

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



PONTIFICIA
**UNIVERSIDAD
CATÓLICA**
DEL PERÚ

ELABORACIÓN DE UN SISTEMA DE COSECHA DE ENERGÍA UTILIZANDO UN TRANSDUCTOR ELECTROMAGNÉTICO

Tesis para optar el Título de Ingeniero Electrónico, que presenta el bachiller:

Eduardo José Queccara Castilla

ASESOR: Ing. José Daniel Alcántara Zapata

Lima, junio del 2014

RESUMEN

En el presente trabajo se elaboró un sistema de cosecha de energía, utilizando un generador eléctrico como el elemento que convierte el esfuerzo biomecánico en energía eléctrica y una batería litio – ión como dispositivo de acopio energético. El prototipo diseñado, se basa en modelos aplicados en sistemas de cosecha que utilizan fuentes variadas de energía, descritas en la literatura. [10]

El sistema se divide en cuatro bloques funcionales: Generador, Rectificador, Conversor elevador y batería. Solo los bloques rectificador y conversor son descritos y diseñados de manera independiente, para reunirse con los otros bloques y dar como resultado el prototipo propuesto. El trabajo se llevó a cabo mediante dos versiones físicas del sistema (A y B). Ambas implementadas usando elementos discretos. La versión A del sistema permite la verificación de la teoría revisada y observar los parámetros adecuados para la versión B, sistema diseñado considerando la portabilidad y efectividad del equipo final a presentar, eso incluye considerar elementos de bajo consumo.

El circuito impreso requerido, se diseña utilizando el software Cadsoft Eagle en su versión 6.3. Se usa un mecanismo comercial de una linterna de manivela para llevar esfuerzo humano hacia el generador. Entre los resultados obtenidos que cabe resaltar, se tiene un circuito físico que reúne los convertidores cuyas dimensiones son de 2.6 por 2.1 cm de área y el generador acoplado al mecanismo comercial puede inyectar valores de corriente alrededor de 200mA en la batería. Se muestra experiencias de recarga de la misma usando el sistema propuesto.

A mis padres Eduardo y Benny por acompañarme en esta etapa de mi vida

A mi hermana Andrea por sus consejos

A mi asesor José Daniel por su paciencia y confianza

Al Dr. Carlos Silva y al grupo de microelectrónica (GuE) por su apoyo en estos últimos años

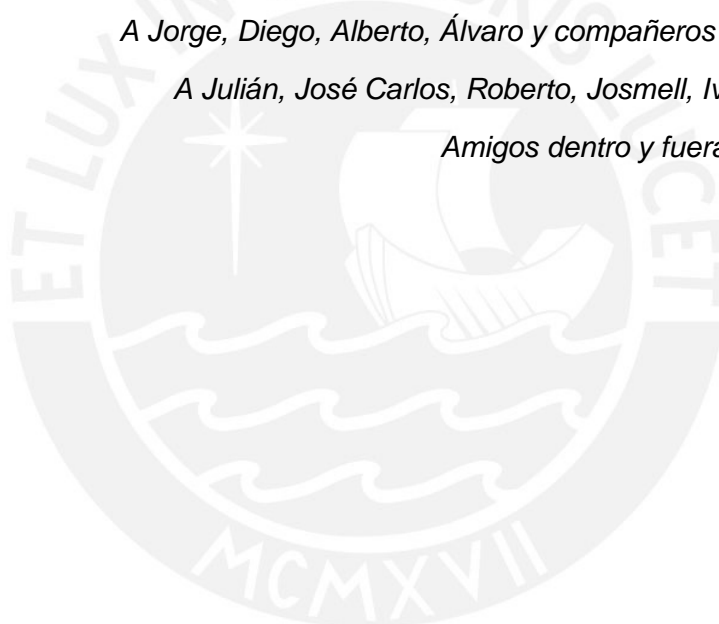
A Gonzalo, Edward, Henry, Andrés, Christian, Luis, Sammy, Guillermo, Arturo, Niels, Jefes y compañeros del GuE que me brindaron su amistad y apoyo

A Jorge, Diego, Alberto, Álvaro y compañeros de la especialidad

A Julián, José Carlos, Roberto, Josmell, Iván por su amistad

Amigos dentro y fuera de la universidad

Muchas gracias





*Una voluntad inquebrantable
y un corazón que cree en uno mismo,
abrirán el camino
hacia un futuro más brillante*

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN.....	1
PROBLEMÁTICA: USO DE BATERÍAS Y OTRAS FUENTES DE ALIMENTACIÓN EN DISPOSITIVOS ELECTRÓNICOS	2
1.1 Introducción	2
1.2 Problemática.....	3
1.3 Hipótesis.....	4
1.3.1 Hipótesis principal	4
1.3.2 Hipótesis secundarias	5
1.4 Objetivos.....	6
1.4.1 Objetivo general	6
1.4.2 Objetivos específicos.....	6
SISTEMAS DE COSECHA DE ENERGÍA COMO FUENTE ALTERNATIVA O COMPLEMENTARIA PARA ENERGIZAR APARATOS ELECTRÓNICOS	7
2.1 Introducción	7
2.2 Compresión del uso de sistemas de cosecha de energía en dispositivos actuales	8
2.3 Topologías de sistemas de cosecha energética.....	8
2.4 Componentes de un sistema de cosecha de energía.....	9
2.5 Administración de poder y cualidades energéticas del sistema.....	11
2.6 Fuente de energía en el ambiente	12
2.6.1 Energía biomecánica.....	14
2.7 Análisis morfológico en sistemas de cosecha de energía	17
2.8 Síntesis sobre el asunto de estudio	20

ELABORACIÓN DE UN SISTEMA DE COSECHA DE ENERGÍA UTILIZANDO UN TRANSDUCTOR ELECTROMAGNÉTICO COMO PROPUESTA DE FUENTE DE ALIMENTACIÓN	22
3.1 Diagrama de bloques del sistema	22
3.1.1 Generador de potencia	22
3.1.2 Dispositivo de acopio de energía	25
3.1.3 Convertidor de poder de corriente alterna a corriente continua (AC / DC)	26
3.1.4 Convertidor de poder DC / DC	27
3.1.4.1 Diseño del convertidor elevador versión A	27
3.1.4.2 Diseño del convertidor elevador versión B	29
3.2 Elaboración de primera versión del sistema de cosecha energética	34
3.3 Elaboración de la segunda versión del sistema de cosecha de energía	35
3.4 Ensayos en la primera versión del sistema de cosecha energética	38
3.4.1 Etapa de rectificación	39
3.4.2 Etapa de conversor elevador	39
3.4.3 Ensayos en el sistema generador de potencia-rectificador-conversor	41
RESULTADOS DEL PROTOTIPO ELABORADO.....	43
4.1 Convertidor AC – DC en el prototipo	43
4.2 Recarga controlada de elemento de almacenamiento de energía	44
4.3 Recarga de una batería litio - ión	45
CONCLUSIONES.....	48
RECOMENDACIONES.....	49
BIBLIOGRAFÍA.....	50

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Diagrama de bloques de un circuito para cosecha energética	10
Figura 2.2 Circuitos rectificadores AC – DC.....	18
Figura 2.3 Circuitos de convertidor DC – DC	19
Figura 3.1 Diagrama de bloque del sistema de cosecha de energía	22
Figura 3.2 Estructura de motor de corriente continua.....	23
Figura 3.3 Sistema mecánico comercial acoplado al motor.....	24
Figura 3.4 Forma de la señal de salida del motor	24
Figura 3.5 Batería litio – ion	25
Figura 3.6 Diagrama esquemático de convertidor de corriente alterna a corriente continua	26
Figura 3.7 Rectificador de onda completa usando diodos Schottky (versión A)	27
Figura 3.8 Diagrama esquemático de convertidor elevador (versión A)	27
Figura 3.9 Convertidor elevador en base a elementos discretos (versión A).....	29
Figura 3.10 Diagrama esquemático de convertidor elevador (versión B)	31
Figura 3.11 Diagrama esquemático de primera versión del sistema de cosecha de energía	34
Figura 3.12 Primera versión física del sistema de cosecha energética	35
Figura 3.13 Rectificador de onda completa y convertidor elevador	36
Figura 3.14 Máscara de componentes.....	37
Figura 3.15 Máscara de pistas y pads	38
Figura 3.16 Rectificador y conversor elevador	38
Figura 3.17 Señal de salida de rectificador	39
Figura 3.18a Voltaje de salida del convertidor en modo de conducción continua.....	40
Figura 3.18b Voltaje de salida del convertidor en modo de conducción discontinua	40

Figura 3.19a Señales eléctricas en capacitores C1 y C2 desconectado a la resistencia R1	41
Figura 3.19b Señales eléctricas en capacitores C1y C2 conectado a la resistencia R1 ...	41
Figura 3.20a Señal de salida en el convertidor en modo CCM.....	42
Figura 3.20b Señal de salida en el convertidor en modo DCM.....	42
Figura 4.1a Señal de salida de etapa de rectificación en prototipo al inicio de funcionamiento	43
Figura 4.1.b Señal de salida de etapa de rectificación en prototipo cuando es usado continuamente	43
Figura 4.2 Funcionamiento de convertidor elevador	44
Figura 4.3 Carga máxima de elemento de almacenaje de energía	45
Figura 4.4 Carga del elemento de almacenaje a partir del umbral de tensión baja	45
Figura 4.5 Tren de pulsos de corriente	46
Figura 4.6 Señal de corriente amplificada.....	46
Figura 4.7 Recarga medida en una batería.....	47
Figura 4.8 Prototipo físico del sistema de cosecha de energía	47

INTRODUCCIÓN

Con el avance constante de la tecnología en equipos electrónicos, donde la portabilidad e independencia de la línea eléctrica se hacen más relevantes, la necesidad de elementos de almacenamiento de energía y técnicas que incrementen el tiempo de vida de dichos dispositivos aumenta. Cosecha de energía o *energy harvesting* es un campo de estudios que se basa en la extracción u obtención de energía presente en el ambiente para transformarla en una fuente eficiente y útil de energía eléctrica.

Para elaborar un sistema de cosecha de energía debe tenerse en cuenta el tipo de fuente que se escogerá. En la literatura se encuentran topologías según el modelo de energía y transductor que se utilice. Por otro lado hay esquemas iniciales que gobiernan estos sistemas y sirven de criterio para su elaboración. Una fuente de energía a explotar se encuentra en el cuerpo humano y animal.

En el presente trabajo se detalla la elaboración de un prototipo de un sistema de cosecha energética que pueda generar energía eléctrica utilizable a partir del movimiento de las extremidades de personas o animales con posibilidad a implantarse. Se encuentra basado en un generador eléctrico y las topologías estudiadas divididas en bloques electrónicos.

El documento se divide en cuatro capítulos. En el primer capítulo, se explica la situación actual de las tecnologías en cuestión de alimentación eléctrica y sus retos y como se relaciona con el trabajo presentado. En el segundo capítulo, se presentan los aspectos generales de un sistema de cosecha además de trabajos realizados que contribuyen al campo de estudio. En el tercer capítulo, se propone un diseño para un prototipo de un sistema de cosecha y se muestran algunas experiencias que corroboran la literatura realizada. Finalmente, en el capítulo cuatro, se muestran pruebas y resultados en el prototipo elaborado.

CAPÍTULO 1

PROBLEMÁTICA: USO DE BATERÍAS Y OTRAS FUENTES DE ALIMENTACIÓN EN DISPOSITIVOS ELECTRÓNICOS

1.1 INTRODUCCIÓN

Es grande el avance que ha tenido la tecnología estas últimas décadas, en la producción de dispositivos electrónicos al igual que su utilización en nuevos y diversos campos, pasando desde las aplicaciones militares que fue el inicio del desarrollo de la electrónica, luego por la industria, hasta los dispositivos domésticos que se tienen hoy en día.

A la par que aumentan los equipos electrónicos y sus nuevas y variadas aplicaciones, empieza a generar una mayor demanda por energía y su portabilidad. Elementos como las baterías han ido estudiándose y mejorándose al paso de los años. Sin embargo, estos últimos años se está llegando al límite de sus capacidades físicas, específicamente su densidad energética, que es una característica muy importante ya que dependiendo el material que las componen y el tamaño físico que presentan, tendrán diferentes valores. La portabilidad de un equipo se prioriza cada vez más en el diseño de dispositivos electrónicos, por ello la batería que lo energice debe ser de menores dimensiones y menor peso. [1]

Por otro lado, la creciente demanda de energía eléctrica por el uso cotidiano de elementos eléctricos y electrónicos y la falta o escasez de líneas eléctricas en áreas rurales, ha significado un mayor gasto de recursos no renovables para su generación. Además, el incremento de producción de baterías acrecienta la contaminación ambiental, por ser en su gran mayoría, elementos no biodegradables. En la última década, el tema del daño al medio ambiente ha cobrado mayor relevancia y la investigación por la generación de “energía verde” se ha ampliado. Un campo de estudio conocido como cosecha de energía

(*energy harvesting*) ha recogido el interés de sistemas como los paneles solares que utilizan fuentes alternativas para la generación de energía eléctrica para equipos de bajo consumo. [2]

Lo que se busca con este trabajo de tesis, es la elaboración de un sistema que utilice técnicas de este campo con una fuente de energía alternativa, para alimentar un equipo electrónico de bajo consumo, por ejemplo en una aplicación implantable.

1.2 PROBLEMÁTICA

La portabilidad de dispositivos electrónicos, ha cobrado gran importancia en la actualidad. Esto ha generado un incremento en la necesidad de fuentes de energía móviles y ha hecho más evidente los límites de las tecnologías vigentes. Celulares, sistemas GPS, computadoras portátiles, etc. poseen limitaciones en su tiempo de uso debido a la necesidad de recarga o reemplazo de sus baterías.

La densidad de poder en las baterías se duplica cada diez años, según investigaciones. [3] Como consecuencia, existe una compensación entre el consumo de energía, peso de la batería y duración de operación. Se tiene el caso de una computadora que cuenta con una batería de 720 g, con una necesidad de 28 W con una duración de aproximadamente 4 horas. [4] Ello resulta en un inconveniente en aplicaciones críticas como prótesis humanas u otros dispositivos que necesitan largo tiempo de duración con un peso ligero.

