

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

SEDE CUENCA

CARRERA: INGENIERÍA ELECTRÓNICA

PROYECTO TECNICO

**“CARGADOR ELÉCTRICO PORTÁTIL EN BASE A LA
CINEMÁTICA DE LA ARTICULACIÓN DE LA
RODILLA”**

**TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA
OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE:
INGENIERO ELECTRÓNICO**

Autores:

Illescas Quichimbo Carlos Antonio

Salazar Baculima Miguel Ignacio

Tutor:

Ing. Freddy Bueno Palomeque, MgT.

CUENCA, JULIO DEL 2016

CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR

Nosotros Miguel Ignacio Salazar Baculima con documento de identificación N° 010453160-3 y Carlos Antonio Illescas Quichimbo con documento de identificación N° 010583377-6, manifestamos nuestra voluntad y cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del trabajo de grado intitulado: “Cargador eléctrico portátil en base a la cinemática de la articulación de la rodilla”, mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Electrónico con mención en Sistemas Industriales, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En aplicación a lo determinado en la Ley de Propiedad Intelectual, en nuestra condición de autores nos reservamos los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscribimos este documento en el momento que hago entrega del trabajo final en formato impreso y digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, octubre del 2016



Miguel Ignacio Salazar Baculima

CI: 010453160-3



Carlos Antonio Illescas Quichimbo

CI: 010583377-6

CERTIFICACION

Yo declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: **“CARGADOR ELÉCTRICO PORTÁTIL EN BASE A LA CINEMÁTICA DE LA ARTICULACIÓN DE LA RODILLA “**, realizado por **Miguel Ignacio Salazar Baculima** y **Carlos Antonio Illescas Quichimbo**, obteniendo **Proyecto Técnico** que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, octubre del 2016

A handwritten signature in blue ink, appearing to be 'FLB', is centered on the page.

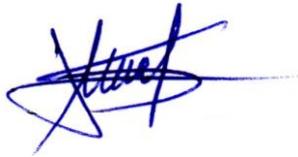
Ing. Freddy Leonardo Bueno Palomeque, MgT.

CI: 010321765-9

DECLARATORIA DE RESPONSABILIDAD

Nosotros, **Miguel Ignacio Salazar Baculima**, con CI: **010453160-3** y **Carlos Antonio Illescas Quichimbo**, CI: **010583377-6** del “**CARGADOR ELÉCTRICO PORTÁTIL EN BASE A LA CINEMÁTICA DE LA ARTICULACIÓN DE LA RODILLA**” certificamos que el total contenido de este **Proyecto Técnico** es y/o son de mí o nuestra exclusiva responsabilidad y autoría

Cuenca, octubre del 2016



Miguel Ignacio Salazar Baculima

CI: 010453160-3



Carlos Antonio Illescas Quichimbo

CI: 010583377-6

AGRADECIMIENTO

Queremos expresar nuestro más sincero agradecimiento a nuestro tutor de proyecto técnico Ing. Freddy Bueno Palomeque, MgT, por ayudarnos a realizar el presente trabajo de investigación, quien con su sabiduría y de una manera desinteresada, nos han enseñado a ejecutar adecuadamente los procesos de investigación.

Carlos Illescas - Miguel Salazar

DEDICATORIA

A Dios por haberme permitido llegar hasta este punto, brindándome sabiduría en mi actuar y bendecirme cada día para lograr cumplir una meta mas, a mi mama María Carmen que siempre sueño verme como un profesional, a mi esposa Tatiana por darme la oportunidad de ser alguien en la vida, a mi hermano Gerardo por su apoyo incondicional en todo momento, familiares, amigos y al club de arbitraje (CAI), que de una u otra manera siempre estuvieron ahí para brindarme una mano amiga cuando mas lo necesitaba, gracias a todos por ayudarme a superar y seguir adelante.

Carlos Illescas

A Dios y Jesus por ser el guía y pastor en mi vida, a mis padres Leonor y Miguel, mis hermanos Juan y Diego por ser siempre un apoyo durante toda mi vida.

Miguel Salazar

ÍNDICE GENERAL

| | |
|---|------|
| AGRADECIMIENTO | V |
| ÍNDICE GENERAL | VII |
| ÍNDICE DE FIGURAS | VIII |
| ÍNDICE DE TABLAS | XII |
| ANTECEDENTES | XIV |
| INTRODUCCIÓN | XVI |
| CAPÍTULO 1. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA | 1 |
| 1.1 Estado del Arte..... | 1 |
| 1.2 La Rodilla..... | 4 |
| 1.3 Cinética de la rodilla | 6 |
| 1.4 Descripción de los componentes electrónicos del prototipo. | 9 |
| CAPÍTULO 2. DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA | 19 |
| 2.1 Recolección de datos para trayectoria de la caminata..... | 19 |
| 2.2 Construcción de un dispositivo para simular la caminata humana..... | 23 |
| 2.3 Análisis del generador..... | 24 |
| 2.4 Construcción del prototipo mecánico para el usuario. | 30 |
| 2.5 Análisis de carga de la batería 250mAh de LiPo con fuente eléctrica. | 33 |
| 2.6 Acondicionamiento de la Señal. | 35 |
| 2.7 Modelo matemático para describir el funcionamiento del prototipo..... | 44 |
| CAPÍTULO 3. ANÁLISIS DE DATOS Y RESULTADOS | 53 |
| 3.1 Elección del motor más adecuado | 53 |
| 3.2 Análisis de energía generada..... | 54 |
| 3.2 Análisis de eficiencia | 60 |
| CAPÍTULO 4. CONCLUSIONES | 66 |
| 4.1 Conclusiones..... | 66 |
| BIBLIOGRAFÍA | 68 |
| ANEXOS | 72 |
| Anexo 1: Datasheets motor LC30G Copal | 73 |
| Anexo 2: Datasheet de Convertidor Boost XL6009 | 75 |
| Anexo 3: Datos tabulados de la curva de voltaje y corriente de carga de la batería de 250mAh de LiPo..... | 83 |
| Anexo 4: Datasheet del li-polymer battery 402035 3.7v 250mah lithium polymer battery for MP3/MP4..... | 84 |
| Anexo 5: Programación del controlador Arduino..... | 86 |
| Anexo 6: Diagrama electrónico final del prototipo. | 88 |
| Anexo 7: Código de programación en Labview para adquirir datos..... | 89 |
| Anexo 8: Interfaz osciloscopio - My Daq. | 90 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1: Plantilla de calzado que convierte pasos en electricidad | 2 |
| Figura 2: Rodillera generadora de electricidad | 3 |
| Figura 3: Generador de rotación de flujo axial | 4 |
| Figura 4: Rangos de movimiento de la rodilla: frontal, sagital y transversal representados en el cuerpo humano..... | 5 |
| Figura 5: La Rodilla: a) Flexión máxima. b) Extensión máxima, c)Abducción y aducción..... | 5 |
| Figura 6: Modelo en bisagra de la rodilla desde el punto de referencia..... | 6 |
| Figura 7: Diagrama de cuerpo libre de la rodilla | 7 |
| Figura 8: Trayectoria cinemática de la rodilla y actividad muscular durante la marcha | 8 |
| Figura 9: Curva de comportamiento del Torque del motor Copal LC30G | 10 |
| Figura 10: Motor DC Copal LC30G, con caja reductora de velocidad..... | 10 |
| Figura 11: Engranajes cónicos | 11 |
| Figura 12: Microcontrolador (MCU) Arduino Pro mini..... | 12 |
| Figura 13: Módulo Convertidor boost XL6009..... | 13 |
| Figura 14: Densidad energética de los tipos de baterías recargables | 15 |
| Figura 15: Curva característica de la batería del polímero de litio en función de la corriente | 16 |
| Figura 16: Prueba de capacidad para la batería de polímero de litio con respecto a la temperatura | 16 |
| Figura 17: Prueba de capacidad de la batería de polímero de litio para determinar el ciclos de vida | 17 |
| Figura 18: Arquitectura del sistema. | 19 |
| Figura 19: Potenciómetro acoplado a graduador de 360°..... | 20 |
| Figura 20: Curva de voltaje en función del ángulo..... | 21 |

| | |
|--|----|
| Figura 21: Dispositivo de adquisición de ángulo de caminata..... | 21 |
| Figura 22: Dispositivo de adquisición de ángulo de caminata colocado en una persona | 22 |
| Figura 23: Trayectoria de caminata de sujeto 1..... | 22 |
| Figura 24: Trayectoria de caminata de sujeto 2..... | 23 |
| Figura 25: Dispositivo de simulación del movimiento de la rodilla a) Vista frontal, b) Vista lateral..... | 23 |
| Figura 26: Motores usados para la primera prueba: a) Alvensa,b) Servomotor MG995..... | 24 |
| Figura 27: a) Taladro manual. b) Sistema acoplado al dispositivo de simulación del movimiento de la rodilla.. .. | 25 |
| Figura 28: Curva de potencia del generador sin engranes del motor DC MG995. | 26 |
| Figura 29: Curva de potencia del generador con engranes del motor DC MG995. ... | 27 |
| Figura 30: Motor a pasos..... | 28 |
| Figura 31: Curva de potencia del generador con el Motor a Pasos..... | 28 |
| Figura 32 Motor Copal LC30G:..... | 29 |
| Figura 33: Curva de potencia del generador con el Motor DC Copal LC 30G..... | 29 |
| Figura 34: Rodillera Aurik..... | 30 |
| Figura 35: Soportes metálicos de la rodillera: a) Vista superior, b) Vista posterior. . | 30 |
| Figura 36: Acoplamiento del generador del Motor DC Copal LC 30G – 191 en el soporte metálico de la rodillera: a) Vista superior, b) Vista posterior.. .. | 31 |
| Figura 37: a) Acoplamiento del generador en el soporte metálico de la rodillera: b) Colocado en el usuario..... | 31 |
| Figura 38: Estructura modificada: a) Aumento de extensiones de aluminio y bisagras, b) Neopreno, c) Abrazaderas en plástico..... | 32 |
| Figura 39: Engranaje Central: a) Metálico, b) Nailon.. .. | 32 |
| Figura 40: Estructura del prototipo..... | 33 |
| Figura 41: Circuito utilizado para la carga de batería..... | 33 |
| Figura 42: Voltaje durante la carga normal de la batería. | 34 |
| Figura 43: Comportamiento de la corriente durante la carga normal..... | 34 |
| Figura 44: Trayectoria de caminata, ángulo en función del tiempo..... | 35 |

| | |
|---|----|
| Figura 45: Voltaje generado en función de la caminata..... | 35 |
| Figura 46: Circuito básico para la carga..... | 36 |
| Figura 47 Señal de voltaje mediante la carga parcial... .. | 37 |
| Figura 48 Circuito del cargador con resistencias de divisor de tensión.... | 38 |
| Figura 49 Esquema de bloques del sistema..... | 39 |
| Figura 50 Esquema descriptivo del voltaje con los capacitores..... | 39 |
| Figura 51 Voltaje obtenido del generador con condensadores y sin batería.... | 40 |
| Figura 52 Voltaje en los capacitores para la carga en la batería.... | 40 |
| Figura 53 (a) Señal de corriente invertida, (b) Voltaje pulsante en la batería..... | 41 |
| Figura 54 Configuración para medir la corriente entregada por el generador..... | 41 |
| Figura 55 (a) Circuito Boost, (b) Modo 1, (c) Modo 2... .. | 42 |
| Figura 56 Esquema eléctrico con convertidor Boost... .. | 43 |
| Figura 57 (a) Señal de corriente invertida, (b) Voltaje pulsante en la batería..... | 43 |
| Figura 58 Voltaje en los capacitores para la carga en la batería.... | 44 |
| Figura 59 Motor DC Copal desarmado..... | 45 |
| Figura 60 Voltaje generado en función de la velocidad angular..... | 46 |
| Figura 61 Voltaje generado y sus cambios en el circuito.... | 49 |
| Figura 62 Trayectoria de caminata y voltaje generado a vacío..... | 50 |
| Figura 63 Módulo boost XL6009: (a) Estado 1 (b) Estado 2..... | 51 |
| Figura 64 Diagrama esquemático del módulo boost XL6009.... | 52 |
| Figura 65 (a) Engranés de cobre del Motor MG995. (b,c) Engrane con dientes dañados..... | 53 |
| Figura 69 Engranés del motor copal LC 30G..... | 54 |
| Figura 67 Comparación del voltaje en los capacitores para la carga en la batería (a,b).... | 55 |
| Figura 68 Comparación de la señal de corriente invertida y voltaje pulsante en la batería (a, b)..... | 56 |
| Figura 69 Diagrama Electronico final del prototipo..... | 57 |
| Figura 70 Carga de la batería con el prototipo completo..... | 57 |
| Figura 71 Carga de la batería durante caminata..... | 58 |

| | |
|--|----|
| Figura 72 Valores de descarga de la batería cargada con caminata (a) Voltaje, (b) Corriente..... | 59 |
| Figura 73 Carga de la batería con el sistema completo Voltaje y Corriente..... | 60 |
| Figura 74 Pulsos de voltaje y corriente de carga en la batería..... | 61 |
| Figura 75 Trayectoria de caminata y velocidad de giro de la rodilla..... | 62 |
| Figura 76 Señal de velocidad rectificadas..... | 63 |
| Figura 75 Prototipo colocado en la persona..... | 64 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|---|----|
| Tabla 1: Formas de energía en las que se transforma la energía humana. | 1 |
| Tabla 2: Especificaciones estándar de motor Copal LC30G | 9 |
| Tabla 3: Especificaciones técnicas Arduino Pro Mini | 12 |
| Tabla 4: Parámetros del convertidor boost XL6009 | 14 |
| Tabla 5: Comparación de los tipos de batería recargables | 15 |
| Tabla 6: Medición de voltaje en función del ángulo de salida..... | 20 |
| Tabla 7: Potencia generada por motor AC Alvensa..... | 24 |
| Tabla 8: Potencia generada por motor DC MG995 | 25 |
| Tabla 9: Potencia generada por el motor DC MG995 sin engranes | 26 |
| Tabla 10: Potencia generada por el motor DC MG995 con engranes de taladro | 27 |
| Tabla 11: Potencia generada por el Motor a Pasos. | 28 |
| Tabla 12: Potencia generada por el Motor DC Copal LC 30G – 191 | 29 |
| Tabla 13: Voltaje generado y su velocidad angular..... | 46 |
| Tabla 14: Flujo magnético con su respectiva velocidad y voltaje..... | 47 |
| Tabla 15: Voltaje generado en función de la caminata..... | 48 |
| Tabla 16: Comparación de generadores..... | 53 |
| Tabla 17: Comparación de potencias obtenidas... .. | 58 |
| Tabla 18: : Presupuesto total del prototipo..... | 65 |

ABREVIATURAS

| | |
|--------|--|
| UPS | Fuente de Suministro Ininterrumpida. |
| SAI | Sistema de alimentación ininterrumpida. |
| NiMh | Níquel e hidruro metálico. |
| NiCd | Níquel Cadmio. |
| Li-ion | Ion-Litio. |
| LiPo | Polímeros de Litio. |
| ME | Densidades de energía del metabolismo |
| GE | Densidades de energía total. |
| GIIB | Grupo de Investigación en Ingeniería Biomédica |
| MCU | MicroController Unit |
| myDaq | Tarjeta de adquisición de datos |
| DC | Corriente Directa. |
| PCB | Printed Circuit Board |

ANTECEDENTES

Los dispositivos electrónicos portátiles se están desarrollando a tal punto que nos permite una comunicación más amplia y de diferentes maneras, como las video-llamadas, chat, redes sociales etc. Además de un manejo más completo de información que nos sirve para realizar diferentes tareas, desde consultar una dirección por medio de GPS, hasta intercambio y acceso a datos de carácter científico, pero estos consumen una gran cantidad de energía y no siempre es fácil acceder a una fuente de energía como un tomacorriente, por diferentes situaciones, ejemplo: viajando o desplazándose en transporte público o a pie. La propuesta de este proyecto es utilizar la caminata humana para producir energía y almacenarla en una batería, que el movimiento de la misma sea aprovechado generando energía eléctrica. En pruebas desarrolladas previamente en nuestra carrera determinamos trayectorias de marcha y el análisis de la caminata donde se observó el movimiento de las articulaciones de los miembros inferiores del cuerpo humano llegando a la conclusión de que la rodilla tiene un mayor ángulo de giro, por esto se plantea colocar un generador pequeño (dinamo) en dicha articulación.

Existe un trabajo previo realizado en la UPS sede quito (“Análisis biomecánico de los miembros inferiores del cuerpo, para el estudio de la transformación de la energía humana en energía eléctrica, en el pedaleo elíptico.”) el cual plantea la obtención de energía pedaleando una bicicleta estacionaria. [1] Otro proyecto similar es “Mobile charger via walk” desarrollado por Jain M, Tiwari U, Gupta M, en la Universidad de Galgotias, India, el cual consiste en un transductor piezoeléctrico de polímero colocado en la planta del zapato, el cual al realizar una presión genera un voltaje que es amplificado y regulado para que sea posible enviarlo a un dispositivo electrónico [35].

Los beneficiarios de este proyecto serian que todas las personas que usen dispositivos electrónicos móviles, ya que su propósito es extender el tiempo de uso diario de estos, además de optimizar el tiempo que toma para realizar la carga de la

batería, se lo puede realizar mientras la persona camina o se moviliza de un lugar a otro.

Otro beneficiario es el Grupo de Investigación en Ingeniería Biomédica GIIB-UPS, ya que el proyecto y prototipo será entregado al mismo para su posterior estudio y desarrollo.

INTRODUCCIÓN

El generador eléctrico portátil en base a la marcha resolvería necesidad de la mayoría de personas de cargar continuamente sus dispositivos electrónicos portátiles (celulares, tablets, mp3, cámaras fotográficas, etc.) ya que la capacidad de las baterías de los mismos no abastece un funcionamiento continuo durante todo el día, además que por el avance de la potencia de procesamiento de estos dispositivos no es suficiente una carga diaria. Tomando en cuenta también que en muchos casos no es accesible un tomacorriente por distintas razones: transporte público, recorrido a pie, bicicleta, deportes, etc.

