lin, J. Wang and L. Zuo, "Energy Harvesting from Rail Track for Transportation Safety and Monitoring", *University Transportation Research Center - Region 2*, pp. 1 - 11, 2014.
- [9] G. Despesse, T. Jager, J.-J. Chaillout, J.-M. Leger, S. Basrour, "Design and fabrication of a new system for vibration energy harvesting", *Res. Microelectron. Electron.* 2005, vol. 1, pp. 225-228, 2005.
- [10] W. He, J. Zhang, S. Yuan, A. Yang and C. Qu, "A Three-Dimensional Magneto-Electric Vibration Energy Harvester Based on Magnetic Levitation", *IEEE Magnetics Letters*, vol. 8, pp. 1-3, 2017.
- [11] Beards, C. "Structural Vibration Analysis and Damping", *Butterworth-Heinemann*, 2003.
- [12] *Introduction to Dynamics and Vibrations*, School of Engineering, Brown University. Chapter 5. en: http://www.brown.edu/Departments/Engineering/Courses/En4/Notes/vibrations_overview/vibrations_overview.htm. Última consulta el 30 de Mayo de 2018.
- [13] D. E. Newland. "Pedestrian excitation of bridges", *Proc. Instn Mech. Engrs. University of Cambridge*, vol. 2018, pp. 477 - 492, 2004.
- [14] LDS - Dactron. "Basics of Structural Vibration Testing and Analysis". Application note AN011, 2003.
- [15] D. Charnegie. "Frequency tuning concepts for piezoelectric cantilever beams and plates for energy harvesting", Tesis de Maestría, Escuela de ingeniería, Pittsburg Univ. Pittsburg, 2007.
- [16] Fadhlullah, S. Ismail, W. "Solar Energy Harvesting Design Framework for 3.3 V Small and Low-powered Devices in Wireless Sensor Network", in 2015 1st International Conference on Telematics and Future Generation Networks (TAFGEN), Kuala Lumpur, Malasia, 2015.
- [17] Yildiz, F. "Potential Ambient Energy - Harvesting Sources and Techniques", in *The Journal of Technology Studies*, vol. 35, p 40 - 48, 2017.

- [18] Linear Technology. “Nanopower Buck-Boost DC/DC with Energy Harvesting Battery Charger”, LTC3331 datasheet, Julio 2014 [Revisado en Agosto 2015].
- [19] Microchip. “28-Pin, Low-Power, High Performance Microcontrollers with XLP Technology”, PIC18(L)F24/25K40 datasheet, Junio 2016 [Revisado en Noviembre 2017].
- [20] SparkFun. Esquemático Energy Harvester V12. 2010. Disponible en https://www.sparkfun.com/datasheets/BreakoutBoards/energy_harvester-v12.pdf. Última consulta el 30 de Mayo de 2018.
- [21] Linear Technology. “Nanopower Energy Harvesting Power Supply”, LTC3588-1 datasheet, Septiembre 2010 [Revisado en Agosto 2015].
- [22] SparkFun. Serial Communication. En <https://learn.sparkfun.com/tutorials/serial-communication/all>. Consultado por última vez el 30 de Mayo de 2018.
- [23] Zigbee, Comunicación para dispositivos. En <https://sg.com.mx/content/view/310>. Consultado por última vez el 25 de Mayo de 2018.
- [24] Comunicación Serial. En http://190.24.150.73/seda/seda_wp_00/?page_id=1519. Consultado por última vez el 20 de MAyo de 2018.
- [25] Basics of UART Communication. En <https://web.stanford.edu/class/cs140e/notes/lec4/uart-basics.pdf>. Consultado por última vez el 29 de Mayo de 2018.
- [26] ZigBee. En <https://www.ecured.cu/ZigBee>. Consultado por última vez el 29 de Mayo de 2018.
- [27] Beeby. S, White. N. “*Energy harvesting for autonomous systems*”. Norwood, MA: Artecvh House, 2010.
- [28] Crawford. F. “*Berkeley Physics Course*”. Norwood, MA: Editorial Reverté, 2003.
- [29] Hehn. T y Manoli. Y. “*CMOS Circuits for Piezoelectric Energy Harvesters*”. Springer Series in Advanced Microelectronics, 2014.
- [30] Midé Technology. “Vulture Piezoelectric Energy Harvesters datasheet”, [Revisado en Enero 2013].