Dentro de la gama de aplicaciones en electrónica se tiene el área de biomedicina, donde se tiene artillugios externos e internos que mejoran y ayudan a funcionar de manera óptima el cuerpo de un organismo vivo. Los marcapasos, por ejemplo, son sistemas de muy bajo consumo, por lo que la batería que se coloca en estos tiene un largo tiempo de vida. Sin embargo, como en cualquier dispositivo electrónico, ésta debe reemplazarse en

algún momento, representando un alto costo para un usuario por cada operación de cambio. [1]

Por ello las técnicas de cosecha de energía son útiles, ya que utilizan fuentes alternativas para generar energía eléctrica. En el caso del marcapaso, se recarga la batería y se evita su reemplazo, demostrando que puede alimentarse un dispositivo durante un periodo extremadamente largo de tiempo, utilizando medios alternativos, como la energía en el cuerpo humano.[5] Se tienen estudios de qué fuentes se encuentran disponibles dentro de un organismo vivo y cuan efectivas son para alimentar un equipo implantable, mas se desconoce cuan complejo puede llegar a ser dicho equipo.

1.3 HIPÓTESIS

Dispositivos electrónicos médicos implantables son diseñados para bajo consumo, a razón de evitar peligros por corrientes de fuga al usuario y permitir un largo ciclo de vida al elemento alimentador, muchas veces una batería de pequeñas dimensiones. Además de ser diseñados para ocupar el menor espacio posible y para no generar molestias en el usuario.

Un dispositivo electrónico usando técnicas referidas a la cosecha de energía considerando fuentes alternativas referentes al cuerpo de un organismo vivo deben satisfacer las características eléctricas necesarias para convertirse en una fuente de alimentación al equipo internamente.[1]

1.3.1 HIPÓTESIS PRINCIPAL

Debido a que equipos electrónicos son cada vez más reducidos, sofisticados, consumen menor cantidad de energía eléctrica y se requieren en lugares remotos, inclusive dentro del cuerpo humano o animal, de manera que su suministro de poder sea difícil de

reemplazar o deba ser absolutamente independiente de la red eléctrica, se necesita de un sistema de cosecha de energía que provea de electricidad para alimentarlo o recargue un elemento almacenador de manera indefinida. [6]

Estudios realizados sobre posibles fuentes de energía alternativa en un cuerpo orgánico revelan que movimientos naturales, y ello relacionado a la energía biomecánica, son capaces de entregar mayor cantidad de potencia a un sistema, en comparación a otras como la energía térmica. Por ello, convertir esta energía sin alterar la función o el movimiento natural de las extremidades y sin significar un esfuerzo extra o casi imperceptible por parte del usuario, nos permitirá alimentar equipos complejos como un procesador de señales neuronales. [7]

1.3.2 HIPÓTESIS SECUNDARIAS

El gasto promedio de energía que una persona realiza es $1.07 * 10^7$ J por día, un aproximado de 123.84 watts. [3] Esta energía se libera en calor y movimiento. Si un sistema de cosecha energética se basa en los movimientos naturales de un cuerpo orgánico y se diseña de manera que el usuario no perciba que mediante su esfuerzo mecánico se está generando energía eléctrica, será útil. Ejemplos que comprueban este hecho, son un reloj que utiliza el movimiento del brazo para producir electricidad mediante la oscilación de una masa interna, con un resultado obtenido de cinco microwatts. Por otro lado, se tiene un equipo generador similar a una mochila que captando la oscilación del centro de masa del cuerpo humano, produce 7.4 watts. [3]

Estos equipos diseñados para uso humano deberían replicarse en animales y ser útiles, sobre todo en aquellos cuya composición física supera en determinados aspectos a la humana.

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 OBJETIVO GENERAL

El objetivo de esta tesis, es el desarrollo del prototipo de un sistema de cosecha energética utilizando un transductor de energía mecánica. Energía posiblemente obtenida por el movimiento relativo de las extremidades humanas o animales alrededor de una articulación o de acoplamientos próximos a una junta y empleando un mecanismo acoplado a estos elementos. Es un sistema que trabajará en la recarga de una batería, de manera controlada y apunta a ser implantada. Además, este trabajo pretende aportar un modelo inicial que pudiera utilizarse en otros animales e inclusive personas que requieran dispositivos complejos implantables en las que las técnicas actuales de cosecha energética a nivel interno de un organismo vivo no satisfacen los parámetros eléctricos requeridos.

1.4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Escoger un modelo físico útil, efectivo y liviano de transductor de energía mecánica
- Diseñar el prototipo de sistema de cosecha, utilizando topologías adecuadas que permitan alta eficiencia eléctrica
- El diseño debe cumplir con criterios de bajo consumo y espacio físico reducido.
- La etapa de salida del sistema, debe permitir la recarga de una batería que puede ser utilizada para la alimentación de cualquier dispositivo electrónico.
- La recarga de la batería, debe hacerse de manera controlada, por lo que el sistema debe contener una etapa medidora de voltaje sobre esta o un indicador digital.

CAPÍTULO 2

SISTEMAS DE COSECHA DE ENERGÍA COMO FUENTE ALTERNATIVA O COMPLEMENTARIA PARA ENERGIZAR APARATOS ELECTRÓNICOS

2.1 INTRODUCCIÓN

Actualmente, el mundo se mueve alrededor de nuevas tendencias en tecnologías energéticas y electrónicas. Por un lado, se promueve el uso de fuentes de energía alternativas a los combustibles fósiles, como energía solar, eólica, geotérmica, etc. Por otro, tenemos dispositivos electrónicos de dimensiones cada vez más reducidas, junto con su consumo de energía.

Estas tendencias marcan la pauta hacia nuevos temas de investigación y desarrollo tecnológico. Es así que el campo de cosecha energética o *energy harvesting*, aplicado inicialmente en fuentes energéticas como paneles solares o molinos de viento, es investigado a mayor profundidad. Con dispositivos electrónicos de muy bajo consumo y transductores versátiles, en combinación con múltiples fuentes de generación de energía, nuevos sistemas electrónicos aparecen. [8]

Los sistemas de cosecha energética planteados a partir de fuentes energéticas biológicas son parte de un conjunto de aplicaciones y estudios biomédicos, un ejemplo es el marcapaso cardiaco. La dificultad y el reto que presenta el diseño de un sistema dependen del empleo que se le dará y las condiciones que lo rodean.

Se presenta a continuación una descripción de estos sistemas, sus topologías, componentes y metodología de diseño en base a la energía biomecánica como fuente.

Se considera las tecnologías pertinentes, actuales, estudiadas y utilizadas con mayor difusión, algunas de ellas incluidas en el ámbito biomédico.

2.2 Compresión del uso de sistemas de cosecha de energía en dispositivos actuales

A medida que la tecnología en los semiconductores evoluciona, el valor de las dimensiones y las características eléctricas de los circuitos integrados y dispositivos que los contienen se reducen. Esto ha permitido que la electrónica entre a una nueva etapa de desarrollo de sistemas, tal que ahora pueden llegar a lugares a los que nunca se ha tenido acceso o no se tiene acceso alguno, como es el caso de las aplicaciones biomédicas o las redes de sensores remotos en espacios geográficos en descubrimiento.

Estos sistemas, cada vez más pequeños y variados, tienen como limitante la energía entregada por una batería. A pesar de que la tecnología en los suministradores, en sus materiales y diseños, se ha mejorado, su ciclo de vida sigue siendo reducido en comparación con el intervalo de tiempo de funcionamiento que se busca en estos nuevos equipos. [6]

La solución propuesta ante esta situación es el uso de sistemas de cosecha energética. Este conjunto de técnicas aplicadas a los sistemas electrónicos de bajo consumo, aseguran un abastecimiento energético a partir de una fuente de energía presente en el ambiente.

2.3 Topologías de sistemas de cosecha energética

Según la configuración que se plantee durante el diseño del dispositivo electrónico al cual se le agregará la característica de recolección de energía se tendrán tres topologías [9]:

- Sistema de recolección complementado con batería: la batería es la fuente principal y única de energía. El sistema limita el uso de energía de la batería, ello incrementa el tiempo de vida del dispositivo y disminuye la frecuencia de cambio o recarga externa de la pila.

- Sistema de recolección autónoma: no se usa batería y el dispositivo de cosecha alimentará al dispositivo. Está limitado por la presencia de la fuente de energía en el ambiente. Es capaz de mantener un largo periodo de funcionamiento.
- Sistema de recolección híbrido autónomo: es la topología más utilizada. La batería juega un papel importante, es acumulador de energía, mientras el sistema de cosecha recolecta energía para el mantenimiento del dispositivo y la recarga de la batería. Utilizando técnicas de diseño adecuadas se logran muy grandes periodos de funcionamiento óptimo del circuito alimentado.

2.4 Componentes de un sistema de cosecha de energía

A continuación se describe los componentes fundamentales en un sistema de cosecha energética, considerando que su implementación logrará una mayor efectividad en el funcionamiento del dispositivo. [9]

- Fuente de cosecha: se refiere al dispositivo que recibe energía del ambiente. Un sistema de cosecha puede ser alimentada por más de una fuente de energía ambiental; sin embargo, esto incrementa la complejidad en su diseño.
- Subsistema de cosecha: conformado por los siguientes componentes.
 - Administrador de poder, consciente de la cosecha: componente primordial, que lee el estado del subsistema y tomará decisiones y provee de señales de control.
 - Monitor de energía: recolecta datos de la fuente de energía, del almacenamiento de energía y la carga
 - Interruptor de poder: se encarga de encender o apagar subsistemas dentro del dispositivo según el estado de la energía.

- Convertidores de poder: dependerán de la forma de las señales de entrada o salida del transductor, el elemento almacenador y la carga. Pueden ser convertidores AC – DC, DC - DC, etc.
- Enrutamiento de poder: estas son las líneas que guiarán el transporte de energía a partir del transductor a la carga y/o el elemento almacenador o del reservorio a la carga
- Dispositivo de acopio de energía: puede ser una batería recargable o un ultracapacitor.
- Circuito de recarga con protección para sobrecarga: se considera que la recarga del elemento recolector sea el más adecuado según su composición química.
- Protección contra carga baja: evita que el sistema se descargue por completo o más allá de un nivel crítico.
- Carga: representado por el dispositivo electrónico, compuesto de un controlador, actuadores, sensores, etc.

En la figura 2.1 se observa un diagrama de bloques de un sistema electrónico básico que considera los componentes anteriores.

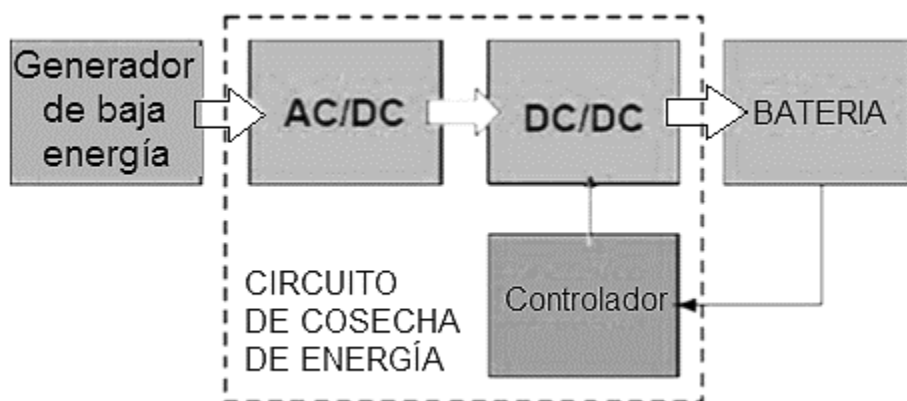


Figura 2.1 Diagrama de bloques de un circuito para cosecha energética [10]

2.5 Administración de poder y cualidades energéticas del sistema

Una característica a tomar en cuenta acerca del diseño de sistemas de cosecha es que la energía que consumirá la carga no puede exceder a la energía que se recibe del ambiente. De lo contrario, el dispositivo en el que se aplique funcionara interrumpidamente. Esta cualidad conocida como neutralidad energética también se presenta como un concepto teórico que permite balancear la potencia extraída y utilizada en el sistema.

Por otro lado, existen técnicas que permiten un mejor manejo de la energía acumulada. En [9] se presentan algunas estrategias tomando en cuenta determinados aspectos del equipo completo sobre el cual se quiere hacer un mejor uso energético.

Si se considera la optimización del sistema de cosecha, de todas estas técnicas el ciclo de trabajo o *duty cycling* es de uso y conocimiento común. Este es un esquema bajo el cual se administra el poder acumulado de una forma dinámica. Esta técnica se basa en intercalar los estados de encendido y apagado de circuitos que poseen estas modalidades.

Las otras técnicas aplicables sobre el sistema – Escalamiento dinámico de voltaje o *Dynamic Voltage Scaling (DVS)*, Escalamiento dinámico de frecuencia o *Dynamic Frequency Scaling (DFS)*, Escalamiento dinámico de voltaje y frecuencia o *Dynamic voltage and frequency scaling (DVFS)* y Seguimiento de máximo punto de poder o *maximun power point tracking* - son más avanzadas. *DVS*, *DFS* y *DVFS* permiten trabajar al sistema de manera proporcional de acuerdo a un parámetro correspondiente ya sea voltaje, frecuencia o ambas, y éstas a su vez dependen de la cantidad de energía disponible. Esto permite que durante intervalos en que haya poca energía, el sistema funcione a un nivel de consumo muy bajo. La técnica de seguimiento de máximo punto de poder necesita de un monitoreo constante de la energía entrante, para obtener un punto

de operación óptimo del sistema y una carga adaptable. [9] Además puede implementarse por medio de algoritmos en circuitos embebidos o usar etapas analógicas. [11]

2.6 Fuente de energía en el ambiente

De manera general, existen tres tipos de energía presentes en cualquier entorno: Cinética, térmica y luminosa. [12] Debido a la miniaturización de los dispositivos electrónicos e investigaciones se encuentran más clases de energía aplicables a estos sistemas: electroquímica y proveniente de campos magnéticos. [6] A continuación, se muestra las técnicas investigadas y utilizadas para la extracción energética de cada tipo.