CAPÍTULO 1. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

1.1 Estado del Arte

En el estado de arte se analiza la información existente sobre las diferentes formas de aprovechamiento de energía humana para generar energía eléctrica.

- **Energía humana**

Cronológicamente a lo largo de la historia, el ser humano ha explotado numerosos recursos naturales disponibles en nuestro planeta, y la mayoría de ellos no son renovables, provocando un deterioro ambiental. Por lo tanto es necesario buscar nuevas alternativas de energía renovable y deben caracterizarse por ser limpias, accesible, eficiente y fiable.

Existen varios proyectos de investigación para generación y almacenamiento de energía humana, aunque no es ideal todavía en términos de costo del ciclo de vida, estas tienen aplicaciones emergentes de mucho interés [2].

El movimiento del cuerpo humano puede transformarse en diversas formas de energía [3] como se presenta en la Tabla 1, la misma que puede ser aprovechada en manivelas, generadores de bicicletas, linternas dinamo, etc. Un inconveniente principal de estos dispositivos es que requieren que el usuario realice el movimiento, lo que produce cansancio o agotamiento, limitando el tiempo disponible para el uso del dispositivo [4].

| Energía en el cuerpo humano | | | | |
|-----------------------------|-----------|----------|---------|---------|
| Fuente de Energía | Eléctrica | Mecánica | Química | Térmica |
| Músculos | | X | | |
| Potencial de la piel | X | | | |
| Transpiración | | | X | |
| Calor en el cuerpo | | | | X |

Tabla 1: *Formas de energía en las que se transforma la energía humana [3].*

Los dispositivos electrónicos portátiles (celulares, tablets, laptops, mp3, etc) son parte de la vida diaria de las personas, pero para poder movilizarlos dependen de baterías, las cuales su duración depende de su calidad y precio.

Existe una mejora sustancial en el tiempo de funcionamiento de los dispositivos portátiles, ya que en el pasado se usaban baterías extremadamente grandes y pesadas que hacían que el sistema no sea adecuado. La evolución de las baterías, muestran como se ha ido desarrollando para ser más eficientes y pequeñas [5].

- **Movimiento humano para generar energía eléctrica**

El movimiento mecánico de una articulación durante una actividad física es aprovechado como energía renovable, se ha realizado algunas investigaciones en cómo aprovechar la energía cinética de la caminata humana para posteriormente ser almacenada en baterías.

Existe un desarrollo del SolePower Ensoles creado por los ex-alumnos de la Universidad Carnegie Mellon, Pennsylvania. Realizaron una plantilla de calzado que convierte las pisadas en electricidad, actualmente se encuentran en fase de desarrollo, se caracteriza por acoplarse como una plantilla dentro de los zapatos de uso común como se observa en la figura 1 [6].

Este proyecto implementa una plantilla de calzado que tiene un sistema mecánico y electrónico dentro del mismo, que hace girar un micro - generador el cual permite crear y almacenar energía en baterías ubicadas fuera del zapato [6].



Figura 1: *Plantilla de calzado que convierte pasos en electricidad [6].*

También se ha desarrollado una rodillera generadora de electricidad durante la caminata humana (figura 2). Este proyecto recolecta la energía cinética del movimiento de la rodilla. El dispositivo es una dínamo que genera electricidad, posee un sistema mecánico y electrónico. El proyecto propone realizar 30 minutos de caminata, que equivale al tiempo promedio requerido para la carga de un celular u otro equipo portátil. La eficiencia de la rodillera permite que una caminata de 5 minutos a ritmo tranquilo, proporcione 5 W de potencia. [7].

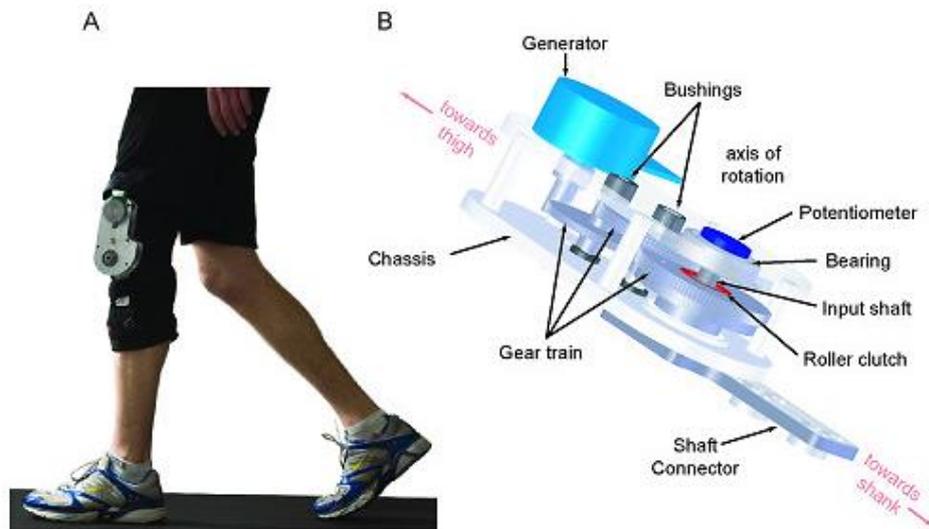


Figura 2: Rodillera generadora de electricidad [7].

Existe otro proyecto que muestra la obtención de electricidad utilizando un generador de flujo axial, el diseño se basa en la construcción de un generador con un rotor conformado por dos discos de hierro y con 8 imanes de Neodimio.

Su funcionamiento consiste en girar con la mano la dínamo para generar electricidad, implementa un sistema de acondicionamiento electrónico para su almacenamiento de energía de tal forma que la potencia eléctrica y la corriente del generador garanticen una aceptable vida útil de la batería [8]. El costo de este proyecto es bajo y viable con lo que puede ser implementado en sectores donde no hay servicio de energía eléctrica.

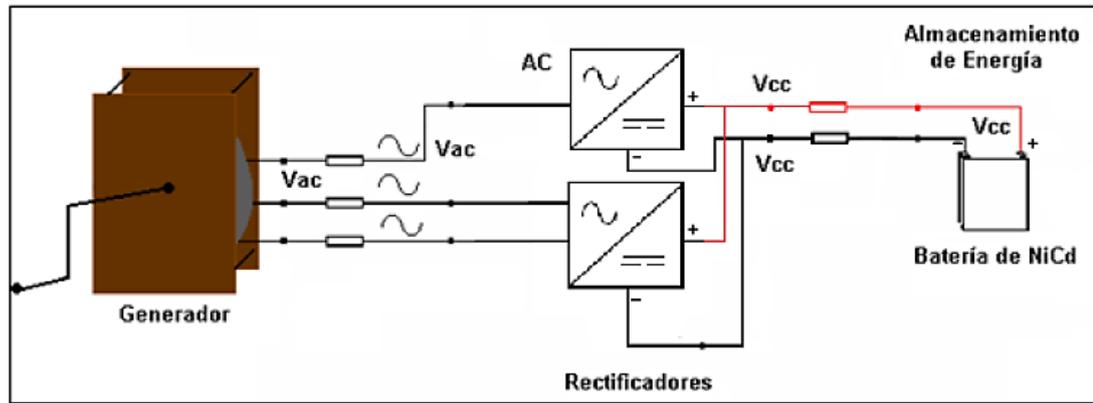


Figura 3: *Generador de rotación de flujo axial, [8]*

1.2 La Rodilla

La rodilla es la articulación más grande del esqueleto humano está formada por la unión del extremo inferior del fémur, superior de la tibia y la rótula. El funcionamiento de esta articulación es de suma importancia para la caminata humana pues soporta todo el peso del cuerpo, es uno de los brazos de palanca más largos del cuerpo y soporta grandes fuerzas, siendo el más susceptible a sufrir lesiones [9,10,11].

- Biomecánica

Es importante conocer la biomecánica de la rodilla pues estudia el análisis mecánico articular de transmisión de cargas, conservación de momentos y brinda un par de fuerzas adecuados para su funcionamiento [12,13].

Los rangos de movimiento de la rodilla se presenta en tres planos: sagital, frontal y transversal (figura 4); el movimiento más representativo es el flexo-extensión que se produce en el plano sagital, pues es el más común para realizar el análisis biomecánico de esta articulación [14,13].

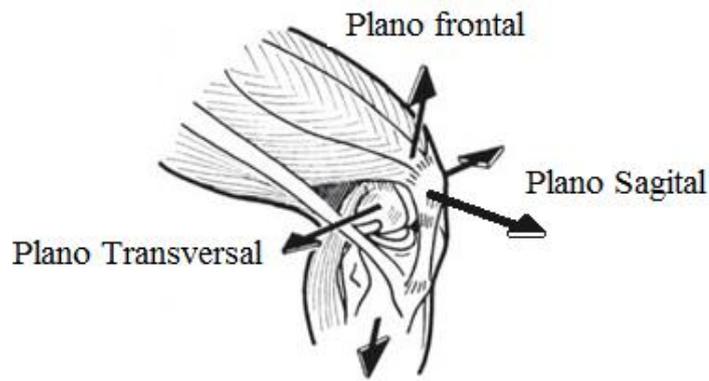


Figura 4: Rangos de movimiento de la rodilla: frontal, sagital y transversal representados en la rodilla [15].

Los rangos de movimiento máximos requeridos durante una actividad física son:

- La marcha: flexión de 60°
- Acenso de escaleras 80°
- Pendiente 90°
- La extensión de rodilla es de 0° y puede ser funcional entre 5-10° [16].

Vista desde el plano sagital el movimiento articular de la rodilla en la marcha humana la extensión máxima es 10° (figura 5b), mientras que el grado de flexión que puede alcanzar depende de la posición de la cadera del individuo, cuando se extiende alcanza los 120° (figura 5a) [17].

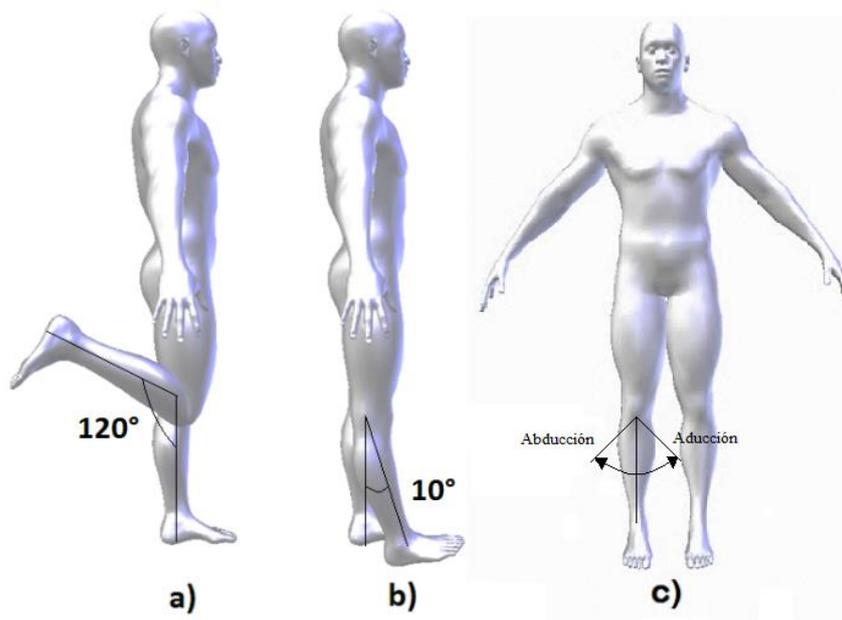


Figura 5: La Rodilla: a) Flexión máxima. b) Extensión máxima, c) Abducción y aducción (tomada y editada) [17]

La abducción y aducción se produce en el plano transversal y aumentan con la flexión sí; la rodilla se encuentra a 30° de flexión estos movimientos alcanzan su máxima amplitud y son pocos grados de libertad de movimiento como se representa en la figura 5c [19,13],

1.3 Cinética de la rodilla

La cinética hace referencia al análisis estático, dinámico de las fuerzas y momentos que actúan sobre la articulación de la rodilla. Su movilidad se caracteriza por un modelo tipo bisagra, su rotación es sobre un eje único situado en la rótula es decir la flexión de la misma, como indica en la figura 6, sólo se basa dos planos [20].

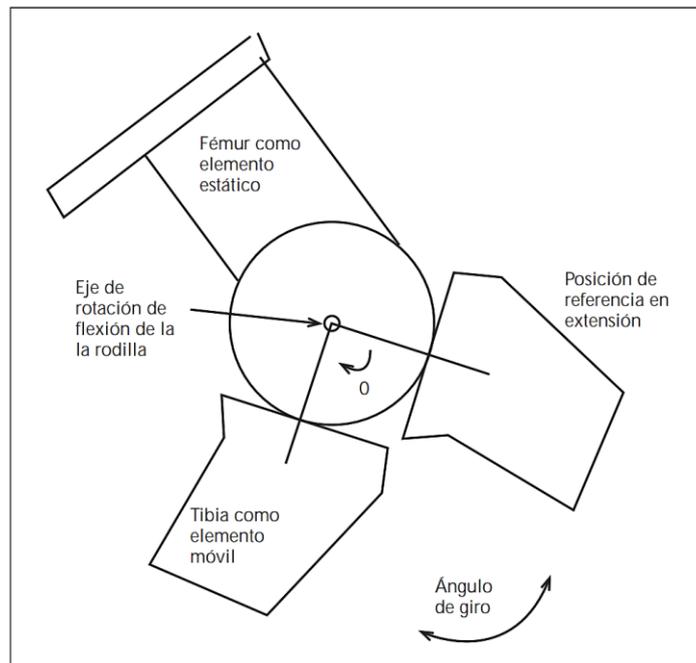


Figura 6: Modelo en bisagra de la rodilla desde el punto de referencia. [20].

El análisis estático de la articulación de la rodilla permite determinar las fuerzas y momentos presentes en la misma durante la ausencia de movimiento o en un determinado instante de una actividad.

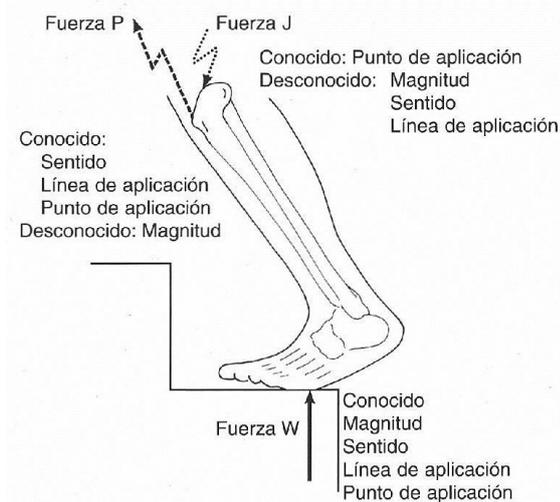


Figura 7: Diagrama de cuerpo libre de la rodilla[21]

Durante la mayor parte de las actividades físicas del ser humano la rodilla está en condiciones dinámicas, las fuerzas que se consideran para este análisis son las mismas que el estático, además la aceleración, momentos de inercia y despreciando las fuerzas de fricción son insignificantes [21].

▪ Trayectoria de la rodilla durante la marcha

En la trayectoria de marcha se basa en dos fases: oscilación (swing) y apoyo (stance), es descrito mecánicamente de forma cinética mediante impulsos, pares de fuerzas de las extremidades inferiores y también el ángulo que forman estas articulaciones. La trayectoria cinemática que realiza la rodilla es el plano sagital durante la marcha como se describe en la figura 10, muestra cuatro fases principales, cada uno delineados por un cambio en la dirección del movimiento [7].

El torque es necesario en la articulación durante el ciclo de marcha, como se indica en la figura 8, en el primer desplazamiento del contacto del pie, los músculos que actúan para extensión la rodilla, se produce un momento extensor durante la flexión de la postura. Sin embargo con el primer swing, la rodilla se flexiona y gana velocidad por lo tanto la otra pierna acepta el peso del cuerpo, lo que resulta es una potencia negativa.

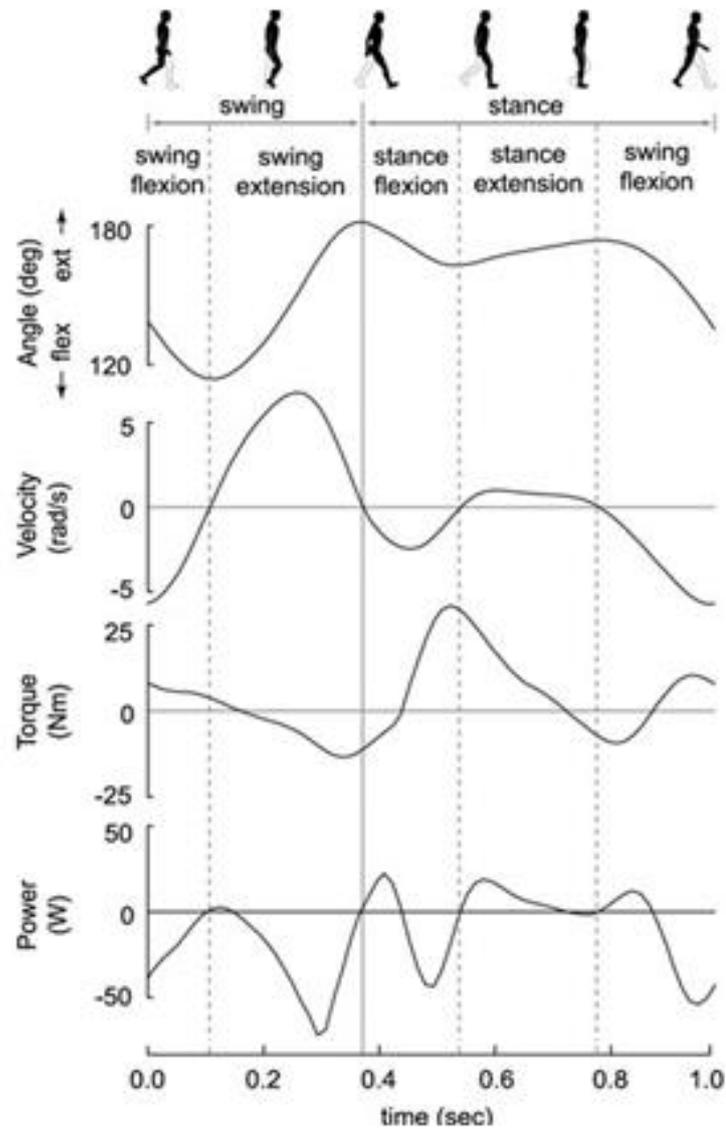


Figura 8: Trayectoria cinemática de la rodilla y actividad muscular durante la marcha.
 Tomada y editada de [7].