- Energía cinética:
 - Utilizan el movimiento de un cuerpo o el fenómeno de vibración para generar energía eléctrica. Según el método que usa el transductor para conversión a electricidad, los cosechadores cinéticos se dividen en tres tipos: piezoeléctrico, electromagnético y electrostático.
 1. Los transductores electromagnéticos se basan en la variación de un campo magnético para la generación de una fuerza electromotriz alrededor de un circuito cerrado. Un ejemplo comercial que aplica este método es el modelo de reloj de pulsera *Seiko Kinetic* que puede recargarse usando el movimiento de la muñeca. Este posee un rotor cuyo movimiento induce una fuerza electromotriz en una bobina y la carga generada se almacena en una batería. La desventaja que presenta el uso de este transductor es la lubricación que necesitan sus partes rotatorias.
 2. Los transductores electrostáticos se basan en la composición de los condensadores, usando placas cargadas de manera que una fuerza externa cambia la posición de las placas, generando distintos valores

de voltaje por el movimiento de las cargas. Los sistemas basados en estos dispositivos son utilizados en sensores implantables o en aplicaciones de MEMS (microsistemas eléctrico-mecánicos) y trabajan a cualquier frecuencia de oscilación; sin embargo, generan poca energía.

3. El método sobre el cual más se experimenta es el que involucra transductores piezoeléctricos. No se requiere de precarga o lubricación, se genera un campo eléctrico según la fuerza deformadora que se aplique sobre el material. La desventaja que presenta es una frecuencia de oscilación resonante, ante la cual se obtiene la mayor amplitud posible de voltaje. Las ondas de oscilación no siempre se encuentran a una frecuencia constante y es poco probable que se encuentren al valor de la frecuencia de resonancia del elemento piezoeléctrico. Existen técnicas que permiten llegar a este valor, sin embargo, aumentan la complejidad en el diseño del sistema de cosecha.

- Energía térmica:
 - Los sistemas diseñados en base a la conversión de energía térmica utilizan el efecto Seebeck. Sobre este efecto una aplicación directa es la termocupla. El efecto termoeléctrico se cumple cuando existen gradientes de temperaturas entre dos puntos físicos. Este método toma relevancia en espacios donde la diferencia entre dos puntos distantes es alta, por ello se deduce que en ambientes donde las gradientes son aproximadamente cero, la técnica es ineficiente.

- Energía luminosa:
 - Su extracción se aplica en espacios abiertos y expuestos a la luz solar constante mayormente. La investigación para la mejora de estos sistemas se concentra en los materiales que componen los transductores. En áreas internas, la incidencia de la luz es diez veces menor que en las áreas abiertas, haciendo el sistema poco efectivo.
- Energía electroquímica:
 - Con un gran potencial en el área de biomedicina, un transductor es la celda de combustible. En ella se genera corriente a partir de la reacción de sustancias que permiten el flujo de electrones entre dos electrodos, ambos puestos en contacto con los reactantes. Se espera desarrollar celdas que utilicen fluidos orgánicos que eliminan la necesidad de reemplazar reactivos. Actualmente se experimenta con celdas de glucosa.
- Energía en campos magnéticos:
 - Los sistemas que integran técnicas que cosechan esta clase de energía son capaces de alimentar dispositivos de dimensiones regulares y no es prioridad tener en cuenta el principio de consumo ultrabajo de potencia. Los transductores reciben del ambiente campos magnéticos de baja frecuencia, los cuales les permiten accionar rotores magnéticos. La desventaja es el volumen del rotor, es muy grande para implantar, y la lubricación de sus partes mecánicas.

2.6.1 Energía biomecánica

La fuente de este tipo de energía es el cuerpo humano. [3] [4] Se basa en la idea de obtener una pequeña e imperceptible parte de la gran cantidad de energía que gasta el

cuerpo humano por día, $1.07 \cdot 10^7$ J, equivalente a ochocientas baterías doble A si se consideran con un valor de carga de 2500mAh. Esta cantidad de baterías pesa alrededor de 20 Kg, mientras que la masa de grasa corporal a partir de la cual se genera dicha cantidad de energía es 0.2 Kg. Además, la energía específica de los alimentos, de los cuales se deriva la energía humana, está entre 35 a 100 veces más que la energía específica de las baterías actuales.

Esta energía se libera de forma de calor (energía térmica) y movimiento (energía biomecánica). El reto de diseñar sistemas de cosecha que aprovechen esta fuente es evitar que afecten el funcionamiento cotidiano del cuerpo y elevar la cantidad de energía que una persona necesite para realizar sus acciones diarias.

Considerando que la eficiencia mecánica del cuerpo humano se encuentra entre 15 y 30%, siendo mayor la energía que se disipa como calor que movimiento, lo lógico es recolectar esta energía utilizando las técnicas correspondientes a la energía térmica; sin embargo, en caso óptimo la eficiencia del dispositivo es del 12%. Si se quisiera obtener la mayor cantidad de energía posible, es necesario dispositivos complejos que abarcan una gran cantidad superficie del cuerpo humano, lo que lo hace poco práctico.

Por otro lado, en cada movimiento del cuerpo, se debe tomar en cuenta que los músculos realizan dos tipos de trabajo mecánico, positivo y negativo. Trabajo positivo se realiza durante la contracción de los músculos, mientras que el negativo durante el estiramiento. Cuando se realiza trabajo positivo es que se genera movimiento y la energía positiva utilizada siempre incrementa el costo metabólico. El trabajo negativo busca detener los movimientos y eso se logra también con la disipación de energía en forma de calor. Idealmente los sistemas de cosecha deben enfocarse en reducir el trabajo negativo, lo que no incrementa el costo metabólico. El sistema muscular es complejo, en la longitud de cada músculo, un extremo se puede estar realizando trabajo negativo, mientras que en el

extremo opuesto, positivo. Por ello indirectamente puede verse afectado el movimiento natural del cuerpo.

Una serie de movimientos que se estudian para conocer si son útiles para la generación de energía involucran el golpe del talón, movimiento de centro de masa, balanceo de los brazos sobre el hombro y el codo y movimiento de piernas debido al tobillo, rodilla y cadera.

En base al análisis de energía producida por estos movimientos se desarrollaron los siguientes sistemas:

- Mochila de cosecha de energía (*energy harvesting backpack*) :
Utiliza el movimiento relativo entre el centro de masa del cuerpo humano y el suelo mientras se moviliza caminando. Se trata de una mochila con una masa que oscila verticalmente. Este movimiento lineal se transforma en movimiento rotativo que impulsa un generador. Usando una carga de 38 kg a una velocidad de 6.5 Km/h, se produce 7.4W.
Otro enfoque es utilizar materiales piezoeléctricos sobre tirantes de una mochila de 44kg y utilizar la tensión para obtener 50mW.
- Dispositivos usando golpe de talón:
Muchos sistemas se basan en este movimiento. Dos de los más estudiados incluyen materiales piezoeléctricos y polímeros electroactivos en la suela del calzado de manera que mediante la deformación de la misma por aplicación de la fuerza del talón se genera energía. Se producen 8.3 miliwatts y 2 watts respectivamente. Otros dispositivos utilizan generadores magnéticos.

- Dispositivos para la rodilla basado en trabajo negativo muscular:

Este dispositivo utiliza el movimiento de los segmentos de la pierna alrededor de la rodilla. En base a un mecanismo de engranajes, se transmite la energía negativa de la extensión de piernas hacia un motor DC sin escobillas que funciona como generador eléctrico. Por este método se genera 2.5 W por rodilla al caminar a una velocidad de 1.5 m/s. Pero al ser selectivo durante el ciclo de la marcha, no se obtiene toda la que se encuentra disponible. El desafío en esta tecnología es que a medida que se cosecha la energía, la resistencia al movimiento que genera el dispositivo crecerá, afectando inevitablemente el desplazamiento de la persona sujeta a pruebas.

2.7 Análisis morfológico en sistemas de cosecha de energía

El análisis morfológico es una herramienta útil dentro del proceso de diseño. Involucra analizar un problema para identificar una serie de parámetros y considerar soluciones alternativas para obtener los resultados deseados.

Como todo sistema de cosecha, la meta principal es convertir la mayor cantidad de energía útil. Según la teoría en el punto 2.6.1.1, para dispositivos basados en trabajo negativo muscular, esto se logra si se selecciona el funcionamiento del generador en los momentos del ciclo de marcha durante los cuales se aplica trabajo negativo sobre la rodilla. Ello también asegura que no se incremente el costo metabólico, objetivo importante al cosechar energía biomecánica.

En [13] se muestra el diseño de un sistema de cosecha energética usando fuentes vibratorias tomando en cuenta este análisis, incluyendo parámetros estandarizados. Considerando que se trata de energía cinética, es decir relacionado al movimiento, se

presentan ítems que tendrían en común con un sistema de cosecha de energía biomecánica, según lo indicado en el punto 2.4:

- Convertidor AC-DC
- Convertidor DC-DC
- Medio de almacenamiento
 - Convertidor AC-DC [14]: Rectificadores de onda completa, de media onda y dobladores de voltaje son algunos de las configuraciones más usadas. Es de uso común el rectificador de onda completa debido a la sencillez de su estructura y efectividad. Debido a la naturaleza de la energía recolectada, debe escogerse diodos que se activen a bajo voltaje y corriente de fuga pequeña. Existe además rectificadores síncronos, que se logran usando los diodos inherentes a los transistores MOSFET en vez de diodos Schottky, aumentando su eficiencia y reduce pérdidas. [13] La figura muestra los tres circuitos correspondientes al rectificador de media onda, de onda completa y el doblador de voltaje en orden descendente.

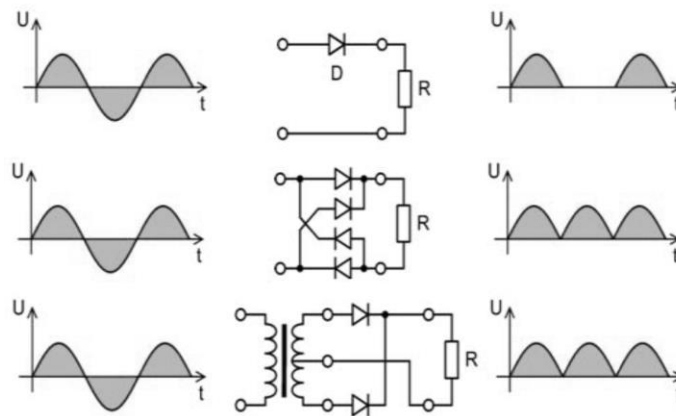


Figura 2.2 Circuitos rectificadores AC – DC

- Convertidor DC-DC [14]: Existen varias topologías de convertidores DC-DC, los tres más conocidos y aplicables son *buck*, *boost* y *buck-boost*, conocidos como reductor y elevador en los dos primeros casos como muestra la figura 3 respectivamente. El convertidor elevador es el más adecuado a utilizar en sistemas de cosecha, debido a su alta eficiencia y a que aumenta el valor del voltaje ingresante. Hacen uso de una señal conmutadora y un inductor como elemento almacenador de energía, que dentro del modo de conmutación continua, eleva o reduce el valor de voltaje entrante. También se trabaja a modo de conmutación discontinua a muy altas frecuencias; sin embargo, no se comporta según las relaciones matemáticas indicadas en la figura 3 según la topología correspondiente.

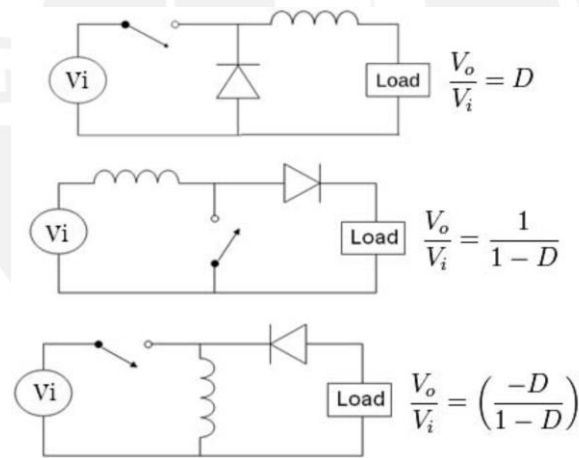


Figura 2.3 Circuitos de convertidor DC – DC

- Almacenamiento de energía: Se usan dos elementos, super-capacitores y baterías recargables. Los supercondensadores no se diferencian en funcionamiento a un condensador común, excepto por la mayor densidad de energía que pueden retener y liberar según la aplicación sin necesidad de ser voluminoso. Las baterías por otro lado son conjuntos de celdas

electroquímicas. Algunas combinaciones químicas que se manejan son el litio-ion, polímero litio-ion, níquel-cadmio, híbrido níquel-metal, etc. cuyas baterías trabajan a 3.6, 3.7, y 1.2 V respectivamente. A comparación de los supercapacitores, tienen mayor disponibilidad de almacenamiento de energía por unidad de peso y una respuesta de descarga lenta. [13]

2.8 Síntesis sobre el asunto de estudio

La cosecha de energía o *energy harvesting* es un amplio campo de investigación y desarrollo actual que considera nuevos parámetros para el diseño de sistemas electrónicos. Se basa en la necesidad de nuevos equipos que trabajen a un consumo muy bajo de energía y que puedan ser alimentados utilizando fuentes existentes en el ambiente en el que se encuentren.

Los sistemas que utilicen estas técnicas apuntan a una mayor independencia de una conexión a la línea eléctrica y por sus reducidas dimensiones, serían capaces de ubicarse en lugares remotos o difíciles de movilizarse, además de funcionar por largos periodos de tiempo.

Las topologías más utilizadas, tomando en cuenta la relación entre el sistema de cosecha energética y la batería son:

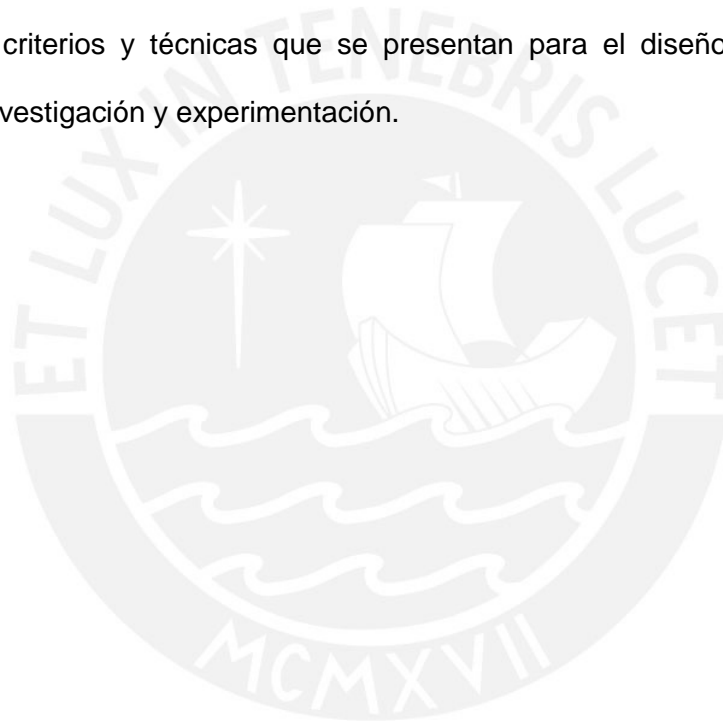
- Sistema de recolección complementado con batería
- Sistema de recolección autónoma
- Sistema de recolección híbrido autónomo, siendo esta utilizada con mayor frecuencia.

Además los tres bloques principales que conforman este todo sistema son fuente de cosecha, subsistema de cosecha y carga. Es la carga el dispositivo al cual se le quiere dar un mayor tiempo de funcionamiento.

Cada sistema es diseñado en base a la fuente de energía que se elija para su extracción. Se cuenta con distintos tipos de energía presente en el ambiente: cinética, luminosa, térmica, electroquímica, electromagnética, etc.

Una vez escogida la energía a convertir y un transductor correspondiente, se escogen las tecnologías pertinentes para lograr extraer la mayor cantidad de energía de la fuente. Para el asunto de estudio se escoge el diseño de un sistema implantable de cosecha energética basado en un generador electromagnético.

Finalmente, los criterios y técnicas que se presentan para el diseño del sistema son producto de la investigación y experimentación.



CAPÍTULO 3

ELABORACIÓN DE UN SISTEMA DE COSECHA DE ENERGÍA UTILIZANDO UN TRANSDUCTOR ELECTROMAGNÉTICO COMO PROPUESTA DE FUENTE DE ALIMENTACIÓN

3.1 Diagrama de bloques del sistema

Se toma en consideración la información presentada en el punto 2.3 y 2.4 para proponer el siguiente diseño de sistema de cosecha de energía.

Se decide que el sistema sea de topología híbrido – autónoma, porque trabajar con ella indica que se encuentra una mayor gama de tecnología comercial y disponible a diferencia de las otras topologías. Además, es adecuado para alcanzar el objetivo principal.

Se presenta el diagrama de bloques del sistema que se pretende elaborar en la figura 3.1 y que a continuación se describirá.

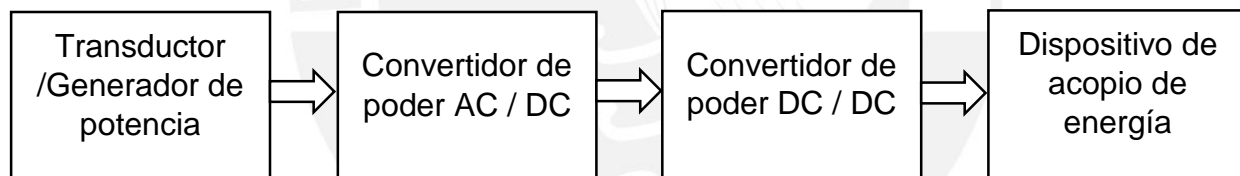


Figura 3.1 Diagrama de bloques del sistema de cosecha de energía

3.1.1 Generador de potencia

Este elemento será el transductor principal y único del sistema. Se necesita una conversión de energía mecánica a eléctrica. Debido a la información revisada sobre las diversas técnicas de recolección de energía biomecánica, razón del proyecto a realizar, y por su disponibilidad en el mercado, se elige utilizar un motor de corriente continua que tendrá la función de generador. Este se acopla a un sistema mecánico que permita la

transmisión del esfuerzo mecánico humano hasta el eje del dispositivo y con ello permita el giro del rotor y posterior producción de electricidad.

Dentro de los motores disponibles en el mercado de bajo costo, además de ser útiles por sus dimensiones y valores conocidos de voltaje de salida, se escoge uno de corriente continua con escobillas marca Mabuchi usado ampliamente en reproductores de DVD. Considerando que el tamaño debe ser lo más reducido posible, se decide utilizar un dispositivo de la serie RF356CA10250, cuya hoja de datos se encuentra disponible en la página web de la empresa. [15] A continuación, se muestra en la figura 3.2 la estructura del motor.

El motor cuenta con las siguientes características, mostrado de izquierda a derecha:

- Carcaza: del tipo redondo (round), 25 mm. diámetro, 8 mm. de grosor
- Magneto: imán de goma (rubber magnet)
- Rotor: con eje, seis polos, 0.10 mm. diámetro de bobinado, 250 vueltas por bobina
- Escobillas: de metal precioso
- Engranaje de acople de 5mm. de diámetro
- Además de ser liviano, con un peso de 13 gramos

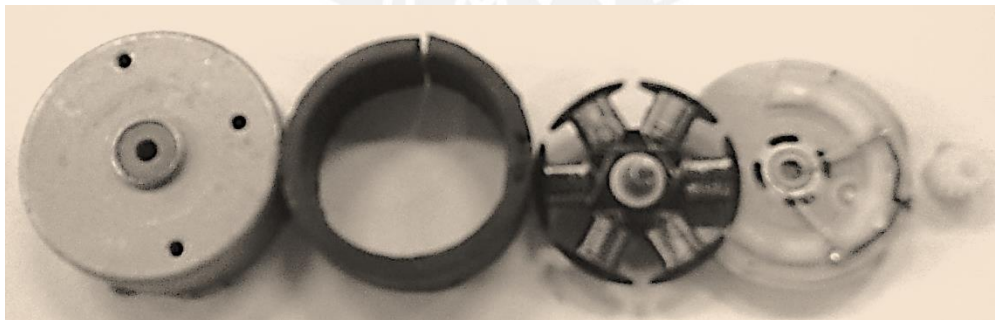


Figura 3.2 Estructura del motor de corriente continua

En la figura 3.3, se muestra un sistema mecánico comercial correspondiente a una linterna de cuerda o *wind-up flashlight* que permite el giro del eje del motor acoplado aplicando esfuerzo humano. Este se compone de una manivela, un engranaje plástico de 4 cm. de diámetro y un eje metálico de 2.2 cm. alrededor del cual gira. La energía biomecánica proviene del agarre de la mano de un usuario sobre la manivela y lograr su movimiento.

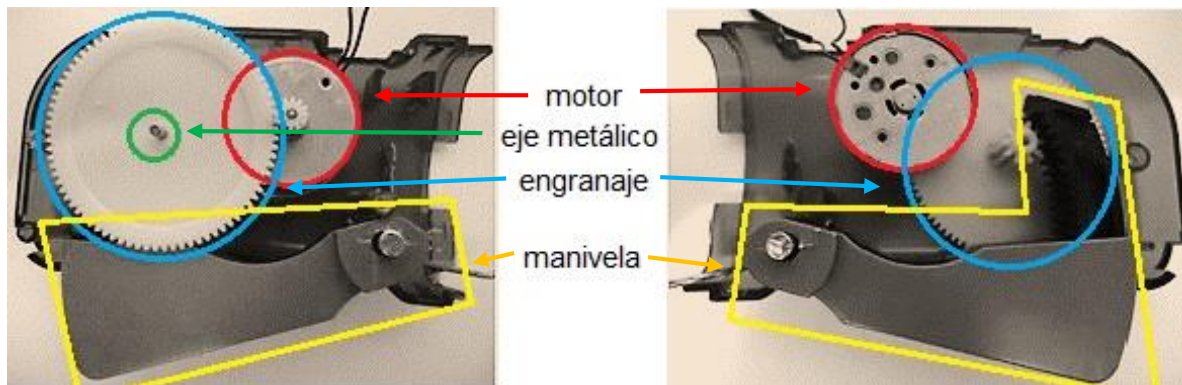


Figura 3.3 Sistema mecánico comercial acoplado al motor

Una vez acoplados, se obtiene la señal de voltaje del transductor, mostrado en la figura 3.4, considerando que es proporcional a la velocidad angular a la que gira el eje debido al trabajo transmitido desde el manubrio. El valor de la señal va de 0 voltios a 2.5 voltios dependiendo el giro del eje.

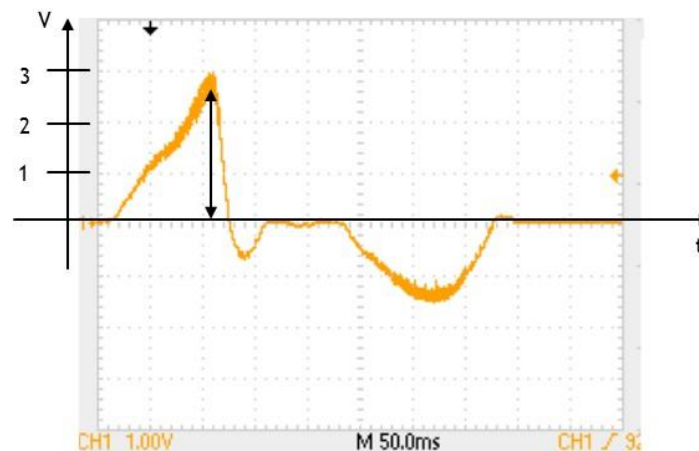


Figura 3.4 Forma de la señal de salida del motor

3.1.2 Dispositivo de acopio de energía

Este será el elemento que almacenará la energía convertida. Dentro de la gama de dispositivos accesibles, se escoge una batería de Litio – ion (Li – ion). Estas baterías son usadas con mucha frecuencia en teléfonos celulares. Además de ser recargables, el voltaje nominal que maneja (3.7 V) es útil para la alimentación de diversos dispositivos, y por ello es considerable durante su diseño como su fuente de energía.

El dispositivo de cosecha de energía debe tener en cuenta los valores de voltaje bajo los que se recarga una batería de litio – ion, y con ello el proceso que implica, incluyendo las temperaturas a las que se somete y sus límites físicos. [16]

Las baterías Li – ion no pueden sobrecargarse y su límite de carga no debe pasar los 4.2V, de lo contrario su tiempo de vida se reduce. Lo mejor es evitar que se llegue a este límite y se cargue hasta un valor tope menor, reduce su tiempo de funcionamiento, pero al ser recargado de manera controlada se ve compensado. El voltaje de tope de carga se considera para este trabajo alrededor de 4 voltios.

Por otro lado, una batería de este tipo tampoco puede descargarse por debajo de un valor (general para estas baterías) de 2.7 V, de ser así la batería ya no puede volver a cargarse por un circuito de recarga. Se considerará un valor umbral de descarga de 2.9 voltios en el presente trabajo.

Seguidamente, se muestra una imagen de la batería utilizada para el presente trabajo.



Figura 3.5 Batería litio – ion

3.1.3 Convertidor de poder de corriente alterna a corriente continua (AC / DC)

A partir de la información obtenida, se decide en primera instancia utilizar un circuito rectificador, por su eficiencia y debido a que los componentes necesarios para hacer ensayos y una posterior implementación ocupan poco espacio, según la tecnología disponible.

Se ensaya con rectificador de media onda y de onda completa conformado por arreglos de diodos schottky, debido a la menor pérdida de energía que pueda haber a comparación de otros cuya tensión umbral es más alta.

Debido a que la señal de salida del motor posee valores positivos y negativos, y a razón de aprovechar la mayor cantidad de energía posible, se opta por emplear un rectificador de onda completa.

Se utiliza, para este bloque, el siguiente diagrama esquemático mostrado en la figura 3.6.

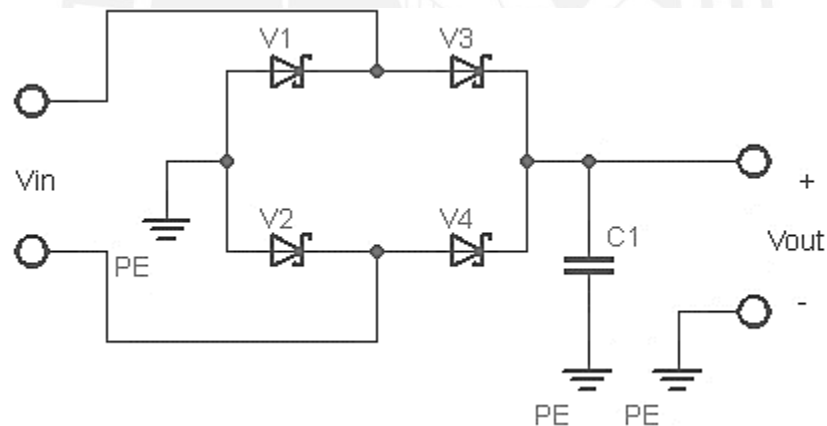


Figura 3.6 Diagrama esquemático de convertidor de corriente alterna a corriente continua

Donde V_{in} es la señal de voltaje entrante, V_{out} la señal de salida de la etapa y $C1$ es un capacitor cuyo valor de capacitancia será variable en favor de los ensayos a realizar.

Se elaboran dos convertidores, ambos empleando elementos discretos. A continuación, se presenta en la figura 3.7 uno de ellos a base del diodo IN5819 (rectificador versión A),

disponible en el mercado nacional, el otro convertidor se realiza en base al diodo RB161M (rectificador versión B), que será parte de un modelo mejorado del sistema.

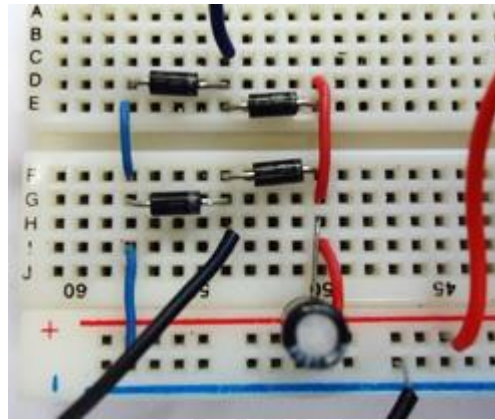


Figura 3.7 Rectificador de onda completa usando diodos Schottky (versión A)

3.1.4 Convertidor de poder DC / DC

Para esta etapa, se considera que al pretender cargar una batería, los valores de voltaje de carga deben ser superiores al valor nominal del voltaje de dicho elemento (3.7 V), siendo estos entregados a la salida del convertidor, y por otro lado, la señal de voltaje ingresante al circuito del convertidor tiene un rango de valores bajos. Por ello, se escoge entre las topologías existentes ensayar con un convertidor elevador o *boost*.