De este modo, la potencia es un conjunto de resultados de producción de energía positiva y negativa por los músculos opuestos. Independientemente de las articulaciones, la potencia conjunta suele ser intermitente, bi-direccional y variable en el tiempo en la caminata humana [7].

1.4 Descripción de los componentes electrónicos del prototipo.

▪ Motores y generadores DC

Los motores de corriente directa son máquinas que funcionan como actuadores o generadores, depende de la dirección de flujo de potencia a través de ella [22], es decir reversible, al aplicar electricidad en los bornes se produce el movimiento del eje, pero si se aplica movimiento del eje se genera voltaje en los bornes.

Motor DC de imán permanente.

Estos motores cuyos polos están hechos de imanes permanentes ofrecen más beneficios que otros tipos de motores DC, dado que no tienen circuito de campo, ni pérdidas en el cobre, además su tamaño es reducido, hace que su costo sea relativamente bajo [22]. El único método de control de velocidad disponible es el control de voltaje del inducido.

Características del motor DC copal LC 30G – 191.

Es un motor de imán permanente, que se caracteriza por tener buen rendimiento eléctrico, posee un sistema de engranes o caja reductora de velocidad y está incorporado en la parte superior de su estructura, posee las siguientes características como se indica en la tabla 2.

| Modelos | Voltaje V | Velocidad nominal | Intensidad de corriente | Potencia nominal |
|----------|-----------|-------------------|-------------------------|------------------|
| LC30-191 | 24 | 5400 rpm | 500mA | 5.5 mW |

Tabla 2: *Especificaciones estándar de motor Copal LC30G.*

Fuente: *Los autores.*

En general, la vida de la caja de reductora está en función del desgaste mecánico de sus engranes. Puede funcionar continuamente durante 1000 a 3000 horas dentro de su carga y velocidad nominal.

La fuerza de carga del motor (copal LC30G) (figura 32), tiene relación directa con la velocidad y corriente, por lo tanto si su fuerza aumenta la velocidad disminuye y la corriente aumenta linealmente como observa en la figura 9, el motor tiende mejor a trabajar cerca de la máxima eficacia, entonces se puede obtener el un buen rendimiento ideal y de características estables de trabajo [23].

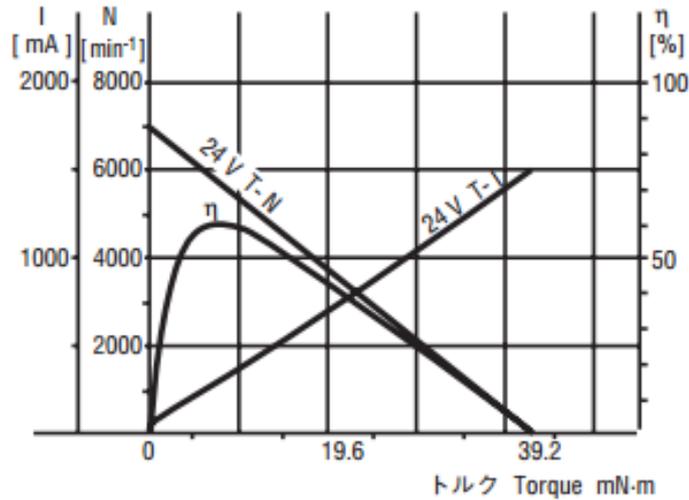


Figura 9: Curva de comportamiento del Torque del motor Copal LC30G (Anexo1) [23],

La **caja reductora de velocidad** del motor copal LC30G (figura 10) es una adaptación mecánica que reduce la velocidad angular y aumenta la fuerza a la salida [24].

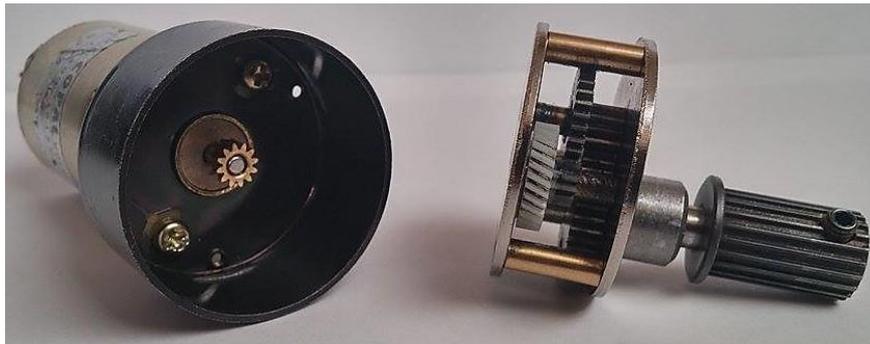


Figura 10: Motor DC Copal LC30G, con caja reductora de velocidad.

Fuente: Los autores

▪ Transmisión mecánica con engranes.

La transmisión mecánica con engranajes está conformada por dos ruedas dentadas, la mayor se denomina corona y el menor piñón. La fuerza de torsión que se ejerce para girar un objeto en el caso de los engranajes se transmite de uno a otro y depende de la configuración, aumenta o disminuye su velocidad a la salida del sistema mecánico [25].

Engranaje con eje perpendicular cónico

Se caracteriza por transmitir el movimiento y la fuerza a un ángulo de 90°, tiene la forma de un cono truncado, los podemos encontrar como por ejemplo en una batidora o el diferencial de un automóvil.



Figura 11: Engranajes cónicos [26].

Como se representa en la figura 11 una sus ruedas está conectada a la fuente de giro y es conocida como engranaje motor y la otra está conectada al eje que debe recibir el movimiento, se denomina engranaje conducido [27].

Las **relaciones de transmisión** normalizadas para cada tipo y tamaño varían dependiendo del porcentaje de reducción de la caja de cambios, esta entre 1: 10 y 1: 500. También se puede llegar a 1: 1000 con diseño especial [24].

Para el cálculo de la relación de transmisión entre engranajes se tiene en cuenta el número de dientes de cada rueda en vez de su diámetro (igual que en la transmisión cadena-piñón) cumpliéndose la siguiente relación:

$$\text{Relación de velocidades} = \frac{\# \text{ de dientes dela rueda conductora}}{\# \text{ de dientes dela rueda conducida}} = \frac{Z1}{Z2} \quad (1.1)$$

▪ Microcontrolador

Para el diseño e implementación del dispositivo se ha optado por el Arduino Pro Mini que se indica en la figura 12 para lo cual se detalla la información general que posee en la tabla 3.

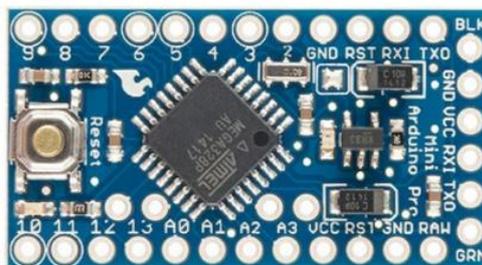


Figura 12: Microcontrolador (MCU) Arduino Pro mini [28].

| Microcontrolador | ATmega328 |
|-----------------------------------|---|
| Tensión de funcionamiento | 3,3 V o 5 V (según el modelo) |
| Voltaje de entrada | 3,35 -12 V (modelo 3,3 V) o 5-12 V (modelo 5V) |
| Digital I/O Pins | 14 (de los cuales 6 proporcionan salida PWM) |
| Pines de entrada analógica | 6 |
| Corriente continua para Pin I / O | 40mA |
| Memoria flash | 32 kB (de los cuales 0,5 kB utilizados por el gestor de arranque) |
| SRAM | 2 kB |
| EEPROM | 1 kB |
| Velocidad de reloj | 8 MHz (modelo de 3,3 V) o 16 MHz (5V modelo) |

Tabla 3: Especificaciones técnicas Arduino Pro Mini.

Fuente: Los autores.

Además podemos detallar algunas características físicas que nos presenta el Arduino Pro Mini por lo cual se lo considero [28].

- Hay dos versiones del Mini Pro. De 3.3V (8MHz) y 5V (16 MHz)
- PWM: 3, 5, 6, 9, 10, y 11. proporcionar una salida de PWM de 8 bits

- Puerto serie: 0 (RX) y 1 (TX). Se utiliza para recibir (RX) y transmitir datos en serie (TX) a nivel TTL. Estos pines están conectados a los TX-0 y RX-1 pines de la cabecera de seis pines
- Entradas analógicas y Salidas Digitales suficientes para el diseño del prototipo.

▪ Convertidor boost XL6009

El convertidor Boost es un circuito elevador de voltaje, su objetivo es que la tensión de salida siempre sea mayor a la de entrada. El módulo XL6009 como se observa en la figura 13 es de segunda generación con buenas prestaciones, su diseño se basa en implementar el inductor y el capacitor como elementos almacenadores de energía, produciendo así niveles de voltaje mayores en la carga [29].

El módulo posee un controlador interno que modifica el ancho del pulso para mantener su voltaje de salida en el valor de referencia asignado por el potenciómetro. Se usa en aplicaciones de electrónica para fuentes hechas a medida como cargadores, en la tabla 4 se muestra los parámetros del módulo XL6009.



Figura 13: Módulo convertidor boost XL6009.

Fuente: Los autores.

| Convertidor | XL6009 |
|---------------------------|---------------|
| Voltaje de entrada | 3V ~ 32V |
| Voltaje de salida | 5V ~ 35V |
| Entrada de corriente | 4A (max) |
| Consumo a vacío | 18mA |
| Eficiencia de conversión | 94% aprox. |
| Frecuencia de conmutación | 400khz |
| Regulación de carga | ± 0,5% |

| | |
|-------------------------------|----------------------------|
| Regulación de voltaje | $\pm 0,5\%$ |
| Temperatura de funcionamiento | $-40^{\circ}, +80^{\circ}$ |
| Output Ripple | 50mV |

Tabla 4: *Parámetros del convertidor boost XL6009, (Anexo 2)[37].*

Fuente: *Los autores.*

▪ **Batería recargable**

La batería o acumulador recargable es un sistema que almacena energía en celdas electroquímicas. Existen varios tipos, tamaños, capacidades y aplicaciones desde equipos electrónicos pequeños hasta mantener instalaciones industriales en funcionamiento.

En la actualidad la necesidad de energía mediante las baterías recargables es imprescindible, en el caso de los dispositivos electrónicos portátiles como por ejemplo celulares, tablets, mp3, cámaras fotográficas, etc. La tecnología ha incursionado cada vez más para crear baterías de mayor duración y efectividad [30]. En la tabla 5 se presenta una comparación de los tipos de batería recargables existentes en el mercado.

| Tipo | Acido-plomo | Níquel-cadmio | Níquel-hidruro | Ion-litio | Polímero de litio |
|-----------------------------|-----------------------------|--|--|--|-----------------------------------|
| Símbolo | Pb | Ni-Cd | Ni-Mh | Li-ion | Li-Po |
| Ventajas | | Muy baja temperatura, alta tasa de descarga. | Mayor capacidad que Ni-Cd, mismo tamaño. | Alta tasa de descarga, larga vida útil, y tamaño reducido. | Tamaño reducido y larga vida útil |
| Limitaciones | Bastante grandes y pesadas. | Velocidad de descarga baja. | | Reacción violenta al agua. | |
| Costo Relativo | Bajo | Medio | Alto | Alto | Alto |
| Voltaje por Celda | 2V | 1.2V | 1.2V | 3.7V | 3.7V |
| Tiempo de carga | 8-16h | 10-14h | 2-4h | 2-4h | 1-1.5h |
| Eficiencia | 80% | 75% | 70% | >95% | No disponible |
| Duración de recargas | 1000 aprox. | 500 aprox. | 1000 aprox. | 4000 aprox. | 5000 aprox. |

| | | | | | |
|---|-------------|-------------|----------------|---------------|---------------|
| Tiempo de descarga/mes (% del total) | 5% | 30% | 20% | 6% | 6% |
| Potencia/peso | 30-40 Wh/kg | 50-80 Wh/kg | 60-120 Wh/kg | 110-160 Wh/kg | 100-130 Wh/kg |
| Sobrecarga | No soporta | Soporta | No recomendado | Soporta | Soporta |
| Descarga | No soporta | Necesaria | Recomendable | Fallo a -2.5V | Fallo a -2.5V |
| Memoria | Medio | Muy Alto | Bajo | Inexistente | Inexistente |

Tabla 5: Comparación de los tipos de batería recargables [31].

Si observamos en la tabla 5 los tipos de baterías de níquel-hidruro metálico y níquel-cadmio son una evolución de las baterías alcalinas y también son derivadas de ácidos de plomo. Las de ión-litio y polímero de litio son las mejores que hay en la actualidad porque muestra excelentes características y son la principal fuente energética de los aparatos electrónicos portátiles, gracias a que pueden almacenar más energía por unidad de volumen y peso [32].

En la figura 14 se observa la comparación de las baterías antes mencionadas, su densidad energética de los tipos de baterías recargables que se encuentra en el mercado con respecto a su tamaño y peso. Las baterías de ion y polímero de litio son las que tienen mejores prestaciones.

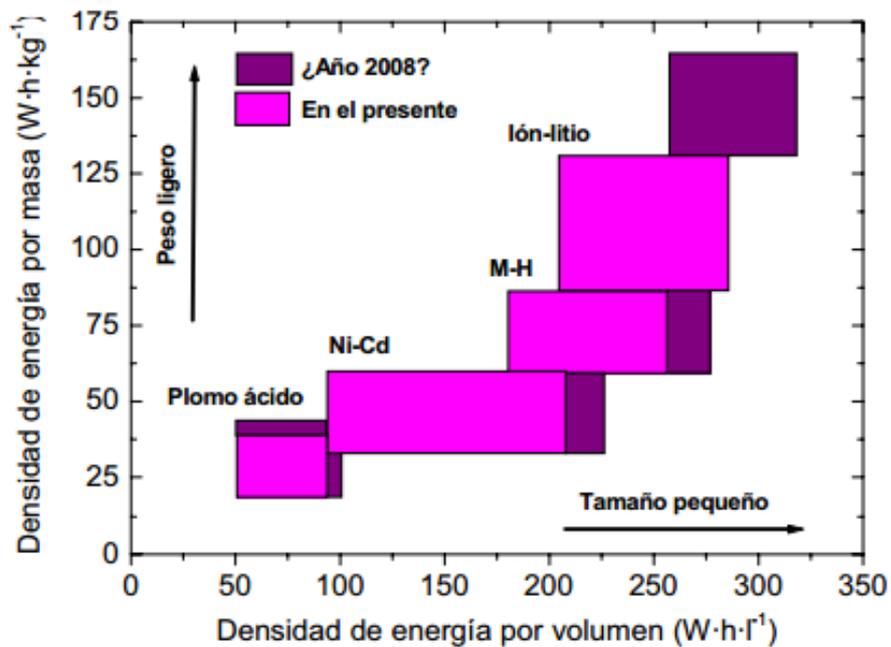


Figura 14: Densidad energética de los tipos de baterías recargables [32].

▪ Batería de polímeros de litio (LiPo)

Las baterías de polímeros de litio LiPo son similares al ion de litio, posee mayor densidad de carga, tamaño reducido y mayor duración de descarga.

Parámetros de las baterías de polímeros de litio (LiPo)

La figura 15 muestra la corriente de descarga que varía con la capacidad de la celda, si su capacidad aumenta existe la disminución de dicha corriente, por lo tanto su descarga tiene un efecto directo sobre la capacidad de la celda [33].

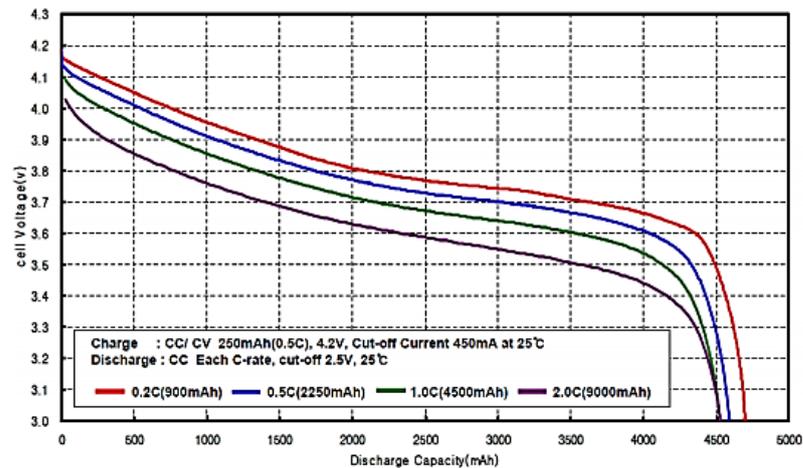


Figura 15: Curva característica de la batería LiPo en función de la corriente [33].

La temperatura afecta directamente a la capacidad como se observa en la figura 16, ésta disminuye con la disminución de la temperatura, además que este tipo de batería es más sensible a variaciones de temperatura que a variaciones de corriente [34,31].

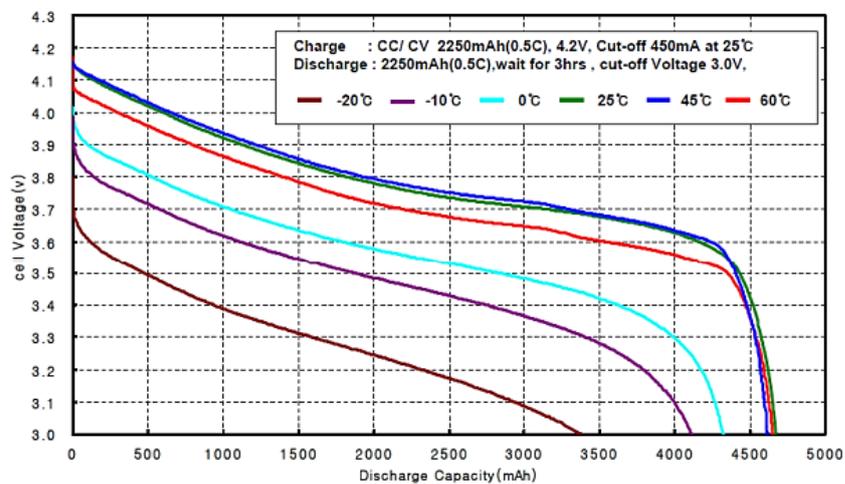


Figura 16: Prueba de capacidad para la batería LiPo con respecto a la temperatura [33].

Como todas las baterías tiene un número de ciclos limitados de carga y descarga. En la figura 17 se observa que su vida útil al final es de 500 ciclos aproximadamente y un 6% menor que la capacidad de una celda que está en el inicio de su vida útil [34].

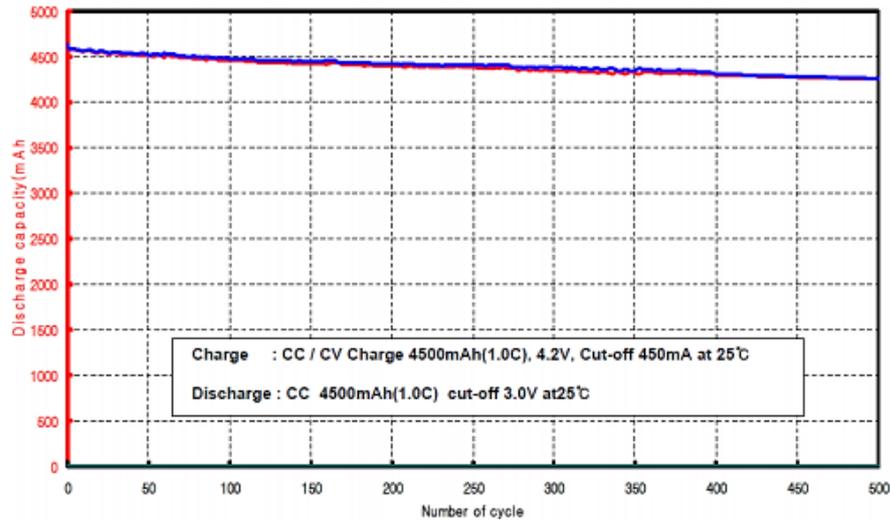


Figura 17: Prueba de capacidad de la batería de polímero de litio para determinar el ciclos de vida [33].

▪ Parámetros generales para las baterías recargables:

- Tensión

En una batería el voltaje es el primer parámetro a considerar, donde podemos verificar su potencial y suele estar en un rango de 1 a 4V por cada batería [34].

$$\mathbf{v} = \frac{d\mathbf{W}(t)}{dq(t)} \quad (1.2)$$

Dónde: \mathbf{v} es voltaje de la batería (V), \mathbf{W} es el trabajo (J), \mathbf{q} es la carga (C) y \mathbf{t} es el tiempo (s).

- **Corriente**

Es el segundo factor a considerar es la corriente máxima obtenible de la batería, es la tasa de cambio de la carga Q transferida a través de una sección transversal de un conductor [28].

$$I = \frac{dq(t)}{d(t)} \quad (1.3)$$

Dónde: I es la corriente (A), q es la carga (C) y t es el tiempo (s).

- **Carga Eléctrica**

Tercero se mide por referencia a los tiempos de carga y descarga con respecto a la corriente (A). La unidad SI es el culombio (C) [34].

$$Q = I * t = I * (t_h * 3600) \quad (1.4)$$

Dónde: Q es la carga eléctrica (C), I es la corriente (A), t es el tiempo (s) y t_h es el tiempo (h).

Por tanto, la carga eléctrica en las distintas unidades es:

$$1 Ah = 1000 mAh = 3600 C \quad 1 C = 1 Ah/3600 = 0,278 mAh$$

- **Energía**

La potencia de la batería depende de su capacidad y de su voltaje, se mide en Wh (vatios-hora), la unidad SI es el Julio (J) [34].

$$W = P * t = P * (t_h * 3600) \quad (1.5)$$

Dónde: W es la energía (Wh), P es la potencia (W), t es el tiempo (s) y t_h es el tiempo (h).

Por tanto las equivalencias entre unidades son:

$$1 Wh = 3600 J \quad 1 J = 0,278 mWh$$

CAPÍTULO 2. DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA

En este capítulo se presenta el proceso de diseño y construcción del prototipo de cargador eléctrico portátil en base a la cinemática de la articulación de la rodilla.

La Arquitectura del sistema se divide en bloques independientes, como se indica en la figura 18. Permitiendo el trabajo de varios componentes para su integración a un sistema final. Los bloques correspondientes se definen como:

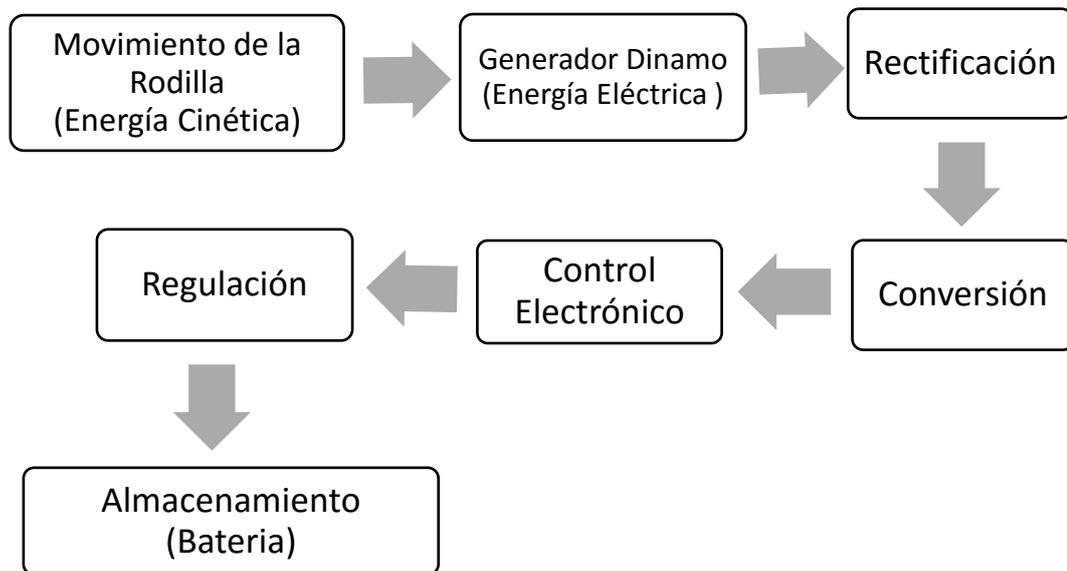


Figura 18: *Arquitectura del sistema.*

Fuente: *Los autores.*

2.1 Recolección de datos para trayectoria de la caminata

Se construyó un dispositivo para recolectar los datos del movimiento de la rodilla mediante un potenciómetro acoplado a esta articulación, el mismo que hace la función de sensor de ángulo conectado.

De esta manera tiene una salida de voltaje en función del ángulo o posición de la perilla, en la figura 19 se observa la calibración del mismo, usando una escala graduada. El potenciómetro tiene un rango muerto de giro, el cual no presenta

variación de voltaje de 0° a 20° y 284° a 298°, teniendo esto en cuenta se procede a tabular los valores (tabla 6).

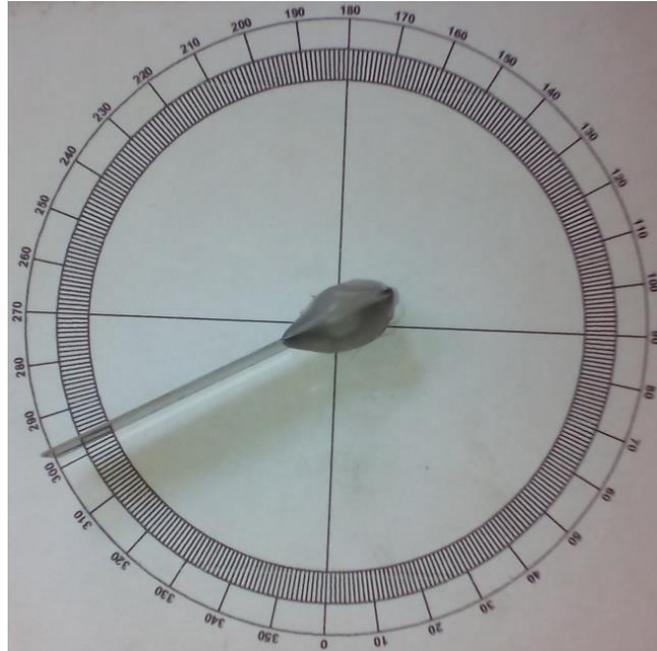


Figura 19: Potenciómetro acoplado a graduador de 360°.

Fuente: Los autores.

| | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---------|-----|-----|-----|------|------|------|-----|------|------|------|------|-----|------|------|------|-------|
| Angulo | 0 | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 | 80 | 90 | 100 | 110 | 120 | 130 | 140 | |
| Voltaje | 0 | 0 | 0 | 0,16 | 0,35 | 0,53 | 0,7 | 0,88 | 1,07 | 1,24 | 1,43 | 1,6 | 1,79 | 1,99 | 2,19 | |
| Angulo | 150 | 160 | 170 | 180 | 190 | 200 | 210 | 220 | 230 | 240 | 250 | 260 | 270 | 280 | 290 | 298 |
| Voltaje | 2,4 | 2,6 | 2,8 | 2,98 | 3,15 | 3,33 | 3,5 | 3,69 | 3,85 | 4,03 | 4,2 | 4,4 | 4,57 | 4,76 | 4,78 | 4,78 |

Tabla 6: Medición de voltaje en función del ángulo de salida.

Fuente: Los autores.

Con los valores obtenidos se plantea la siguiente relación matemática que describe el comportamiento del ángulo:

$$\text{voltaje} = 0.0184(\text{ángulo}) - 0.404 \quad (2.1)$$

$$\text{ángulo} = \frac{\text{voltaje} + 0.404}{0.0184}$$

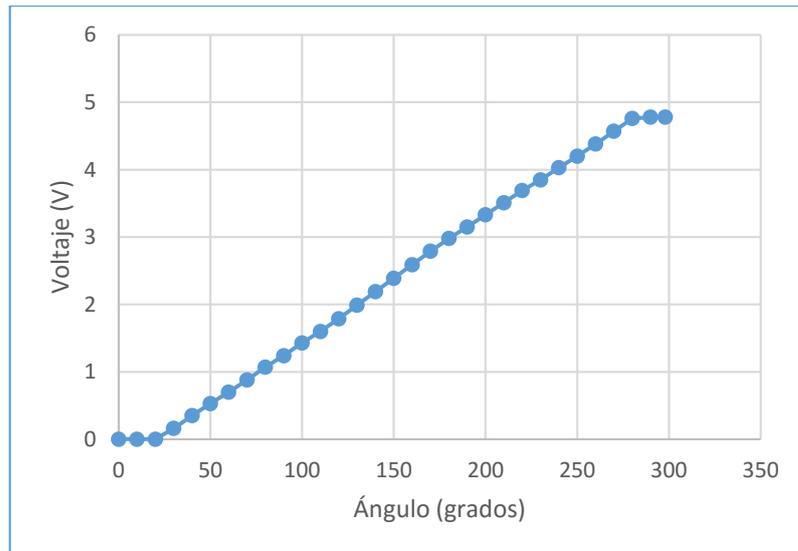


Figura 20: Curva de voltaje en función del ángulo.

Fuente: Los autores.

Se usó un potenciómetro acoplado a dos soportes para medir el ángulo de la rodilla y este se conecta a una tarjeta de adquisición de datos myDAQ (figura 21), el mismo que acopla a la pierna (figura 26). Para evitar el ángulo muerto del potenciómetro se lo colocó de tal manera que el valor inicial o ángulo cero de la rodilla sea a los 77° de giro de la perilla.

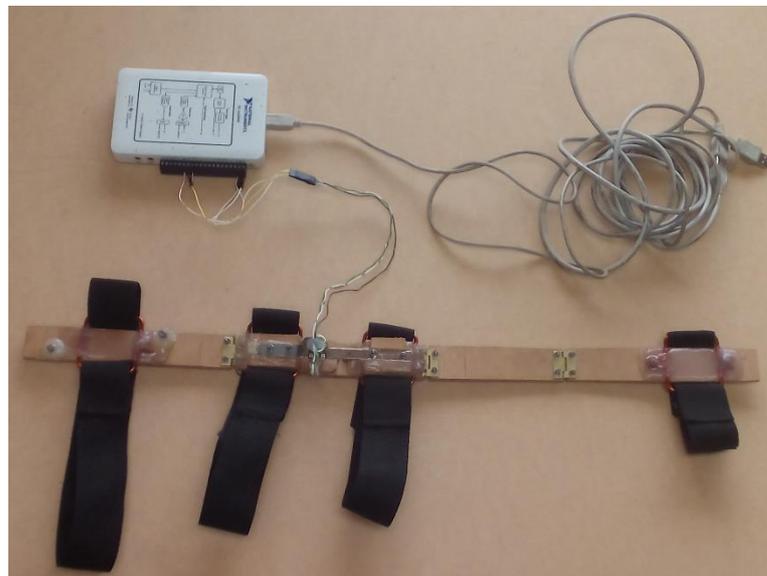


Figura 21: Dispositivo de adquisición de ángulo de caminata.

Fuente: Los autores.



Figura 22: Dispositivo de adquisición de trayectoria de ángulo de caminata colocado en una persona.

Fuente: Los autores.

Al implementar este sistema de adquisición se obtuvo la trayectoria de caminata de la persona en función del ángulo con respecto al tiempo, las trayectorias se observan en la figura 23 y 24.

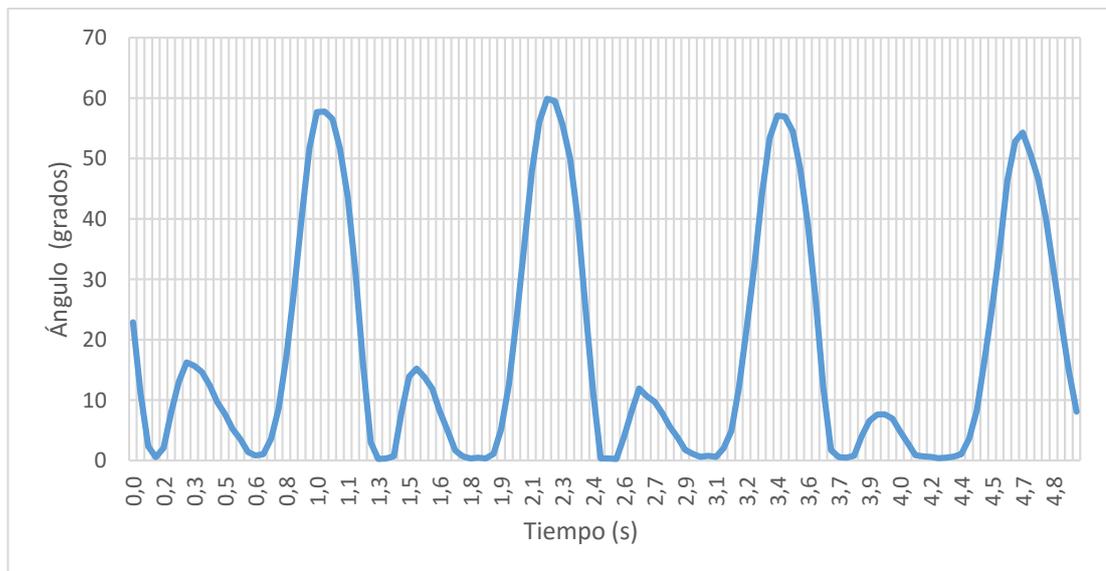


Figura 23: Trayectoria de caminata de sujeto 1.

Fuente: Los autores.

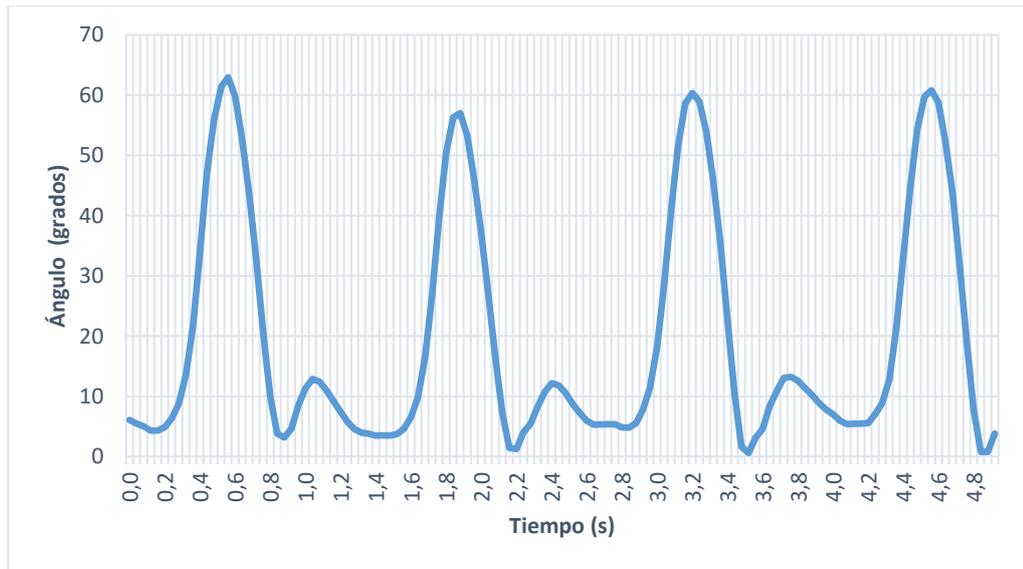


Figura 24: Trayectoria de caminata de sujeto 2.

Fuente: Los autores.