Se tendrá dos convertidores del mismo tipo. Se describirá su diseño a continuación.

3.1.4.1 Diseño del convertidor elevador versión A

El diseño del circuito inicia a partir del diagrama esquemático mostrado en la figura 3.8.

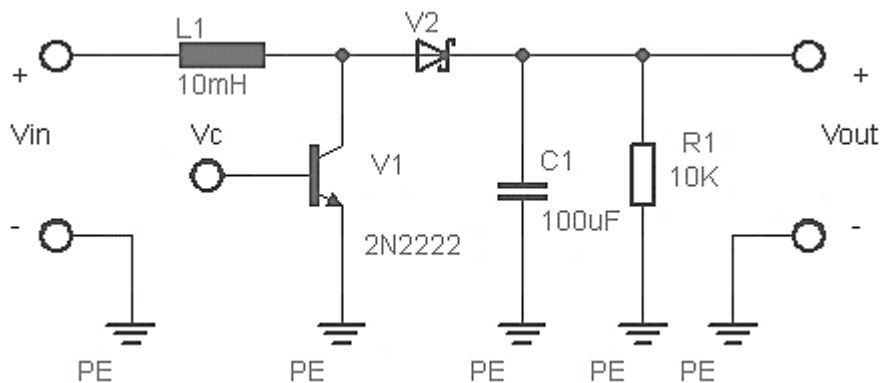


Figura 3.8 Diagrama esquemático de convertidor elevador (versión A)

El factor por el cual se multiplica el valor de voltaje de entrada se calcula utilizando los valores requeridos según la ecuación 3.1, si se considera el diseño en modo de conducción continua (CCM). [14]

$$V_{out} = \frac{V_{in}}{(1-D)} \dots \text{(Ecuación 3.1)}$$

Donde D es el valor de ciclo de trabajo de la señal conmutadora V_c que ingresa a la base del transistor discreto V1, N2222, modelo comercial disponible.

Puede calcularse el valor de D directamente si se tienen los valores de voltaje de entrada y salida, o puede hacerse ensayos a raíz de un valor de D fijo. Se escoge esta opción ya que se cuenta con un rango de valores variables para V_{in} . Es posible utilizar un factor de 2 si consideramos la señal del motor.

Utilizando la Ecuación 3.1, tenemos que el valor de D debe ser 0.5, es decir, puede usarse una señal V_c cuadrada con ciclos de trabajo alrededor de 0.5 o 50%.

Se considera una carga de valor en resistencia, R_1 , de 10Kohm, es un valor arbitrario y comercial, no está sujeta a cálculos y es útil para ensayos.

Tomando en cuenta los valores de la carga y el ciclo de trabajo, se utiliza la ecuación 3.2 para calcular los valores límites de otros dos parámetros necesarios en el diseño del convertidor, el valor de la inductancia L_1 y la frecuencia de la señal V_c .

$$(L * f)_{min} = D(1 - D)^2 * R \dots \text{(Ecuación 3.2)}$$

Si consideramos un valor de inductancia de 10mH, se podrá asignar un valor de frecuencia mínimo de 62.5KHz. Este valor permitirá pasar entre el modo de conducción continua y el modo de conducción discontinua si la frecuencia de conmutación es mayor o menor a dicho valor límite respectivamente.

El condensador C_1 que debe colocarse en paralelo con la carga, será el elemento que almacena la energía y estabilizará la señal de salida del circuito.

El valor del condensador afectará al rizado de salida de la señal, según la ecuación 3.3

$$\Delta V_{out} = \frac{V_{out} * D}{R * C * f} \dots \text{(Ecuación 3.3)}$$

De manera que un valor alto de C1, reducirá el rizado. Se escoge un valor de 100uF con posibilidad a aumentarlo, aunque eso pueda afectar negativamente, porque aumenta el tiempo de carga del circuito RC presente.

Finalmente, el diodo V2 utilizado es un diodo Schottky, debido a que se necesita baja pérdida de energía por conducción. En la figura 3.9, se observa el convertidor realizado.

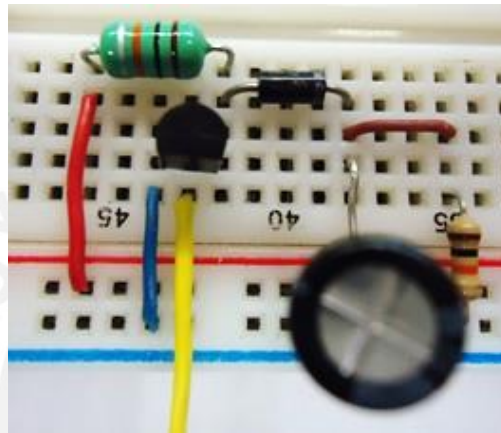


Figura 3.9 Convertidor elevador en base a elementos discretos (versión A)

3.1.4.2 Diseño del convertidor elevador versión B

Esta versión del convertidor tendrá elementos comerciales más avanzados, circuitos integrados que desarrollan diversas empresas específicamente para aplicaciones de cosecha de energía. En base a requerimientos del sistema y criterios del diseño acorde con este trabajo, se enlista una cantidad de chips de convertidor elevador. A continuación, se muestra la tabla 3.1 en la que se realiza una comparación entre las tecnologías encontradas.

Circuito Integrado	Vendedor	Voltaje de inicio (V)	Administración de poder avanzada incluida ?	Administrador de carga incluida?	Elemento de carga	Empaque	Dimensiones físicas
LTC3105	Linear Tech.	0.225	sí	sí	batería Li-ion o NiMH, supercapacitor	DFN, MSOP	3mm x 3mm x 0.75mm
LTC3535	Linear Tech.	0.7	no	no	capacitor	DFN	3mm x 3mm x 0.75mm
BQ25540	Texas Inst.	0.33	sí	sí	batería Li-ion o de película delgada , supercapacitor , capacitor	QFN	3mm x 3mm x 0.35mm
CBC915	Cymbet Corp.	2.4	sí	sí	batería de película delgada	TSSOP	12.5mm x 8.2mm x 1.2mm
TS3300	Touchstone S.	0.6	no	sí	capacitor	TQFN	3mm x 3mm x 0.75mm

Tabla 3.1 Modelos de convertidor elevador en circuitos integrados

Debido a su compatibilidad con distintos elementos de almacén, dimensiones físicas, posibilidad de la aplicación de estrategias de administración de poder y un monitor de voltaje de salida programable, útil si se usa una batería litio - ion, se escoge el chip de Texas Instrument BQ25540.

El diagrama esquemático bajo el que se trabaja sigue las recomendaciones e indicaciones de la hoja de datos del integrado, disponible en línea [17]. Se muestra en la figura 3.10, donde V_{in} es la señal de salida de la etapa de convertidor de corriente alterna a corriente continua.

Elementos como L1, C1, C3 y C4 tienen valores recomendados por el fabricante en la hoja de datos: 22uH, 4.7uF, 0.1uF y 4.7uF correspondientemente.

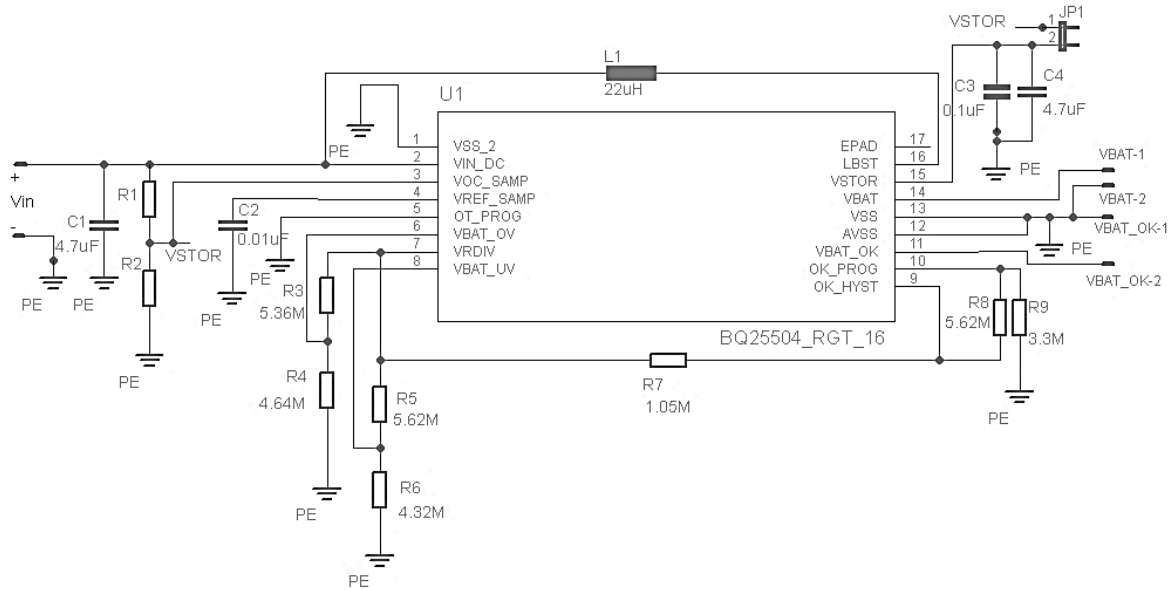


Figura 3.10 Diagrama esquemático de convertidor elevador (versión B)

En el circuito integrado, la función de la inductancia L1 es de almacenamiento energético para elevar el voltaje. El condensador C1 almacena la energía antes de que ingrese al convertidor. C3 es un condensador que evita el ruido debido a la conmutación y C4 sirve para almacenar la energía a la salida del convertidor que luego será transmitida a la batería.

Existen dos conectores de salida para las señales VBAT y VBAT_OK. VBAT es la señal con su respectiva referencia que se conectarán al elemento de destino final de energía, la batería. Mientras que VBAT_OK es una señal con su respectiva referencia que indica, mediante una señal en alta o en baja, si el voltaje en el que se encuentra la batería es el adecuado según el sistema de monitoreo del chip, es decir que no se encuentra sobrecargada o muy descargada.

La función de las resistencias R(3-9) es crear valores umbrales de voltaje, que sirven para administrar y controlar el funcionamiento de recarga en el chip. Se sigue las ecuaciones de diseño descritos en la hoja de datos, tomando en cuenta los valores de voltaje

apropiados para la sobrecarga y la descarga de una batería litio – ion. Se escoge un valor de voltaje de sobretensión de 4.05V, de voltaje de baja tensión de 2.9V y un valor de voltaje de 3.4V que permita al chip indicar que la batería se encuentra en buen estado. Además un voltaje de histéresis necesario de 3.8 V.

Para hallar los valores de las resistencias R3 y R4, se siguen las ecuaciones 3.4 y 3.5, donde VBIAS es un valor de voltaje referencial de 1.25 V.

$$R3 + R4 = 10 * 10^6 \dots \text{(Ecuación 3.4)}$$

$$4.05 = 1.5 * VBIAS * \left(1 + \frac{R3}{R4}\right) \dots \text{(Ecuación 3.5)}$$

Se obtienen los valores para R3 y R4, 5.36M y 4.64M respectivamente.

Para hallar los valores de las resistencias R5 y R6, se emplean las ecuaciones 3.6 y 3.7.

$$R5 + R6 = 10 * 10^6 \dots \text{(Ecuación 3.6)}$$

$$2.9 = VBIAS * \left(1 + \frac{R5}{56}\right) \dots \text{(Ecuación 3.7)}$$

Se obtienen los valores de resistencia para R5 y 56, 5.62M y 4.32M respectivamente.

Para hallar los valores de las resistencias R7, R8 y R9, se usan las ecuaciones 3.8, 3.9 y 3.10.

$$R7 + R8 + R9 = 10 * 10^6 \dots \text{(Ecuación 3.8)}$$

$$3.4 = VBIAS * \left(1 + \frac{R8}{R9}\right) \dots \text{(Ecuación 3.9)}$$

$$3.8 = VBIAS * \left(1 + \frac{R7+R8}{R9}\right) \dots \text{(Ecuación 3.10)}$$

Se obtienen los valores para R7, R8 y R9, 1.05M, 5.62M y 3.3M respectivamente. Todas las resistencias halladas son valores comerciales.

Los valores de las resistencias R1, R2 y el condensador C2, son parte de una configuración para programar y habilitar el muestreo para obtener la máxima transferencia de energía mediante el controlador del bloque de seguidor de máximo punto de poder (MPPT) implementado en el circuito integrado.

Así, usando las recomendaciones de la hoja de datos, se tienen dos configuraciones posibles para el convertidor. Si desea usarse el controlador antes mencionado, el valor de C2 será 0.01uF. Los valores para R1 y R2 deben mantenerse según las ecuaciones 3.11 y 3.12.

$$R1 + R2 = 20 * 10^6 \dots(\text{Ecuación 3.11})$$

$$X = \frac{R2}{R1+R2} \dots(\text{Ecuación 3.12})$$

Donde X es un factor que permitirá obtener un voltaje de referencia a partir de la señal de voltaje de entrada en circuito abierto al desconectarse internamente la entrada del convertidor. El chip, utilizará la conversión de manera que el voltaje ingresante se eleve a un valor aproximado a este voltaje de referencia. Esto se realiza a manera de sondeo cada 16s. En algunos transductores el valor de este factor es conocido. De manera experimental podemos tentar un factor entre 0.3 y 0.8; sin embargo, no es primordial en este trabajo, ya que el propósito es la recarga de la batería independientemente de la técnica que se use, en tanto sea eficiente. Por otro lado, si no se quiere habilitar este controlador se utiliza la conexión del jumper JP1 que une los pines 3 y 15, sin conectar las resistencias R1 y R2, además se reemplaza el condensador C1 por una conexión directa a tierra.

La protección por el factor de temperatura es importante para evitar dañar la batería. Para esto, el chip tiene dos formas de programación utilizando el pin 5 (OT_PROG). Si el pin se conecta a tierra, el valor umbral de temperatura para el circuito será de 65°C, si se conectara al pin 15 (VSTOR), se considera un valor de 120°C. Por motivos de prolongación de vida de la batería y el convertidor se escoge utilizar el umbral de bajo valor.