2.2 Construcción de un dispositivo para simular la caminata humana.

Con los datos obtenidos anteriormente se procede a construir un dispositivo para simular la caminata y probar los generadores. Se procede de esta manera para que las pruebas no tengan errores de velocidad o fuerza, manteniendo estos parámetros constantes, este dispositivo consta de un motor DC con su respectiva caja de engranes (figura 25) con una fuente conmutada y controlado por un arduino.

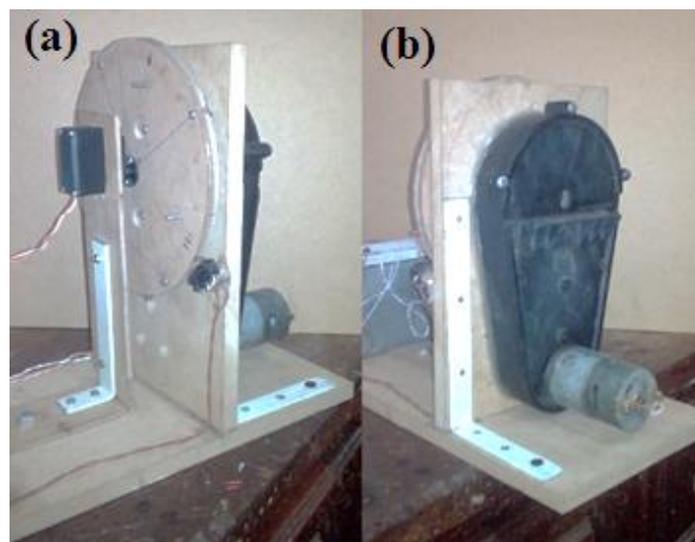


Figura 25: Dispositivo de simulación del movimiento de la rodilla. a) Vista frontal, b) Vista lateral.

Fuente: Los autores.

2.3 Análisis del generador.

1. Motor alvensa y un servomotor MG995.

En el caso de la dinamo se aplicará un método de prueba y error hasta encontrar el generador más adecuado tanto en tamaño, peso y eficiencia. Además teniendo en cuenta las limitaciones del mercado local.

Inicialmente se seleccionó dos motores que presentaban las mejores características:

- Motor alvensa AC con imán permanente (figura 26a), usado comúnmente en microondas y bases giratorias para mostrador, al moverlo genera una tensión AC de 80Vac a vacío y frecuencia proporcional a la velocidad angular del eje.
- Servo-motor MG995 (figura 26b) sin controlador interno, que al mover el eje genera un voltaje DC proporcional a la velocidad, aproximadamente de 8V a vacío.



Figura 26: Motores usados para la primera prueba: a) Alvensa, b) Servomotor MG995.

Fuente: Los autores.

A estos motores se los colocó en el dispositivo de simulación de caminata humana y obtuvimos los siguientes datos (tabla 7 y 8). Esta prueba nos permitió contrastar el funcionamiento de los motores como generadores.

| | | | | | | | | | |
|--------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Carga (Ω) | 10000 | 1000 | 330 | 100 | 47 | 20 | 10 | 1,8 | 0,47 |
| Voltaje (V) | 9,2034 | 3,1656 | 1,0620 | 0,3342 | 0,1474 | 0,0633 | 0,0330 | 0,0057 | 0,0016 |
| Corriente (A) | 0,0009 | 0,0032 | 0,0032 | 0,0033 | 0,0031 | 0,0032 | 0,0033 | 0,0031 | 0,0034 |
| Potencia (P) | 0,0085 | 0,0100 | 0,0034 | 0,0011 | 0,0005 | 0,0002 | 0,0001 | 0,0000 | 0,0000 |

Tabla 7: Potencia generada por motor AC alvensa.

Fuente: Los autores.

| | | | | | | | | |
|--------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Carga (Ω) | 1000 | 330 | 100 | 47 | 20 | 10 | 1,8 | 0,47 |
| Voltaje (V) | 2,598 | 2,435 | 2,324 | 2,124 | 1,780 | 1,392 | 0,461 | 0,142 |
| Corriente (A) | 0,003 | 0,007 | 0,023 | 0,045 | 0,089 | 0,139 | 0,256 | 0,302 |
| Potencia (W) | 0,007 | 0,018 | 0,054 | 0,096 | 0,159 | 0,194 | 0,118 | 0,043 |

Tabla 8: *Potencia generada por motor DC MG995.*

Fuente: *Los autores.*

Las pruebas nos mostraron que los voltajes con carga caen a valores muy bajos, y dado que los motores son de imán permanente no se puede variar el flujo de campo magnético, por lo que la única opción que queda es incrementar la velocidad de giro del eje. Para incrementar la velocidad en el eje se usó un taladro de mano (figura 27a), que tiene una relación de conversión de 3.6:1, lo que quiere decir que un giro de rodilla máximo (en caminata normal) de 70° se incrementa a 252° a la salida.

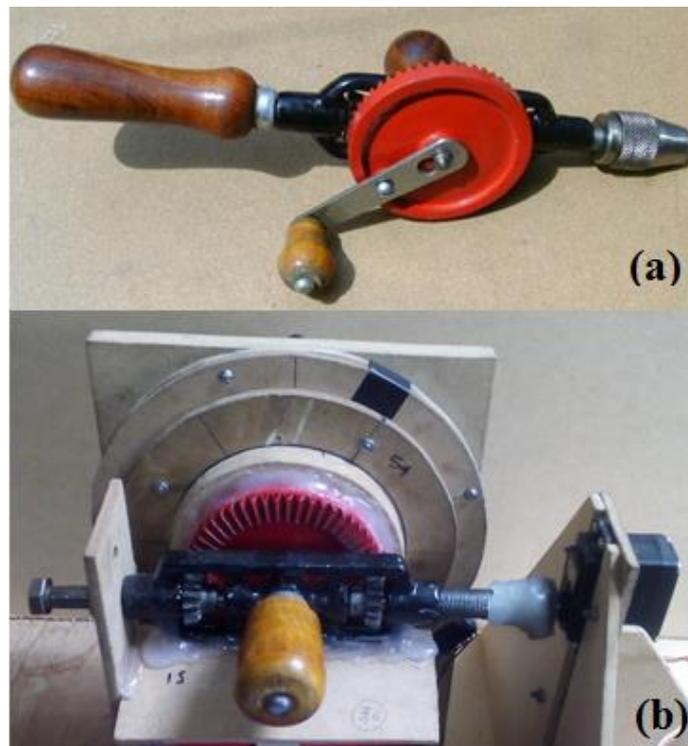


Figura 27: *a) Taladro manual. b) Sistema acoplado al dispositivo de simulación del movimiento de la rodilla.*

Fuente: *Los autores.*

Como se muestra en la figura 27b se retiró algunos de los componentes del taladro para reducir el peso del mismo, además en este punto el taladro es provisional ya que el peso de los engranes metálicos es alto, para ello se reemplazó el engrane más grande por un material más liviano.

2. Motor DC MG995 con y sin el sistema de engranes de taladro manual.

Se realizaron pruebas en los generadores, con y sin el sistema de engranajes y se realizó una comparación de parámetros obtenidos, como voltaje, corriente y potencia. También se usó distintos valores de resistencias para obtener el comportamiento con diferentes cargas. En la tabla 9 se observa el comportamiento del motor MG995 sin el sistema de engranajes del taladro manual, se puede observar que la potencia máxima generada es de 0.1939W.

| Carga (Ω) | Voltaje (V) | Corriente (A) | Potencia (W) |
|--------------------|-------------|---------------|--------------|
| 1000 | 2,5984 | 0,0026 | 0,0068 |
| 330 | 2,4349 | 0,0074 | 0,0180 |
| 100 | 2,3240 | 0,0232 | 0,0540 |
| 47 | 2,1242 | 0,0452 | 0,0960 |
| 20 | 1,7805 | 0,0890 | 0,1585 |
| 10 | 1,3924 | 0,1392 | 0,1939 |
| 1,8 | 0,4610 | 0,2561 | 0,1181 |
| 0,47 | 0,1418 | 0,3018 | 0,0428 |

Tabla 9: Potencia generada por el motor DC MG995 sin engranes.

Fuente: Los autores.

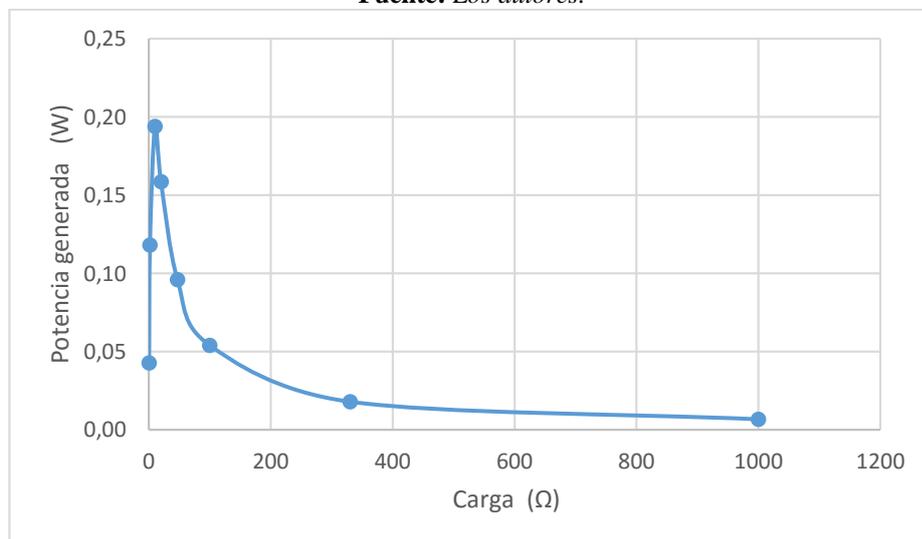


Figura 28: Curva de potencia del generador sin engranes del motor DC MG995.

Fuente: Los autores.

La siguiente prueba es con el sistema de engranes del taladro manual, que se obtiene los datos mostrados en la tabla 10 y figura 29, para este caso la potencia máxima es de 0.5686W.

| Carga (Ω) | Voltaje (V) | Corriente (A) | Potencia (W) |
|--------------------|-------------|---------------|--------------|
| 1000 | 7,0947 | 0,0071 | 0,0503 |
| 330 | 5,5735 | 0,0169 | 0,0941 |
| 100 | 6,0963 | 0,0610 | 0,3717 |
| 47 | 5,1697 | 0,1100 | 0,5686 |
| 20 | 3,2729 | 0,1636 | 0,5356 |
| 10 | 2,2928 | 0,2293 | 0,5257 |
| 1,8 | 0,4794 | 0,2663 | 0,1277 |
| 0,47 | 0,1695 | 0,3606 | 0,0611 |

Tabla 10: Potencia generada por el motor DC MG995 con engranes de taladro.

Fuente: Los autores.

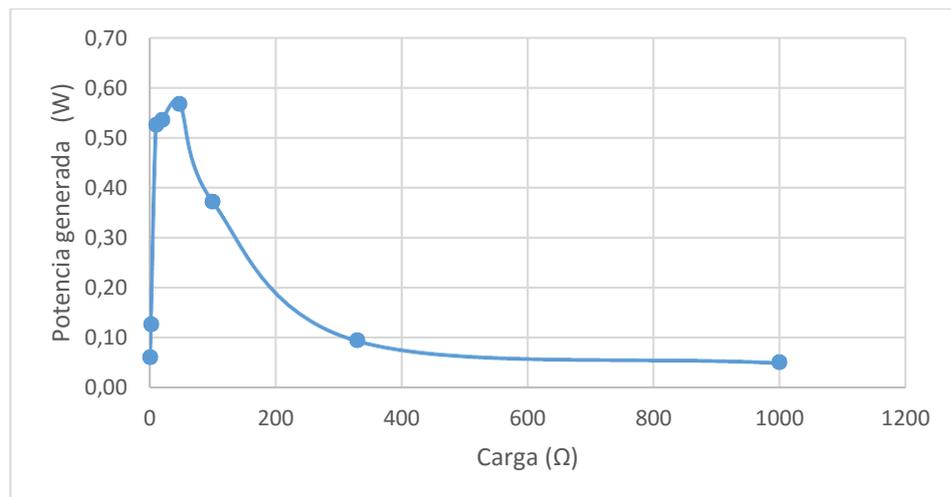


Figura 29: Curva de potencia del generador con engranes del motor DC MG995.

Fuente: Los autores.

Con estas pruebas se obtiene que al aplicar más engranes al sistema se incrementa la velocidad de giro del rotor del generador, obteniendo así un incremento en la tensión generada.

3. Motor a pasos con el sistema de engranes del taladro manual.

Se analizó de igual manera un motor a pasos para ver su potencia generada con el sistema de simulación de caminata y engranes del taladro manual, en la tabla 11 se

observa la comparación de las potencias. Teniendo como máximo una potencia genera de 0,296W.

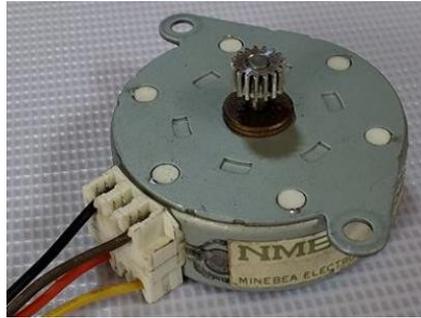


Figura 30: Motor a pasos.

Fuente: Los autores.

| Carga (Ω) | Voltaje (V) | Corriente (A) | Potencia (W) |
|--------------------|-------------|---------------|--------------|
| 1000 | 17,204 | 0,017 | 0,296 |
| 330 | 9,868 | 0,030 | 0,295 |
| 100 | 5,381 | 0,054 | 0,290 |
| 47 | 3,465 | 0,074 | 0,255 |
| 20 | 1,907 | 0,095 | 0,182 |
| 10 | 1,104 | 0,110 | 0,122 |
| 1,8 | 0,241 | 0,134 | 0,032 |
| 0,47 | 0,090 | 0,192 | 0,017 |

Tabla 11: Potencia generada por el Motor a Pasos.

Fuente: Los autores.

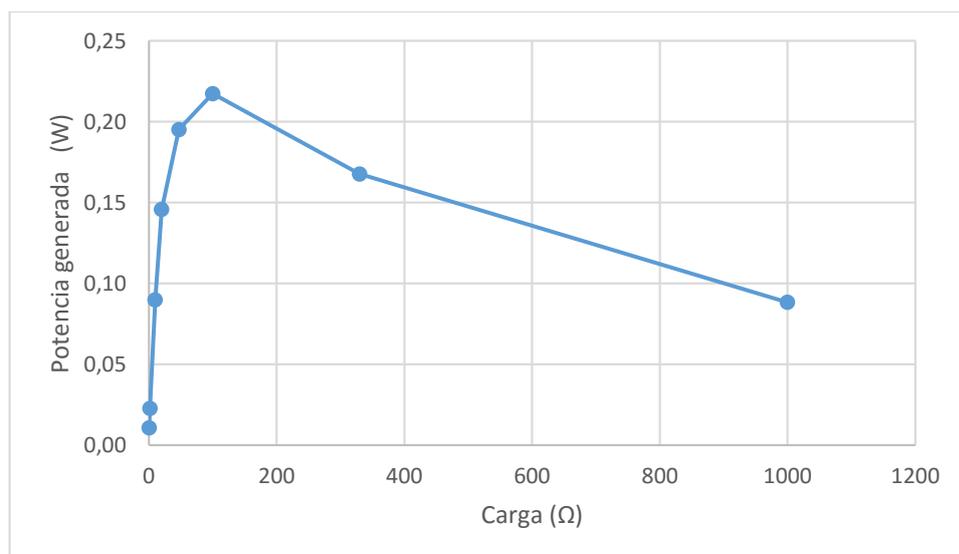


Figura 31: Curva de potencia del generador con el Motor a Pasos

Fuente: Los autores.

4. Motor DC copal LC 30G – 191 con el sistema de engranes de taladro manual.

De igual manera se analizó la potencia que genera un Motor DC copal LC 30G – 191 (figura 32), en la tabla 12 se observa los resultados, el valor máximo que se obtiene es de 0,311W.



Figura 32: Motor copal LC30G.
Fuente: Los autores

| Carga (Ω) | Voltaje (V) | Corriente (A) | Potencia (W) |
|--------------------|-------------|---------------|--------------|
| 1000 | 6,615 | 0,007 | 0,044 |
| 330 | 6,615 | 0,020 | 0,133 |
| 100 | 4,995 | 0,050 | 0,249 |
| 47 | 3,821 | 0,081 | 0,311 |
| 20 | 2,371 | 0,119 | 0,281 |
| 10 | 1,569 | 0,157 | 0,246 |
| 1,8 | 0,393 | 0,218 | 0,086 |
| 0,47 | 0,170 | 0,362 | 0,062 |

Tabla 12: Potencia generada por el motor DC copal LC 30G.
Fuente: Los autores.

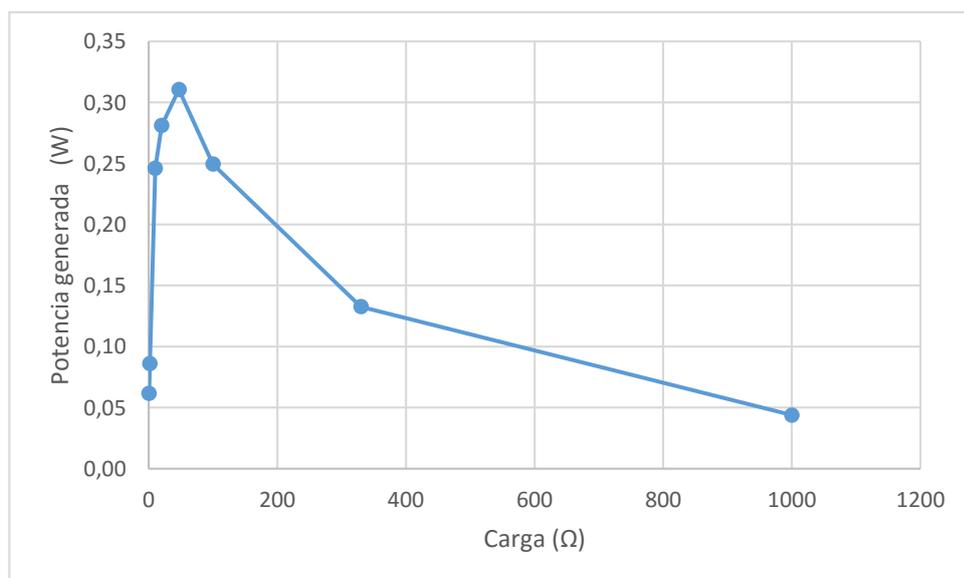


Figura 33: Curva de potencia del generador con el motor DC copal LC 30G.
Fuente: Los autores.