3. 2 Elaboración de primera versión del sistema de cosecha energética

A partir del diagrama de bloques expuesto en el punto 3.1, se procede a los ensayos en los circuitos físicos que representen cada etapa del sistema.

Una primera versión del sistema de cosecha recoge las estructuras básicas de cada bloque. Se utilizará el motor de corriente continua descrito en el punto 3.1.1, además de la versión A de los bloques rectificador de onda completa y convertidor elevador. No se utilizará una batería, la carga será representada por el par condensador y resistencia en el convertidor elevador.

En la figura 3.11 se presenta el diagrama esquemático bajo el que se elaboró esta versión del sistema.

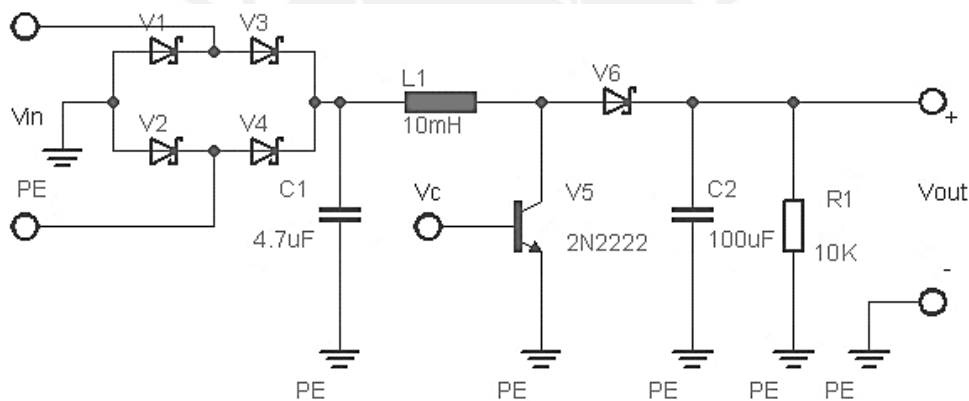


Figura 3.11 Diagrama esquemático de primera versión del sistema de cosecha de energía

Como se menciona en la sección anterior, se realiza utilizando componentes discretos de tecnología de agujero pasante o *through hole* disponibles en el mercado nacional. Se muestra en la figura 3.12 una imagen del sistema elaborado.

Por ser una versión experimental y con motivo de aplicar la teoría correspondiente a cada bloque, no se le dio prioridad a los materiales o capacidad de disipación de energía.

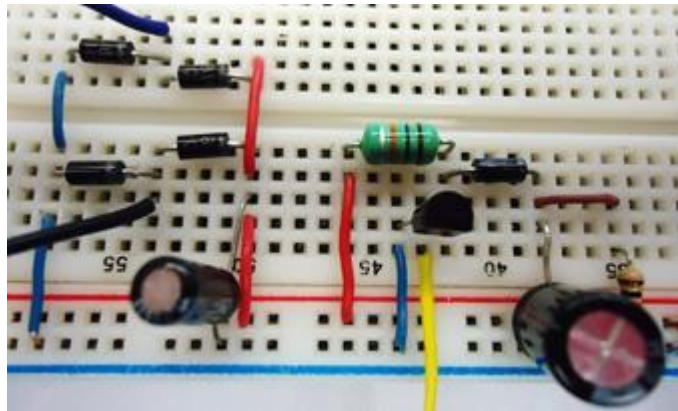


Figura 3.12 Primera versión física del sistema de cosecha energética

3.3 Elaboración de la segunda versión del sistema de cosecha de energía

Esta versión del sistema será el prototipo producto del trabajo de tesis propuesto.

De la misma forma que en la primera versión, se sigue el diagrama de bloques descrito en el punto 3.1. Se utiliza el transductor indicado en el punto 3.1.1, la versión B del rectificador de onda completa y del convertidor elevador. Finalmente, se conectará a la batería litio – ion explicado en 3.1.2.

Las etapas de los convertidores se unificarán en una tarjeta impresa de dimensiones reducidas. Así se muestra el siguiente diagrama esquemático en la figura 3.13.

Del esquemático se desprenden las señales de entrada fuente, que es la conexión física con el transductor, y las señales de salida VBAT y VBAT_OK, explicadas en el punto 3.1.3.2. Para estas señales se usarán como elementos de enlace conectores molex de 2 pines.

Al priorizar el tamaño físico del sistema, se necesita optimizar el espacio que ocuparan los componentes en la tarjeta impresa. Por eso se decide utilizar una combinación de montaje superficial y de agujero pasante, además la tarjeta será de dos capas.

Por ser de dimensiones reducidas, se decide que los componentes pasivos sean de tecnología 0805, en tanto los valores calculados o requeridos se encuentren disponibles

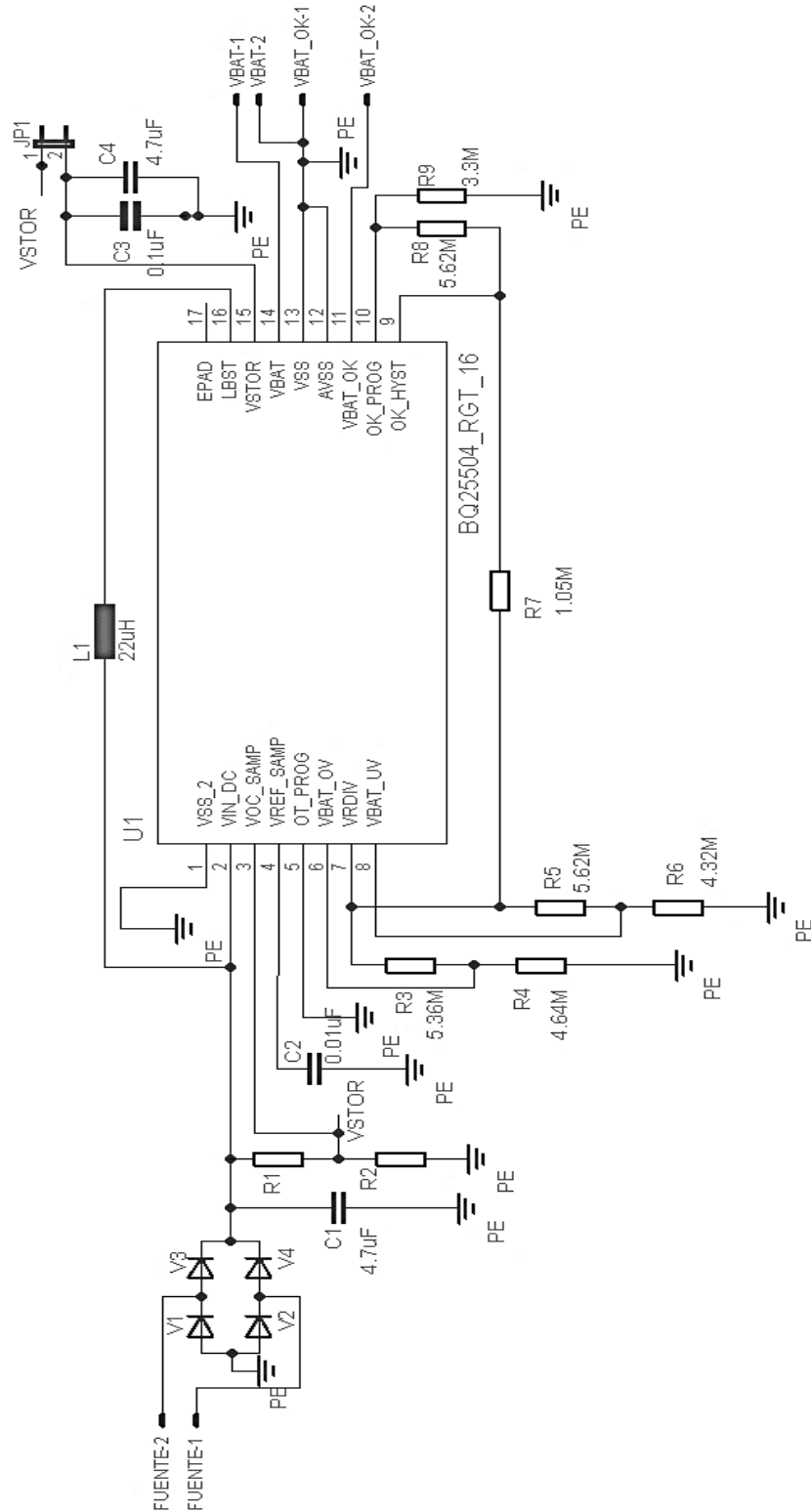


Figura 3.13 Rectificador de onda completa y convertidor elevador

en el mercado. El buscador y proveedor de componentes Digikey, permitió encontrar todos los valores de resistencia, inductancia y algunos condensadores con esta tecnología. En el caso de las resistencias, se encuentran con capacidades de disipación de potencia de 1/8 y 1/4 Watts.

Para los condensadores, se decide utilizar de material cerámico y las tecnologías disponibles se encontraron en empaque 0805, 0508 y 1206.

Finalmente para los diodos schottky RB161M, se tiene en empaque SOD-123. Este modelo de diodo posee una capacidad de manejo de corriente de 1A, soporta un voltaje inverso de 20V. Otros datos se encuentran disponibles en su hoja de datos en línea [18].

Siguiendo estas pautas, el circuito impreso diseñado en el programa EAGLE versión 6.3 resulta de dimensiones de 2.6 cm de largo por 2.1 cm de ancho. A continuación en las Figuras 3.14 y 3.15, se mostrarán la máscara de componentes y pistas de ambas superficies.

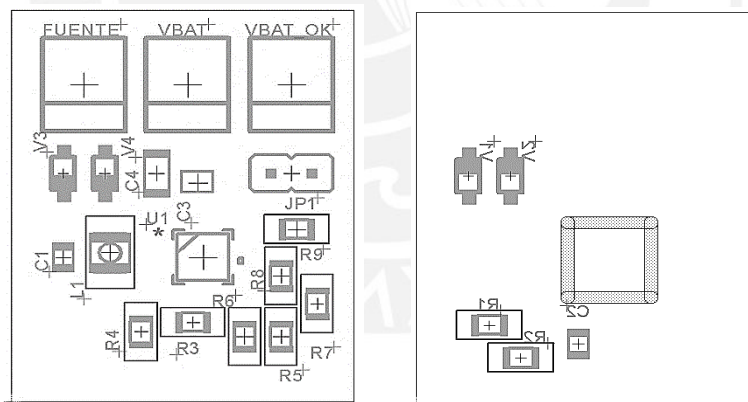


Figura 3.14 Máscara de componentes

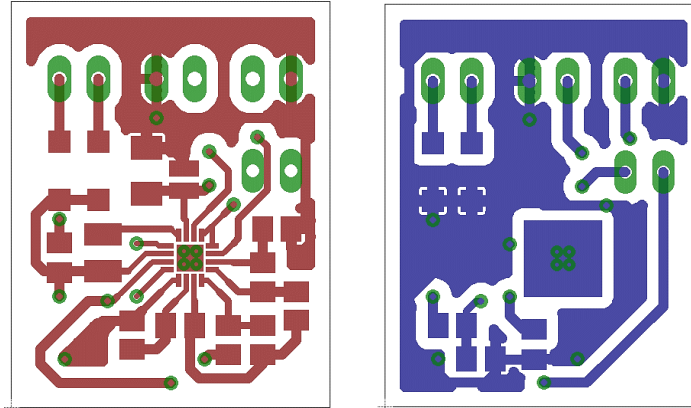


Figura 3.15 Máscara de pistas y pads

En la figura 3.16, se muestra la tarjeta elaborada con los componentes elegidos y el circuito impreso diseñado.

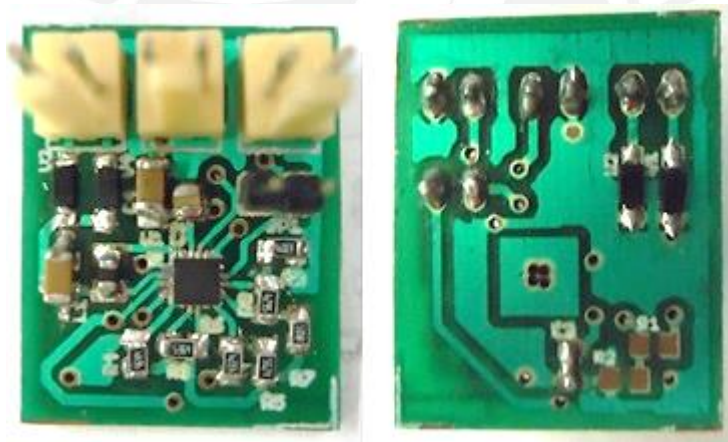


Figura 3.16 Rectificador y conversor elevador

3.4 Ensayos en la primera versión del sistema de cosecha energética

Seguidamente, se muestran los ensayos realizados sobre el sistema de cosecha en su primera versión descrito en el punto 3.2. Se utiliza un osciloscopio para comprobar y observar las señales requeridas para cada etapa y ensayo según se describirá a continuación.

3.4.1 Etapa de rectificación

Se toma en cuenta el diagrama esquemático en la figura 3.6, donde V_{in} será la señal de voltaje del transductor. Se considera que el capacitor $C1$ será el elemento que almacene temporalmente la energía generada, por ello se experimenta usando valores de $100\mu F$ y $4.7\mu F$, este último acorde a las recomendaciones de diseño para la etapa de conversor elevador versión B. El bloque conversor elevador en general que sigue al bloque rectificador acepta una entrada variable en tanto los valores de voltaje sean positivos, por ello en esta etapa se prioriza el uso del puente de diodos y no otros componentes como condensadores y diodos zener, que pudieran ocupar espacio innecesario en el circuito impreso. A continuación, se muestra en la figura 3.17 la señal de salida de esta etapa aplicada a una carga de $1K\Omega$ paralela al capacitor $C1$ (V_{out}), con un valor pico alrededor de $2.6V$.