2.4 Construcción del prototipo mecánico para el usuario.

Para que el usuario pueda usar el prototipo se construyó un dispositivo mecánico que transfiera el movimiento angular de la rodilla al eje del generador. En primera instancia se planteó utilizar una rodillera Aurik que brinda soporte a rodillas débiles o traumatizadas (Gonartrosis y Gonartitis), además de que posee un par de soportes metálicos articulados que guían el movimiento de la rodilla.



Figura 34: Rodillera Aurik.

Fuente: Los autores



Figura 35: Soportes metálicos de la rodillera: a) Vista superior, b) Vista posterior.

Fuente: Los autores

Se monta el generador (motor DC copal LC 30G) a una de las guías metálicas como se observa en la figura 36 con el sistema de engranes del taladro manual.



Figura 36: *Acoplamiento del generador del motor DC copal LC 30G en el soporte metálico de la rodillera: a) Vista superior, b) Vista posterior.*

Fuente: *Los autores*

Procedemos a colocar en la rodillera Aurik el sistema mecánico que transfiere el movimiento angular de la rodilla al eje del generador como se observa en la figura 37.

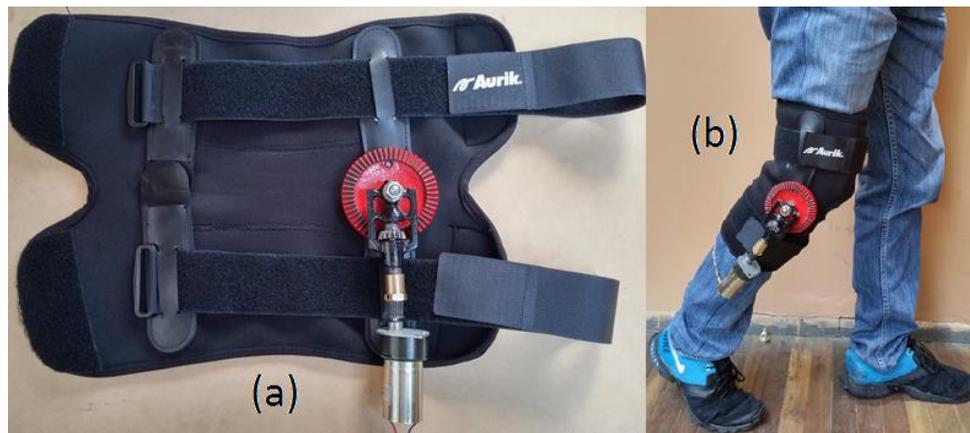


Figura 37: *a) Acoplamiento del generador en el soporte metálico de la rodillera: b) Colocado en el usuario.*

Fuente: *Los autores.*

En la figura 37b se observa el primer prototipo colocado, pero este diseño presenta una falla de estabilidad, la tela de neopreno es elástica y al momento de caminar esta se estira reduciendo el ángulo de giro del soporte metálico. Por esta razón se decidió modificar el prototipo haciendo más largo al soporte metálico.

Para aumentar la longitud se utilizó extensiones de aluminio, además se colocan bisagras para dar mayor ergonomía (figura 38a). Buscando evitar lesiones se añade una capa de neopreno sobre la estructura (figura 38b).

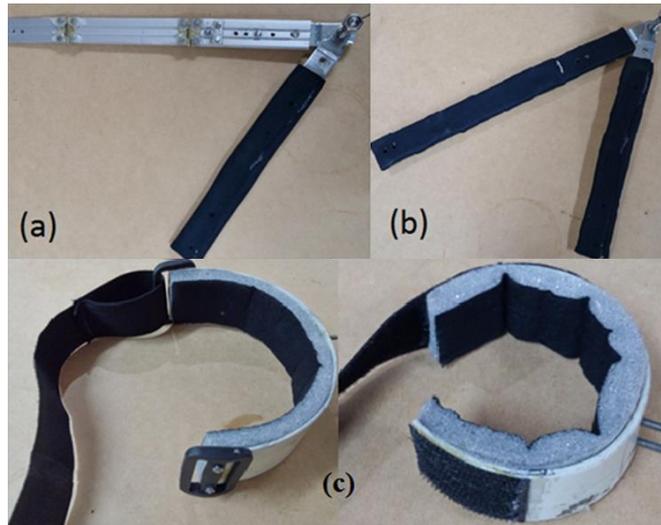


Figura 38: Estructura modificada: a) Aumento de extensiones de aluminio y bisagras, b) Neopreno, c) Abrazaderas en plástico.

Fuente: Los autores.

Se construyó cuatro abrazaderas de plástico PVC como se observa en la figura 38c con el objetivo de dar mayor estabilidad o agarre del sistema mecánico a la pierna durante la caminata. Se reemplazó al engrane central metálico en vista que el peso es alto, para ello se usó un material más liviano, barras de nailon, que son usadas para construir engranes más livianos y así reducir peso.

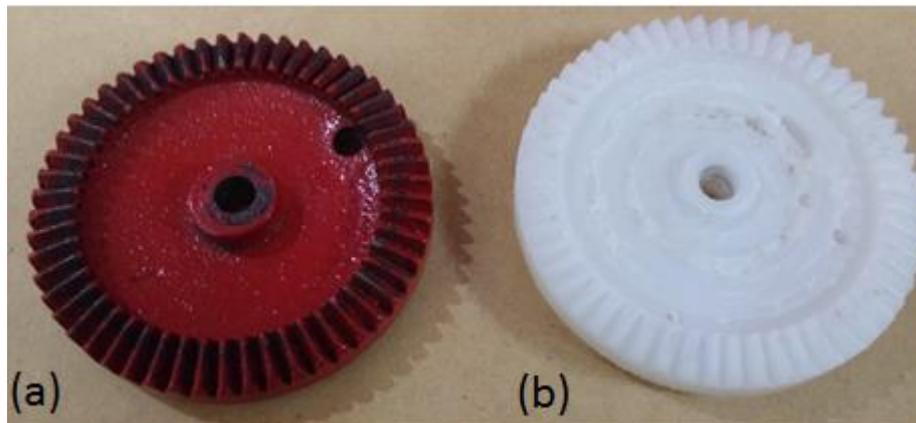


Figura 39: Engranaje Central: a) Metálico, b) Nailon.

Fuente: Los autores.

Finalmente se ensambla la estructura del prototipo mecánico como se observa en la figura 40 con las extensiones de aluminio forradas de neopreno, abrazaderas y el engranaje central de nailon. También se añadió una caja plástica para colocar el generador y su respectivo circuito electrónico.



Figura 40: Estructura del prototipo.

Fuente: Los autores.

2.5 Análisis de carga de la batería 250mAh de LiPo con fuente eléctrica.

Antes de empezar con el acondicionamiento del voltaje entregado por el generador se necesita entender qué tipo de señal de voltaje requiere, además de los tiempos de carga para la celda de la LiPo usada.

Se tiene una batería de 250mAh de LiPo (Anexo 3), según la hoja de especificaciones necesita un voltaje máximo de 4.2V para su carga, se realizó el circuito con un regulador (figura 41) y se procedió a conectar la batería completamente descargada y para obtener los datos de voltaje y corriente desde su inicio como se muestra en la figura 42 y 43 respectivamente.

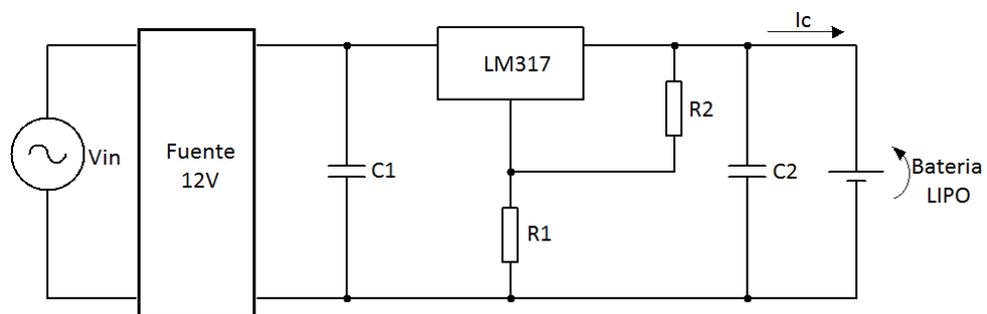


Figura 41: Circuito utilizado para la carga de batería.

Fuente: Los autores.

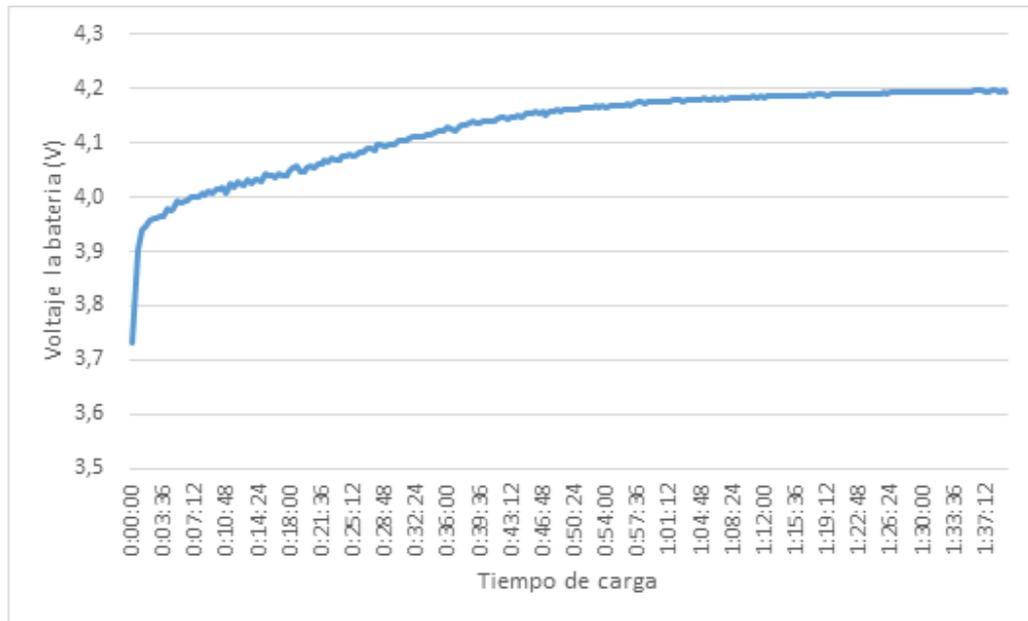


Figura 42: Voltaje durante la carga normal de la batería.

Fuente: Los autores.

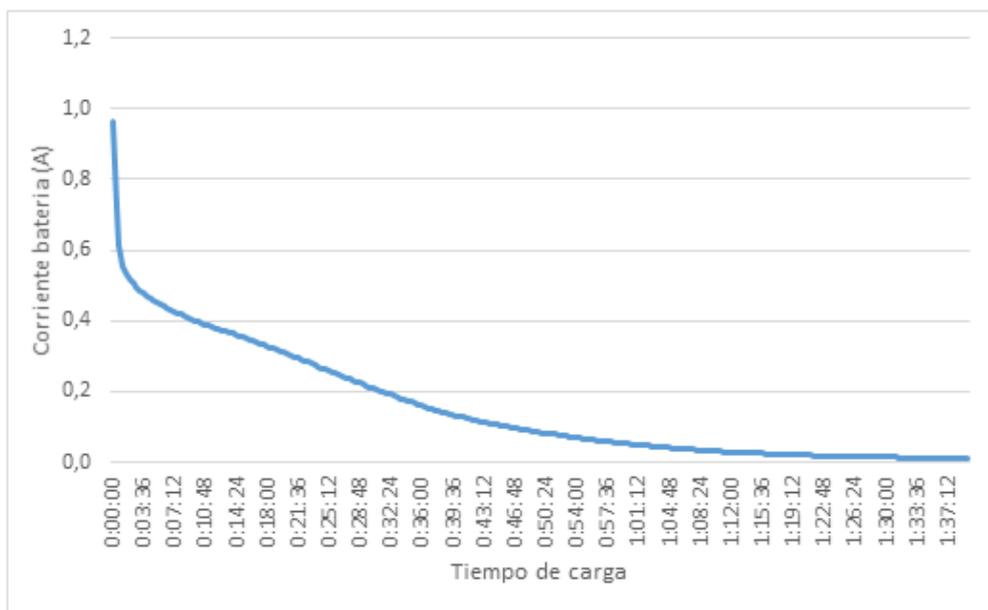


Figura 43: Comportamiento de la corriente durante la carga normal.

Fuente: Los autores.

Según la hoja de especificaciones este tipo de baterías funcionan desde los 3.6V hasta los 4.2V, teniendo cuidado de no descargar la batería a menos del rango inferior ya que esto produce el deterioro o desgaste prematuro de la batería y con más precaución de no superar el voltaje máximo ya que esta puede explotar.

2.6 Acondicionamiento de la Señal.

Para usar el voltaje generado se tiene que pasar por algunos procesos, ya que primeramente se tiene que el movimiento de la rodilla es oscilante (figura 44)

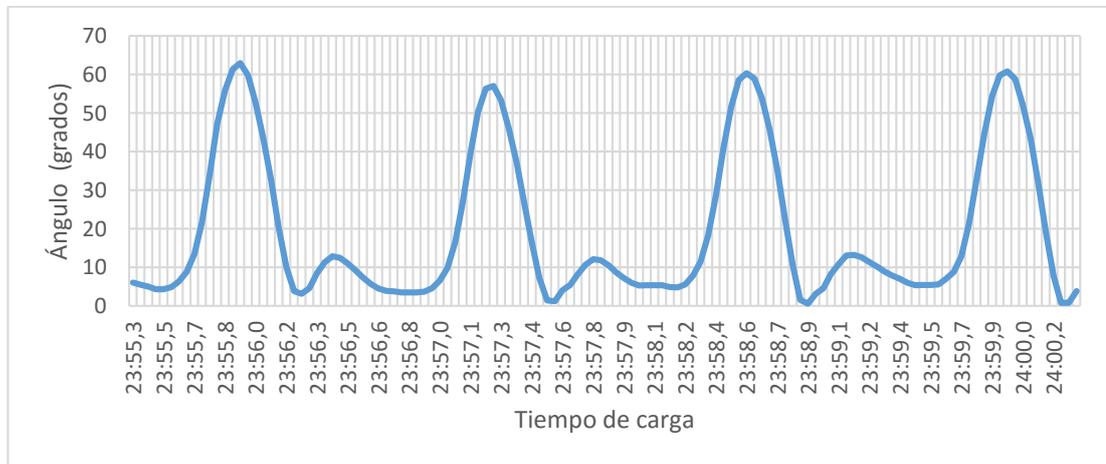


Figura 44: Trayectoria de caminata, ángulo en función del tiempo.

Fuente: Los autores.

Lo que genera un voltaje AC, como se observa en la figura 45, con valores positivos y negativos.

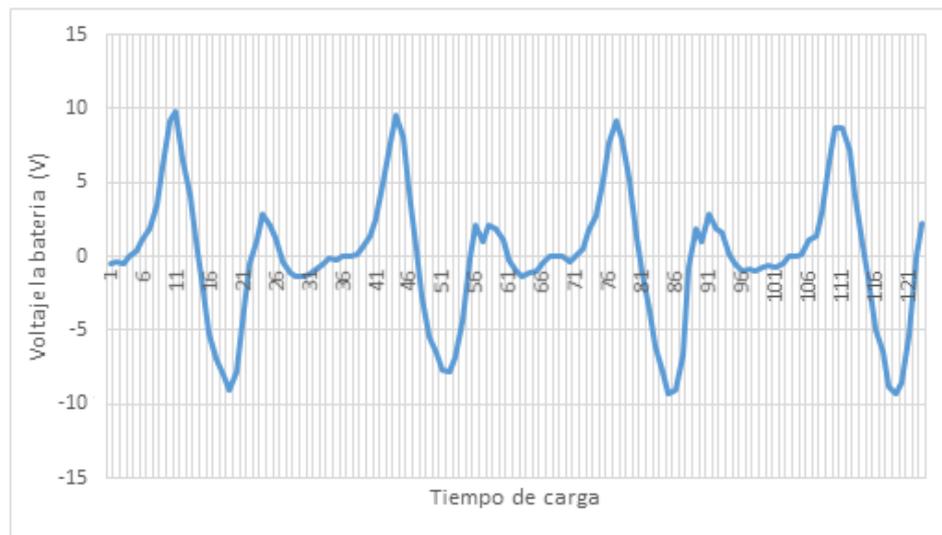


Figura 45: Voltaje generado en función de la caminata.

Fuente: Los autores.

Por esta razón es que se necesita rectificar la onda, para aprovechar el ciclo negativo de la onda.

▪ Rectificación

Se decidió aplicar un rectificador de onda completa, puente de Graetz, que consta de 4 diodos. Se adquirió diodos de silicio que se encuentran en el mercado y son los más comunes, tienen un voltaje de polarización directa de 0.7V. En una configuración puente de Graetz la caída de tensión es de 1.4V ya que se tiene dos diodos conduciendo al mismo tiempo.

Al observar esta caída de tensión del silicio optamos por cambiar a los diodos de germanio schottky, tienen una tensión de polarización directa de 0.3V por diodo, por lo tanto en el puente de Graetz la caída de tensión es de 0.6V.

▪ Regulación de voltaje con LM 317

El regular LM 317 nos entrega una salida de voltaje estable, la diferencia entre V_i y V_o , tiene que estar en un rango de 1.2V hasta 1.3V, es decir que si necesitamos un voltaje fijo de 4.2V debe ingresar mínimo 5.4V.

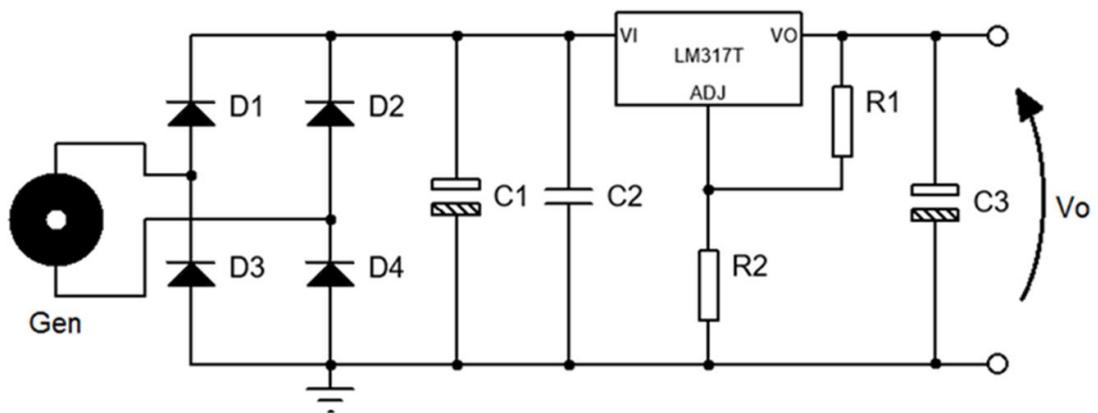


Figura 46: Circuito básico para la carga.

Fuente: Los autores.

Se realizó una prueba con el esquema de la figura 46, y aplicando un giro continuo al generador de una velocidad de 2.83 rad/s, que representa el valor máximo de velocidad medido durante las pruebas de caminata obteniendo el resultado mostrado en la figura 47.

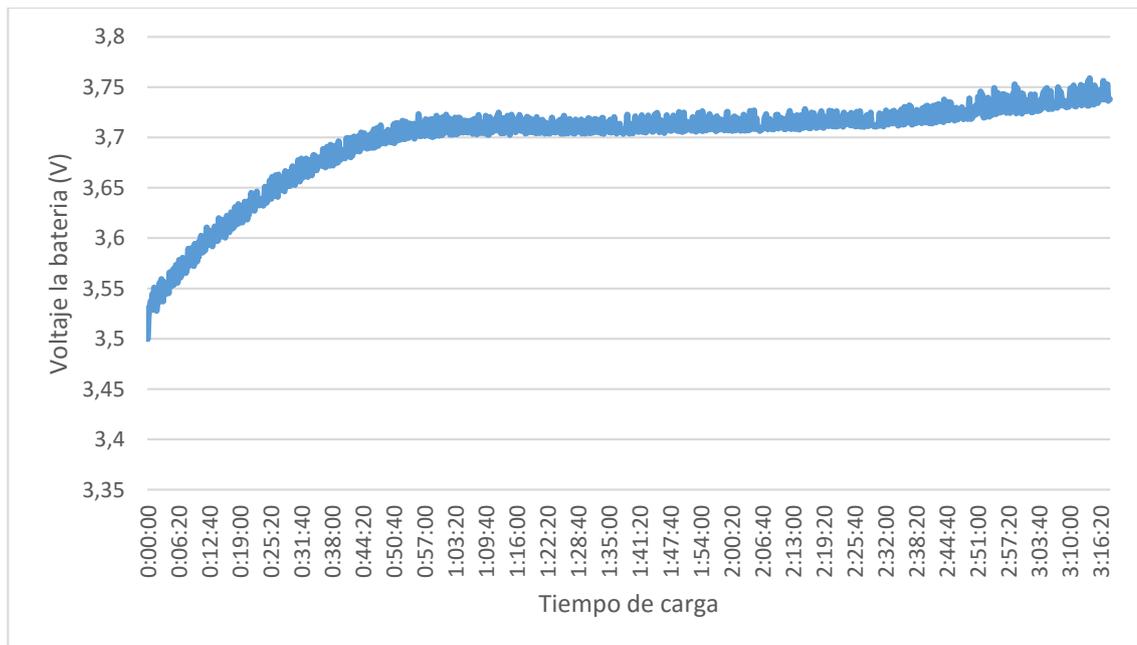


Figura 47: Señal de voltaje mediante la carga parcial.

Fuente: Los autores

Obtiene una variación o carga de 0.23V en un periodo de 3h18, con el generador a esta velocidad se tiene una corriente de 0,011A.

▪ Capacitores para respaldo de energía

Según la hoja de datos de la batería, para obtener una carga más rápida y eficiente se necesita que en sus bornes llegue un valor de 4.2V, por lo que se con aumento más la capacitancia en C1 (figura 46), para que este almacene la energía generada y al llegar a un nivel específico se conecte la batería, para que reciba un voltaje de 4.2V.

Esto se lo propuso partiendo del concepto de que la carga de un capacitor es proporcional al voltaje [38].

$$q = Cv \quad (2.2)$$

Dónde: q es la carga (C), C es la capacitancia (F) y v es el voltaje (V).

Podemos observar en la ecuación anterior que para tener una carga mayor se necesita una capacitancia o voltaje alto, de esto se propone usar un capacitor

relativamente grande, físicamente tenemos un límite en tamaño, ya que el circuito tiene que ir dentro de la caja plástica (figura 40) por que se propone el uso de dos condensadores en paralelo de $4700\mu\text{F}$ [40].

- Además se tiene una relación de corriente en función del tiempo

$$i = \frac{q}{t} \quad (2.3)$$

Donde: i es la corriente (A), q es la carga (C) y t es el tiempo.

- De lo cual se puede sacar una relación más completa

$$q = it \quad (2.4)$$

$$it = q = Cv$$

$$it = Cv$$

▪ Programa del controlador.

Como se tiene un sistema más complejo se necesitó de un controlador que haga posibles las funciones planteadas. Se propuso el uso de un Arduino Pro mini de 3.3V (figura 12) ya que por su tamaño y versatilidad es la opción más viable además de un consumo de corriente relativamente bajo (6mA) para su funcionamiento.

En el punto anterior se plantea colocar un capacitor que almacene la energía por un periodo de tiempo pequeño y cuando alcance un valor esta energía sea transferida a la batería. El controlador supervisa este valor de tensión, pero este funciona con 3.3V, se tiene que escalar el voltaje a medir. Para esto usamos un divisor de tensión con valores óhmicos altos y así evitar el consumo de corriente (figura 48).

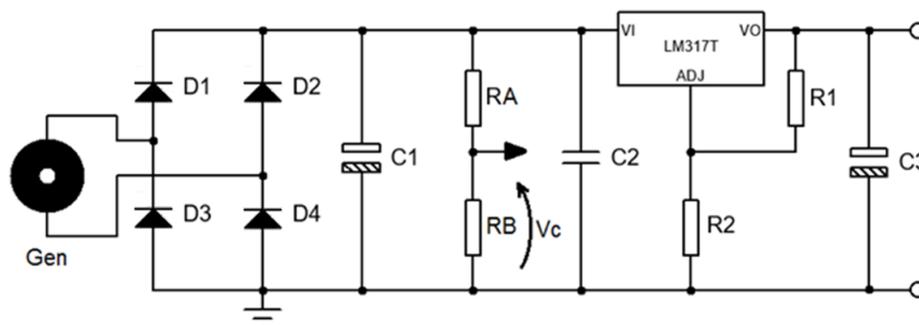


Figura 48: Circuito del cargador con resistencias de divisor de tensión.

Fuente: Los autores.

En la resistencia RA se colocó un valor óhmico de $1M\Omega$ y en RB $50k\Omega$, sumando los valores en serie se tiene un equivalente de $1050k\Omega$ y así se tiene una corriente menor a $20\mu A$. Con estos valores el voltaje en RB es $1/21$ del voltaje del capacitor C1, de este modo se tiene a escala el valor de voltaje y el controlador lo puede leer sin problema. Se puede ver un diagrama esquemático del funcionamiento del programa (figura 49).

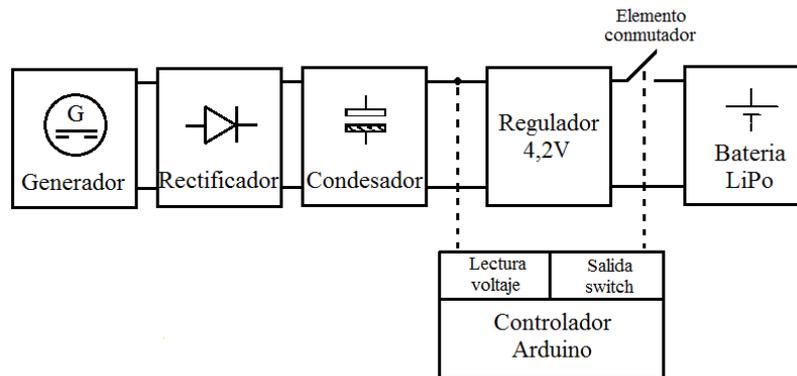


Figura 49: Esquema de bloques del sistema.
Fuente: Los autores.

En la figura 50 se observa el esquema descriptivo del funcionamiento del sistema planteado. Cuando empieza el movimiento del generador se tiene que el voltaje alcanza un valor de voltaje de capacitor máximo (V_{cmax}), el nivel está programado en el controlador, en este punto se conecta la batería extrayendo la carga, esto se lo hace hasta que la tensión en los condensadores caiga a $6V$, lo que garantiza que en la entrada del regulador tenga un valor suficiente para mantener un nivel de voltaje estable.

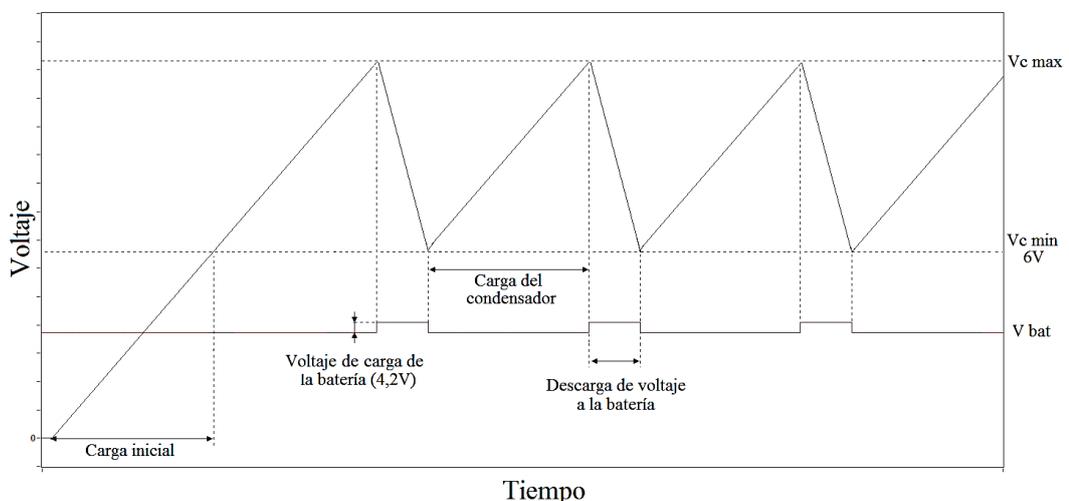


Figura 50: Esquema descriptivo del voltaje con los capacitores.
Fuente: Los autores

Para obtener el valor máximo de tensión en los capacitores, se programa un giro continuo al generador, la velocidad máxima de giro de la rodilla (2.83rad/s), esto se lo hace con todo el circuito conectado, pero sin batería, obteniendo los datos de la figura 51.

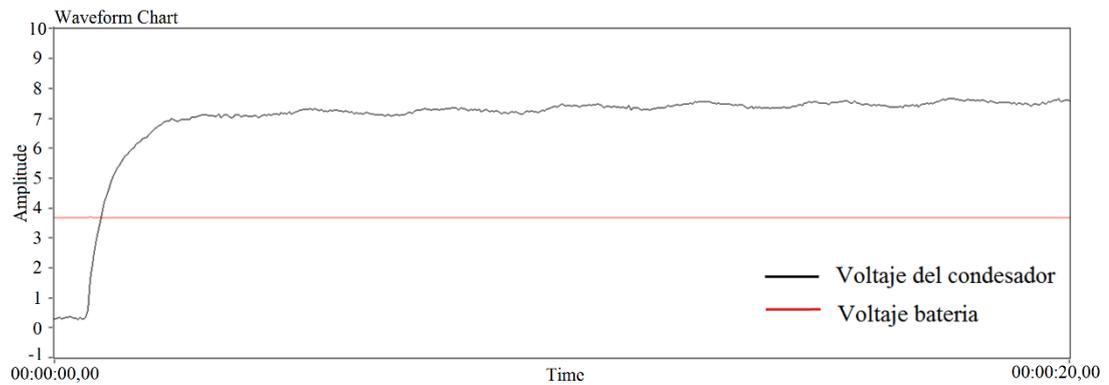


Figura 51: Voltaje obtenido del generador con condensadores y sin batería.

Fuente: Los autores.

Con la ayuda de la tarjeta myDac se sacó una tabla de valores, de los cuales el promedio es 7.744V, que es la tensión promedio que se alcanza. Con el dato de tensión anterior se procede a programar en arduino el sistema establecido en la figura 51, obteniendo el resultado que indica en la figura 52.

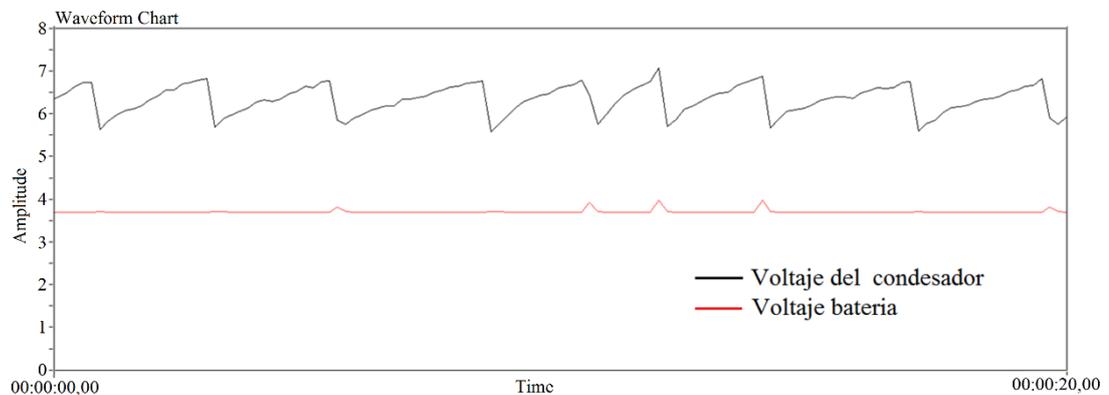


Figura 52: Voltaje en los capacitores para la carga en la batería.

Fuente: Los autores

Para esta prueba inicial se programó en el controlador un valor V_{cmax} de 7V y V_{cmin} de 5.5V y se lo aplicó en una caminata simulada de 2 horas, sin tener una variación significativa en la carga de la batería, por lo que verificó detalladamente los valores de carga en la batería.

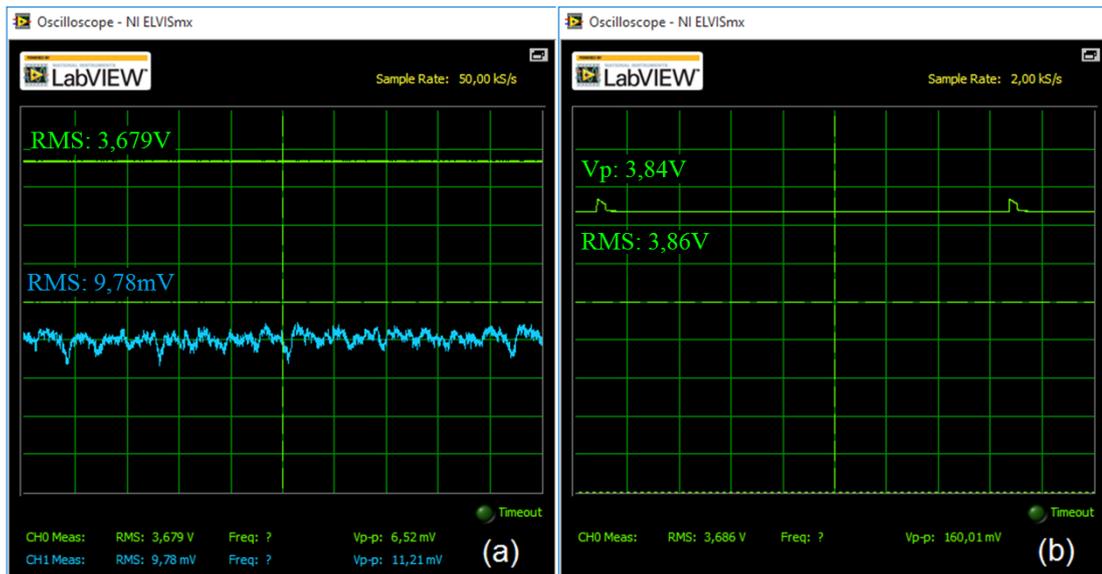


Figura 53: (a) Señal de corriente invertida, (b) Voltaje pulsante en la batería.

Fuente: Los autores

Para obtener la corriente se usó una resistencia de 0.47Ω como sensor (figura 54), en la cual se midió el voltaje de la misma (figura 53a) y por medio de la ley de ohm se calculó 20.80mA entregados por el generador, lo que produce un pulso de voltaje de 3.846V durante 43.47ms .

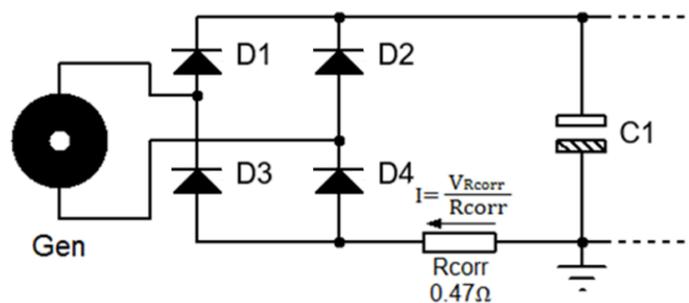


Figura 54: Configuración para medir la corriente entregada por el generador.