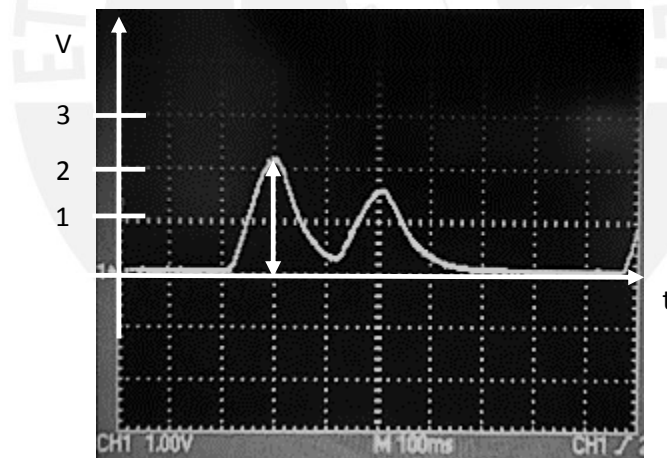


Figura 3.17 Señal de salida de rectificador

3.4.2 Etapa de conversor elevador

Para comprender esta etapa y observando que el conversor elevador en los circuitos integrados enlistados en la tabla 3.1 no necesariamente funcionan en modo de conducción continua, se decide experimentar en ambos modos sobre esta etapa

utilizando una fuente de alimentación más estable que la obtenida a la salida del rectificador, una pila de valor nominal de 1.5 V.

Se considera el diagrama esquemático en la figura 3.8, donde la señal Vc proviene de un módulo digital con una señal cuadrada con un ciclo de trabajo alrededor del 60% y dos valores de frecuencia, 1Khz y 100 Khz. Por lo calculado en el punto 3.1.3.1, estas señales permitirán el funcionamiento en modo discontinuo (DCM) y continuo (CCM) respectivamente. La señal Vin será el voltaje constante de la pila antes descrita. A continuación, se muestran los valores obtenidos en el modo continuo y discontinuo en la figura 3.18.

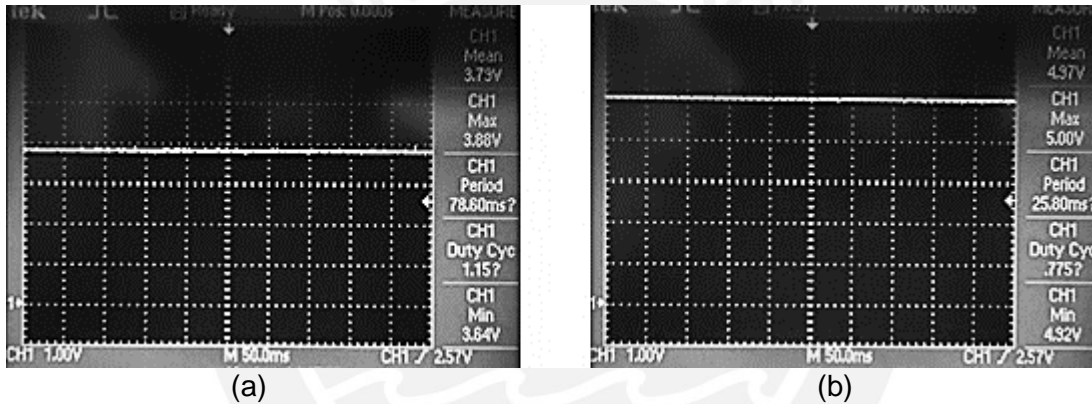


Figura 3.18. Voltaje de salida del convertidor en modo de conducción (a) continua, (b) discontinua

En modo CCM, se puede calcular el valor aproximado en la salida a partir de la ecuación 3.1. Con un valor Vin igual a 1.4 V, D igual a 0.6, se obtiene un valor de 3.5V. En la figura 3.18 (a) se observa un valor aproximado a lo esperado. En tanto, en modo DCM el valor de salida se calcula utilizando la ecuación 3.13.

$$V_o = V_{in} * \frac{1}{2} * \left(1 + \left(1 + \frac{2 * D^2 * R}{L * f_c} \right)^{\frac{1}{2}} \right) \dots \text{(Ecuación 3.13)}$$

Por los valores de R y L dados por el circuito diseñado, D y fc por la señal cuadrada obtenido por el módulo digital y el valor de voltaje de la pila, teóricamente debe obtenerse un valor de 19.5V a la salida del circuito; sin embargo, lo que se puede observar es que el

valor de voltaje es más alto que en el modo CCM, pero no se acerca al valor esperado. Esta diferencia entre el valor esperado y el real es descrito en la bibliografía como una inestabilidad propia del circuito [19]. Para compensar este efecto es necesario la regulación de carga de batería. Esta capacidad se encuentra incluida en el chip BQ25540.

3.4.3 Ensayos en el sistema generador de potencia-rectificador-conversor

Utilizando los bloques mencionados anteriormente se realiza ensayos considerando las recomendaciones para el diseño del circuito involucrando el chip de convertidor elevador.

Se sigue el diagrama esquemático de la figura 3.11, donde V_{in} es la señal del transductor, V_c es una señal cuadrada que proviene del módulo digital explicado en el punto anterior, con valores de ciclo de trabajo entre 50 y 60% o 0.5 y 0.6.

En la figura 3.19, se muestran las señales observadas en los condensadores C1 y C2, en color azul y amarillo respectivamente, donde el convertidor elevador se encuentra en modo CCM y el sistema se encuentra conectado y desconectado a una carga (R1).

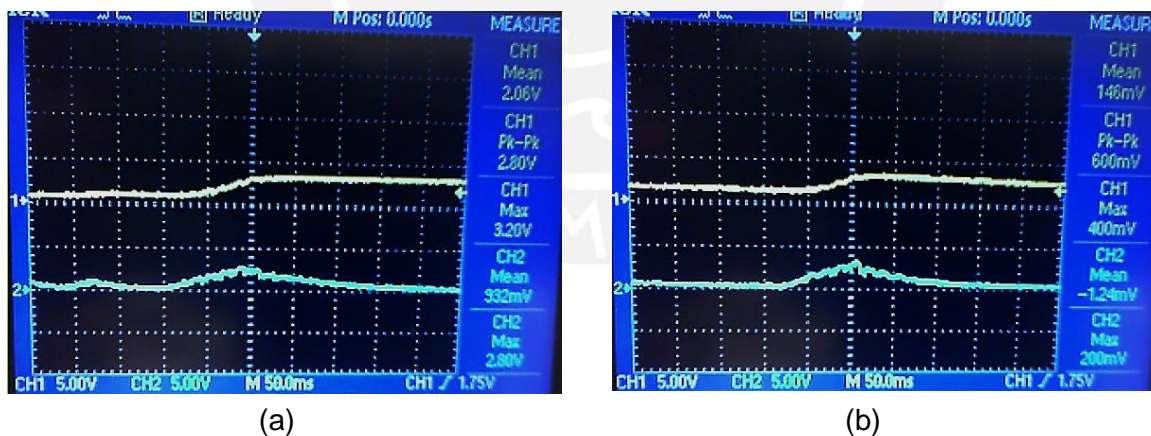


Figura 3.19 Señales eléctricas en condensadores C1 y C2 desconectado (a) y conectado (b) a resistencia R1

En (a), se observa cómo se carga el condensador C2 a partir de la señal en C1 y al no tener carga intenta mantener un voltaje, además de la elevación en sus valores pico de

2.8 a 3.2V. En (b), la diferencia es la conexión de una carga que provoca que la energía en el condensador se desplace a la resistencia, y por tanto la curva en C2 decae.

A continuación, se muestra en la figura 3.20 la forma de la señal en el condensador C2 y resistencia R1 cuando se usa el convertidor elevador en modo CCM y modo DCM.

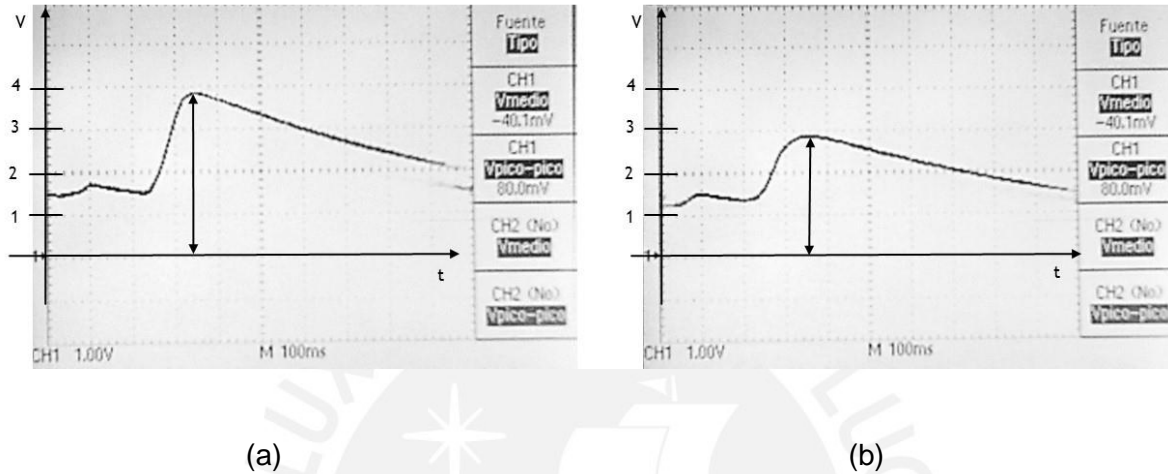


Figura 3.20 Señal de salida en el convertidor en modo CCM (a) y modo DCM (b)

En (a), la señal de conmutación V_c se encuentra a 100Khz, por lo explicado anteriormente se encuentra en modo CCM y se observa que alcanza picos de voltaje alrededor de los 4V. En (b), a pesar de lo expuesto en el punto anterior sobre el modo DCM diseñado, los valores pico son menores que en el modo de conducción continua por lo que la energía transferida es menor.

Se considera lo visto en estos ensayos para la realización de pruebas en las segunda versión del sistema de cosecha, que se explicará en el siguiente capítulo.

CAPÍTULO 4

RESULTADOS DEL PROTOTIPO ELABORADO

A continuación se muestran los resultados de tres pruebas que se realizaron en el prototipo para mostrar la efectividad del mismo.

4.1 Convertidor AC – DC en el prototipo

Se muestra en la siguiente figura 4.1 el comportamiento de la señal de salida del rectificador durante el funcionamiento del sistema de cosecha.

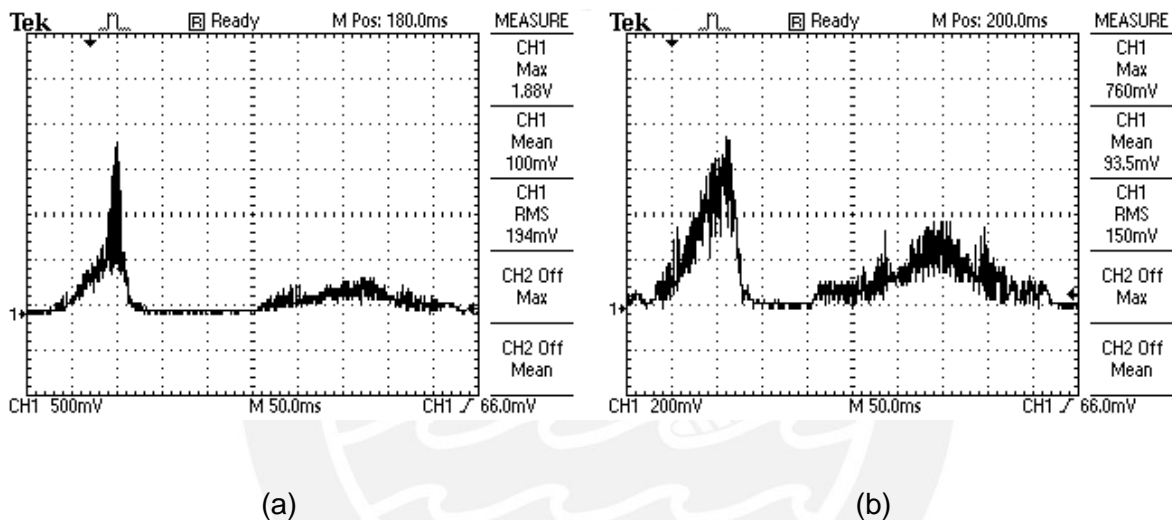


Figura 4.1 Señal de salida de etapa de rectificación en prototipo (a) al inicio de funcionamiento, (b) a lo largo del tiempo cuando es usado continuamente

Se tiene una señal con valores picos altos (a) de 1.88V, cuando se inicia el sistema, es decir si se utiliza el generador de potencia por primera vez en conexión con el sistema o si se vuelve a usar después de un largo tiempo de inactividad. Luego, se tiene una señal con valores picos más bajos (b) de 760mV., esto ocurre a medida que se usa el transductor con mayor frecuencia. En ambos casos, se observa una caída de la tensión a comparación de los valores mostrados en circuito abierto explicado en el punto 3.1.1.

4.2 Recarga controlada de elemento de almacenamiento de energía

Esta prueba requería manejar el voltaje del capacitor C4 (véase figura 3.13) de una forma dinámica, ya que es este elemento cuyo valor de tensión es detectado y comparado según los valores umbrales programados en la etapa de diseño para el comportamiento de la etapa de convertidor elevador. Debido a que el chip escogido permite almacenar energía en diversos elementos y se necesita un dispositivo de rápida carga y descarga, se escoge un capacitor de un valor de 110uF.

En las siguientes figuras, se mostrará el funcionamiento del convertidor elevador mediante dos señales, de color amarillo se encuentra la señal en el capacitor C4, mientras que la señal azul representa al capacitor de 110uF conectado a la salida física VBAT.

En la figura 4.2, se observa como la señal en C4 aumenta primero a un valor igual e instantáneamente a un valor superior a la señal VBAT, para luego entregar energía al elemento conectado a él y, posteriormente, mantener un valor de voltaje similar.

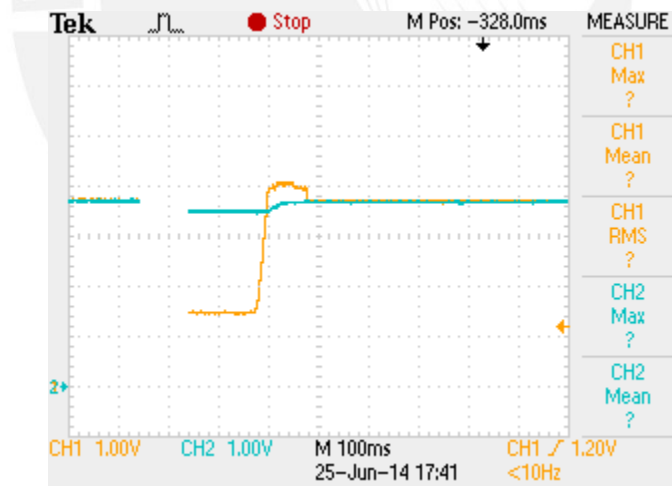


Figura 4.2 Funcionamiento de convertidor elevador

En la figura 4.3, se observa como al elevarse la señal del condensador C4 se llega hasta un nivel de voltaje tope, de 4.08V, en el cual deja de cargarse el capacitor externo y por tanto tiene un valor de tensión igual al capacitor C4.

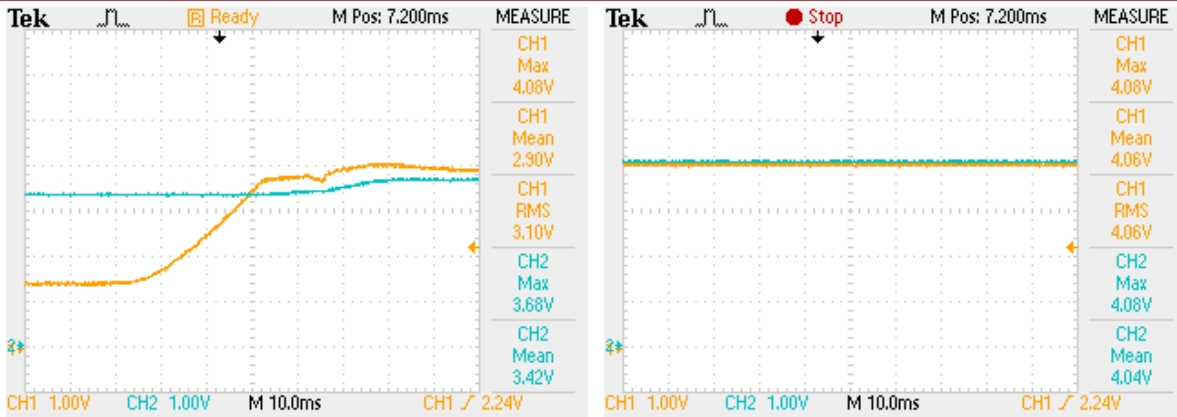


Figura 4.3 Carga máxima de elemento de almacenaje de energía

Dentro de la etapa de diseño, se toma en cuenta un valor voltaje umbral (2.9V) a partir del cual se asegura que la carga almacenada en C4 pase al elemento externo, en este caso el condensador de 110uF, esto se observa en la figura 4.4.

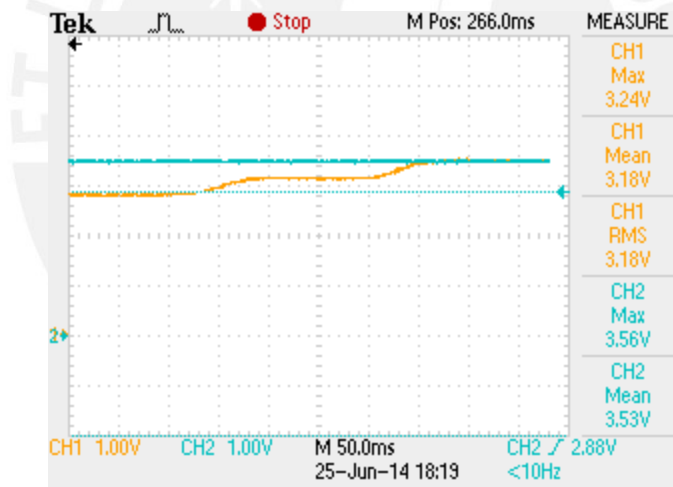


Figura 4.4 Carga del elemento de almacenaje a partir del umbral de tensión baja

4.3 Recarga de una batería litio - ión

El sistema se diseña para la recarga de una batería, por tanto es relevante comprobar que efectivamente se entrega energía en forma de corriente a la misma.

Mediante la observación de voltaje sobre una resistencia de 1 ohmio, se muestra en la figura 4.5 un tren de pulsos de corriente en dirección hacia la batería en su mayoría.

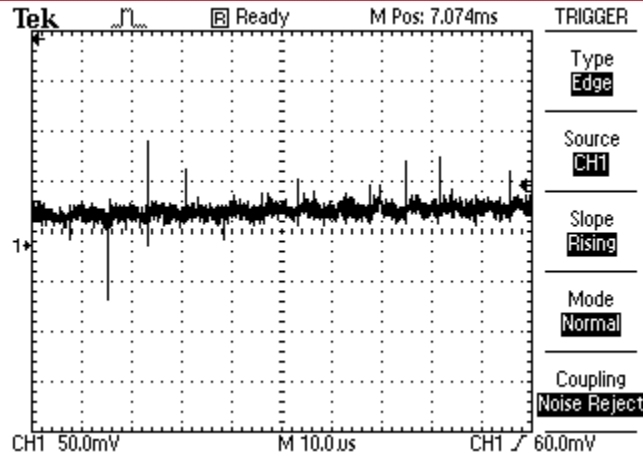


Figura 4.5 Tren de pulsos de corriente

A continuación, en la figura 4.6, se puede observar de manera ampliada un pico de corriente. Estos picos bordean los 90mA de corriente.

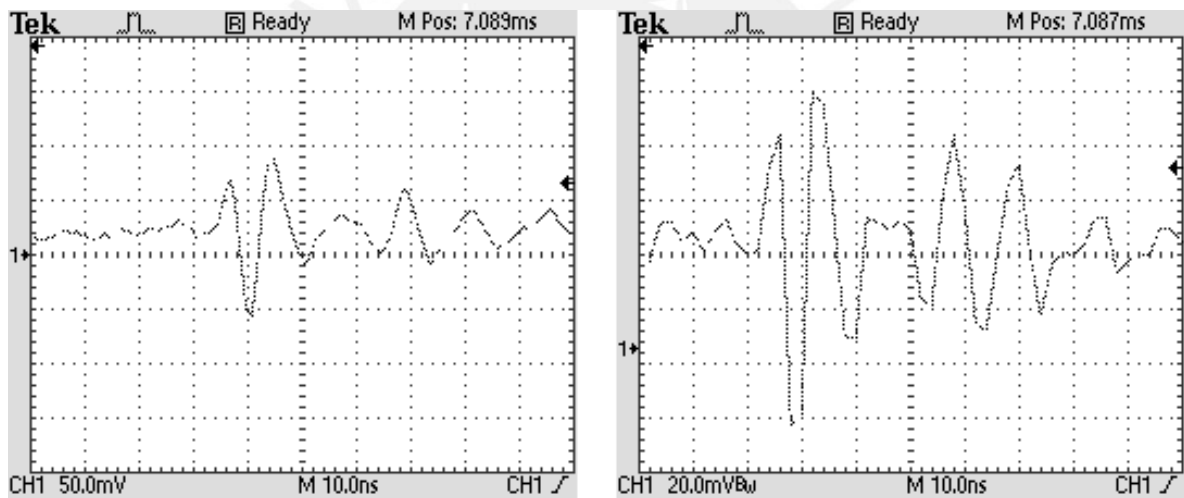


Figura 4.6 Señal de corriente ampliada

Posteriormente, se hace una prueba de recarga en la batería mediante una sucesión de movimientos repetitivos de la manivela debido al esfuerzo manual del usuario. De dicho ejercicio se obtiene la siguiente tabla 4.1. De esta tabla, se obtiene al linealizarse un promedio de 56.2uV recargado cada vez que se aplica esfuerzo sobre el mecanismo.

Número de repeticiones	Voltaje en batería (V)
0	2.940
50	2.943
100	2.947
150	2.949
200	2.952
250	2.955
300	2.959
350	2.961
400	2.962
450	2.965
500	2.969

Tabla 4.2 Pruebas de recarga en batería

En la siguiente figura 4.7, se utiliza multímetros para observar la recarga efectiva en la batería a partir de un valor inicial de 2.965V.



3- Figura 4.7 Recarga medida en una batería

Finalmente, se muestra, en la figura 4.8, el sistema prototipo conectado.

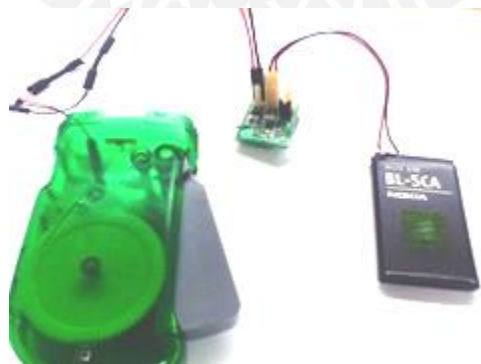


Figura 4.8 Prototipo físico del sistema de cosecha de energía

CONCLUSIONES

El sistema de cosecha de energía propuesto en base a movimientos biomecánicos en el presente trabajo cumple con el propósito de considerarse una fuente de alimentación alternativa y portátil para dispositivos electrónicos.

El transductor utilizado es funcional para el sistema propuesto, es decir puede generar energía eléctrica que pueda almacenarse, además de ser ligero y reducido en dimensiones físicas.

El circuito impreso diseñado consiste en elementos de bajo consumo y comerciables, posee un tamaño reducido y ligero, por tanto es práctico y con posibilidad a reproducción.

El convertidor elevador escogido le agrega una característica versátil en cuestión de almacenamiento y administración energética no prevista inicialmente en este proyecto.

Los bloques y topologías descritos en la literatura bajo los que se diseñó este sistema se ven validadas en esta aplicación, aunque no se consideran originalmente para el tipo de energía utilizado.[4]

RECOMENDACIONES

Al sistema de cosecha de energía presentado puede aplicarse técnicas de administración energéticas avanzadas como el seguimiento de máximo punto de operación, por ello se recomienda realizar los análisis convenientes al transductor para su uso y comparar su eficiencia con el sistema propuesto.

Considerar la construcción de sistemas mecánicos más sofisticados a los que se pueda acoplar el transductor y que permitan aprovechar nuevos tipos de movimientos biomecánicos.

El sistema se basa en bloques electrónicos genéricos, aplicables a otros tipos de energía como fuente, por lo que se recomienda experimentar usando el modelo prototipo y observar su utilidad y efectividad.

El sistema propuesto al ser un prototipo es sujeto de pruebas y mejoras constante, sea por el cambio de nuevas tecnologías en transductores, elementos de almacenaje y los convertidores utilizados, por tanto sus bloques por separado pueden ser reemplazados y producir versiones más avanzadas.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] DETERRE Martin; BOUTAUD Bertrand
2011 “Energy Harvesting systems for cardiac implant applications”, Symposium on Design, Test, Integration and Packaging of MEMS / MOEMS, DTIP, páginas 387 – 391
- [2] MHETRE Manisha; NADGEO Namrata
2011 “Micro energy harvesting for biomedical applications: A review”, International Conference on Electronics Computer Technology, ICECT, Vol. 3, páginas 1 - 5
- [3] RIEMER Raziel; SHAPIRO Amir
2011 “Biomechanical energy harvesting from human motion: theory, state of the art, design guidelines, and future directions”, Journal of neuroengineering and rehabilitation
Disponible en línea. Consulta: mayo de 2014.
< <http://www.jneuroengrehab.com/content/pdf/1743-0003-8-22.pdf> >
- [4] LI Qingguo; NAING Verónica; DONELAN Maxwell
2009 “Development of a biomedical energy harvester”, Journal of neuroengineering and rehabilitation
Disponible en línea. Consulta: mayo de 2014.
< <http://www.jneuroengrehab.com/content/pdf/1743-0003-6-22.pdf> >
- [5] LI Qingguo.; NAING Verónica.; WEBER D.J; DONELAN Maxwell
2008 “Biomechanical energy harvesting: apparatus and method”, International Conference on Robotics and Automation, ICRA, páginas 3672 – 3677
- [6] OLIVO Jacopo; CARRARA Sandro
2011 “Energy harvesting and remote powering for implantable biosensors”, IEEE Sensors Journal, Vol 11 N°7, páginas 1573 - 1586

- [7] NIU Penglin; CHAPMAN Patrick,
2004 “Evaluation of motions and actuation methods for biomechanical energy harvesting”, Power electronics specialists conference, PESC 04, Vol. 3, páginas 2100 – 2106
- [8] The Institution of Engineering and Technology (IET)
2006 “Harvest for the world“, Power Engineer journal, Vol. 20, páginas 34 - 37
- [9] PIMENTEL D.; MUSILEK P.
2010 “Power management with energy harvesting devices”, 23rd Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, CCECE, páginas 1 - 4
- [10] SHASHANK, Priya; INMAN, Daniel
2009 “Energy harvesting technologies”, Springer
- [11] SEWAN Heo; YIL SUK Yang; JAEWOO Lee
2011 “Micro energy management for energy harvesting at maximum power point”, 13th International symposium on integrated circuits, ISIC, páginas 136 – 139
- [12] RABAEY J.; BURGARTH F.
2007 “Energy harvesting – a systems perspective”, Electron Devices Meeting, IEDM 2007, páginas 363 – 366
- [13] WAHIED Ali; GIHAN Nagib
2012 “Design considerations for piezoelectric energy harvesting systems”, International Conference on engineering and technology, ICET, páginas 1 – 6
- [14] HART Daniel
2001 “Electrónica de potencia”, Pearson Educación, primera edición
- [15] RF – 356CA MABUCHI MOTOR Datasheet
Disponible en línea. Consulta: mayo de 2014
< http://www.mabuchi-motor.co.jp/en_US/cat_files/rf_356ca.pdf >
- [16] Battery University

- 2010 “Charging Litium – ion”
Disponible en línea. Consulta: mayo de 2014
< http://batteryuniversity.com/learn/article/charging_lithium_ion_batteries >
- [17] BQ25504 Ultra low power boost converter with battery management for energy harvester applications datasheet
2012 Disponible en línea. Consulta: abril de 2014
< <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/bq25504.pdf> >
- [18] Schottky barrier diode RB161M – 20 datasheet
2011 Disponible en línea. Consulta: abril de 2014
<http://rohmfs.rohm.com/en/products/databook/datasheet/discrete/diode/schottky_barrier/rb161m-20.pdf>
- [19] MOHAN Ned; UNDELAND Tore; ROBBINS William
1995 “Power electronics: converters, applications and design”, Wiley, segunda edición