Fuente: Los autores.

Ocupando las ecuaciones de los capacitores tenemos lo siguiente.

$$t = \frac{Cv}{i} \quad (2.5)$$

$$t = \frac{(9400\mu F)(6.8V)}{20.8\text{mA}}$$

$$t = 3.07\text{s}$$

Se tiene que se va a llegar al voltaje programado en aproximadamente 3.07 s .

▪ Modulo regulador elevador (Boost).

Un regulador elevador Boost (figura 55a) tiene una salida de voltaje mayor que la entrada, utiliza un MOSFET para intercambiar de modos. En el modo 1 (figura 55b) el transistor se cierra haciendo que fluya una corriente máxima por el inductor cargando al mismo, en el modo 2 (figura 55c) se abre el transistor, conectando el inductor en serie a la fuente, lo que hace que la tensión se sume llegando un voltaje más alto al capacitor y a la carga [39].

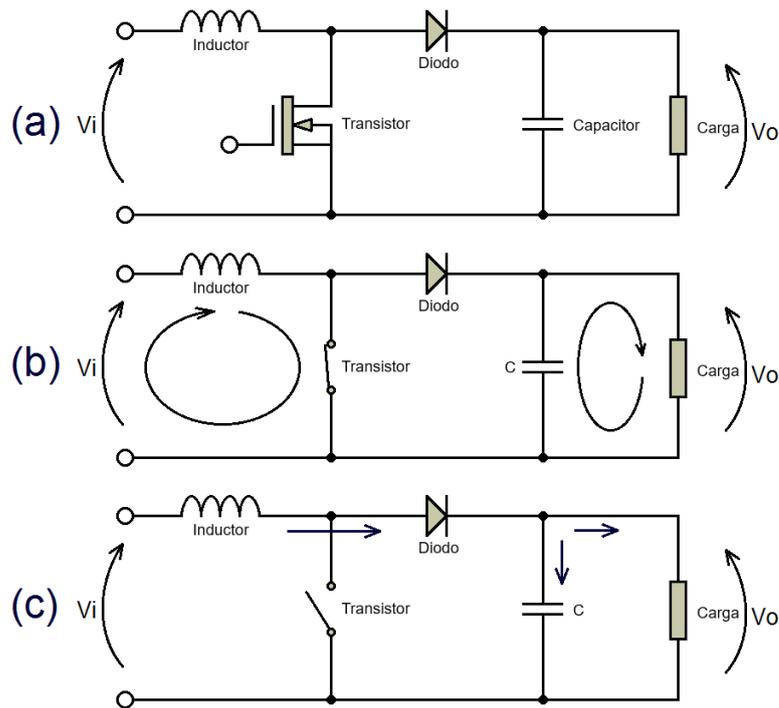


Figura 55: (a) Circuito boost, (b) Modo 1, (c) Modo 2.

Fuente: Los autores

El convertidor Boost en el modo 1 (figura 55b) conecta un inductor en serie a la fuente, produciendo que una corriente máxima circule por la misma para cargarla, se aprovecha este principio para extraer toda la corriente generada y así subir el voltaje al condensador.

El esquema con el convertidor quedó como se muestra en la figura 56.

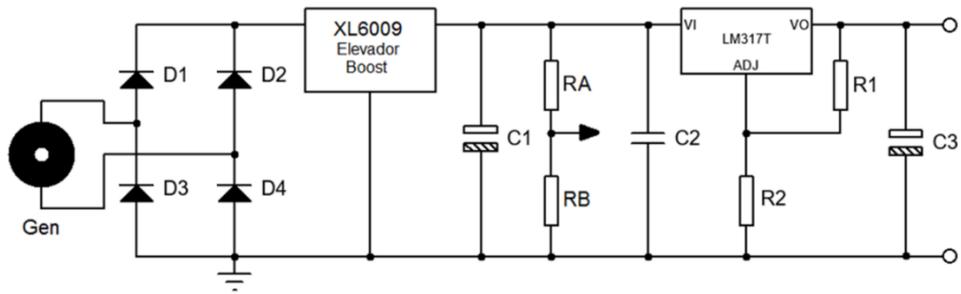


Figura 56: Esquema eléctrico con convertidor boost.

Fuente: Los autores.

Se optó por utilizar el módulo XL6009 por su mejor estabilidad, el mismo que ya viene ensamblado con todos los componentes necesarios (figura 13).

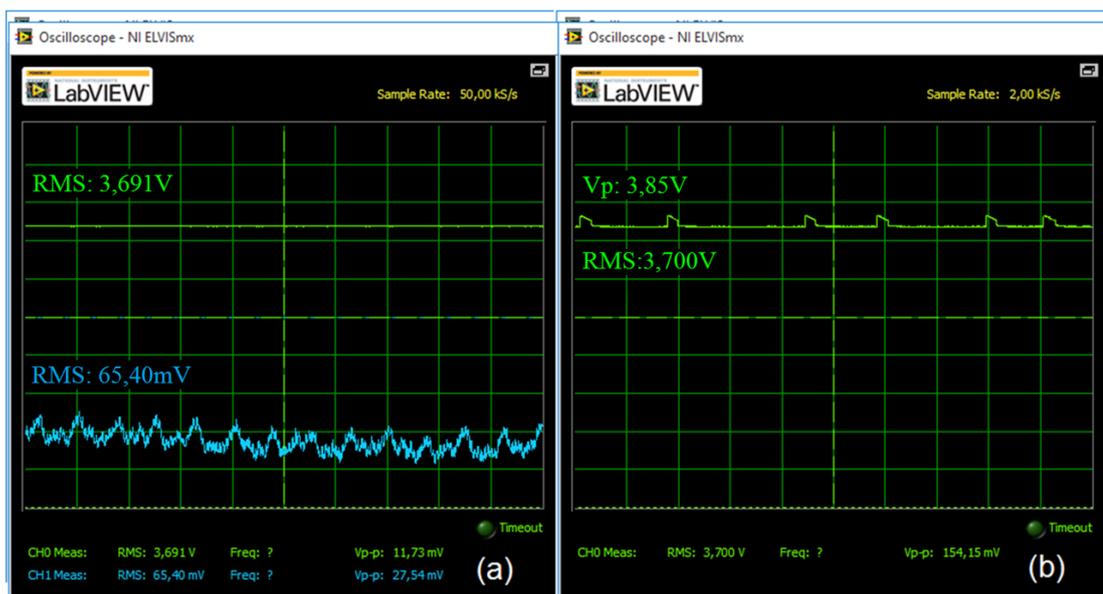


Figura 57: (a) Señal de corriente invertida, (b) Voltaje pulsante en la batería.

Fuente: Los autores.

En la figura 57a se puede observar como mejoró la corriente y la cantidad de pulsos generados (figura 57b), en comparación a la figura 53, ya que con el convertidor se tiene una corriente entregada por el generador de 139.14mA.

Ocupando nuevamente las ecuaciones de los capacitores tenemos lo siguiente.

$$t = \frac{Cv}{i} \quad (2.6)$$

$$t = \frac{(9400\mu F)(6.8V)}{139.14mA}$$

$$t = 0.459s$$

En la figura 58 se puede observar el comportamiento de los picos de voltaje en un periodo de 5 segundos con el convertidor en comparación a la figura 52 que era sin el módulo XL6009 donde se tenía una cantidad menor de cargas.

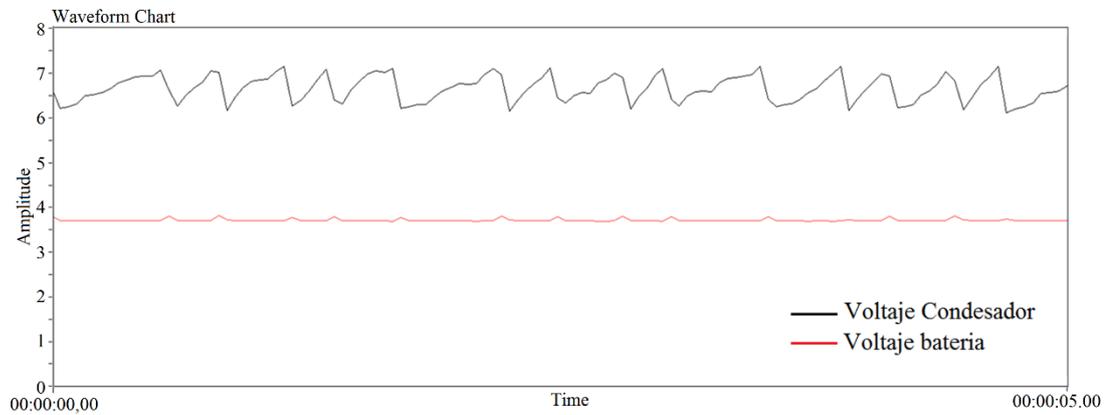


Figura 58: Voltaje en los capacitores para la carga en la batería.

Fuente: Los autores.

2.7 Modelo matemático para describir el funcionamiento del prototipo.

Se tiene que las ecuaciones para el voltaje producido por un generador DC son las siguientes:

$$E_A = \frac{ZP}{2\pi a} \varphi \omega \quad (2.7)$$

$$E_A = K \varphi \omega$$

$$K = \frac{ZP}{2\pi a}$$

Donde: E_A es el voltaje generado (V), Z es el número de conductores en el rotor, P es el número de polos magnéticos de la máquina, K es la constante que depende de la construcción del motor, φ es el flujo total en cada polo (Wb), ω es la velocidad angular del rotor (rad/s) y a es el número de trayectorias de corriente en el rotor.

Para obtener algunos de estos datos se necesitó desmontar el generador y así observar y contar físicamente los valores (figura 59).



Figura 59: Motor DC Copal desarmado.

Fuente: Los autores.

De esto se obtuvo las dimensiones del rotor, radio (1 cm), largo (2.2 cm), además que se tiene un imán de un polo, y así podemos seguir con los cálculos donde.

$$Z = 1652$$

$$K = 37.5605$$

Por medio de un ejercicio práctico, en el cual se acopla el eje del generador a un motor el cual se puede controlar la velocidad, se mide la tensión producida en función de la velocidad angular, esto se puede observar en la tabla 13 y la curva de la figura 60.

| Frecuencia 1 Hz = 1 vuelta | Velocidad angular (rpm) | Velocidad angular (rad/s) | Voltaje generado (V) |
|-------------------------------|----------------------------|------------------------------|-------------------------|
| 3,36 | 201,6 | 21,11150263 | 0,68 |
| 5,99 | 359,4 | 37,63627999 | 1,18 |
| 8,23 | 493,8 | 51,71061508 | 1,61 |
| 10,25 | 615 | 64,4026494 | 2,01 |
| 12,15 | 729 | 76,34070148 | 2,39 |
| 14,02 | 841,2 | 88,09025801 | 2,75 |
| 15,79 | 947,4 | 99,211496 | 3,11 |
| 17,97 | 1078,2 | 112,90884 | 3,53 |
| 20,15 | 1209 | 126,6061839 | 3,96 |
| 21,33 | 1279,8 | 134,0203426 | 4,34 |
| 24,09 | 1445,4 | 151,361934 | 4,76 |
| 25,91 | 1554,6 | 162,7973313 | 5,1 |

| | | | |
|-------|--------|-------------|------|
| 28,14 | 1688,4 | 176,8088345 | 5,54 |
| 30,35 | 1821 | 190,6946741 | 5,98 |
| 32,52 | 1951,2 | 204,3291862 | 6,41 |
| 34,48 | 2068,8 | 216,6442294 | 6,78 |
| 36,06 | 2163,6 | 226,5716622 | 7,09 |
| 38,49 | 2309,4 | 241,8398025 | 7,57 |
| 40,41 | 2424,6 | 253,9035183 | 7,95 |
| 41,79 | 2507,4 | 262,574314 | 8,22 |
| 44,33 | 2659,8 | 278,5336047 | 8,71 |
| 46,36 | 2781,6 | 291,2884708 | 8,96 |

Tabla 13: Voltaje generado y su velocidad angular.

Fuente: Los autores.

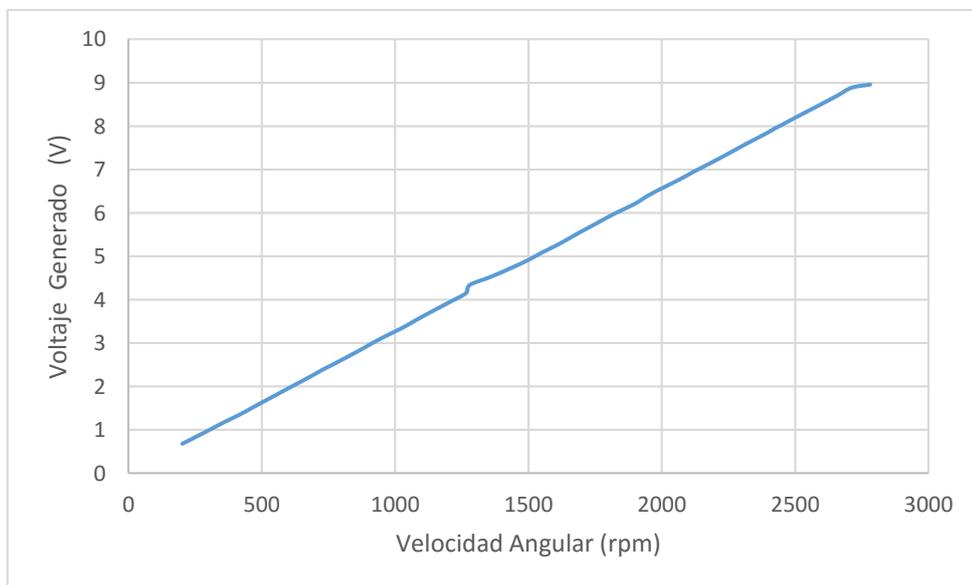


Figura 60: Voltaje generado en función de la velocidad angular.

Fuente: Los autores.

Con estos datos calculamos la densidad de flujo magnético

$$E_A = K\phi\omega \quad (2.8)$$

$$\phi = \frac{E_A}{K\omega}$$

Se aplica la fórmula (2.8) a cada uno de los valores de la tabla 13, y se obtiene la densidad de flujo magnético equivalente para cada valor de voltaje y velocidad, el valor K es la constante de construcción de la maquina así que este no varía.

| Velocidad angular (rad/s) | Voltaje generado (V) | K | φ Wb (weber) |
|------------------------------|-------------------------|---------|-------------------------|
| 21,1115 | 0,68 | 37,5605 | 0,000857548 |
| 37,6363 | 1,18 | 37,5605 | 0,000834726 |
| 51,7106 | 1,61 | 37,5605 | 0,000828924 |
| 64,4026 | 2,01 | 37,5605 | 0,000830923 |
| 76,3407 | 2,39 | 37,5605 | 0,000833509 |
| 88,0903 | 2,75 | 37,5605 | 0,000831139 |
| 99,2115 | 3,11 | 37,5605 | 0,000834578 |
| 112,9088 | 3,53 | 37,5605 | 0,000832368 |
| 126,6062 | 3,96 | 37,5605 | 0,000832739 |
| 134,0203 | 4,34 | 37,5605 | 0,00086216 |
| 151,3619 | 4,76 | 37,5605 | 0,000837257 |
| 162,7973 | 5,1 | 37,5605 | 0,000834049 |
| 176,8088 | 5,54 | 37,5605 | 0,000834208 |
| 190,6947 | 5,98 | 37,5605 | 0,000834894 |
| 204,3292 | 6,41 | 37,5605 | 0,000835211 |
| 216,6442 | 6,78 | 37,5605 | 0,000833204 |
| 226,5717 | 7,09 | 37,5605 | 0,000833123 |
| 241,8398 | 7,57 | 37,5605 | 0,000833368 |
| 253,9035 | 7,95 | 37,5605 | 0,000833618 |
| 262,5743 | 8,22 | 37,5605 | 0,000833467 |
| 278,5336 | 8,71 | 37,5605 | 0,000832548 |
| 291,2885 | 8,96 | 37,5605 | 0,000818942 |

Tabla 14: Flujo magnético con su respectiva velocidad y voltaje.

Fuente: Los autores.

De la tabla 14 sacamos un promedio de la columna de densidad de flujo magnético, un valor que se mantiene constante para los cambios de velocidad y voltaje.

$$\varphi = \frac{E_{An}}{K\omega_n} \quad (2.9)$$

$$\varphi = 0,000834088 \text{ Wb}$$

Ahora se tiene los datos de K y φ propios del generador con los cuales por medio de la ecuación de E_A podemos calcular el voltaje generado y dejarlo en función de la velocidad de giro del eje.

Para obtener la velocidad de giro del rotor hay que tener en cuenta que este se encuentra acoplado a la rodilla por medio de dos sistemas de engranajes. El primero es la caja reductora propia del motor (figura 10) que tiene una relación de conversión

de 30:1 y el segundo que son los engranes del taladro manual (figura 27) con una relación de 3.6:1. La combinación de estos dos sistemas da como resultado una conversión de 108:1.

$$\omega = \omega_{rodilla} * 108 \quad (2.10)$$

Reemplazando en la ecuación de voltaje quedaría de la siguiente manera:

$$E_A = K\phi\omega_{rodilla} * 108 \quad (2.11)$$

En la tabla 15 se aplica las trayectorias de caminata obteniendo el valor de voltaje a vacío que se puede observar en la figura 61.

| Tiempo (s) | Angulo de caminata (radianes) | Velocidad de giro (rad/s) | Voltaje generado (Volt) | Tiempo (s) | Angulo de caminata (radianes) | Velocidad de giro (rad/s) | Voltaje generado (Volt) |
|------------|-------------------------------|---------------------------|-------------------------|------------|-------------------------------|---------------------------|-------------------------|
| 0,0000 | 0,0530 | -0,1254 | -0,4363 | 0,8130 | 0,0877 | -1,3346 | -4,6427 |
| 0,0407 | 0,0479 | -0,0951 | -0,3308 | 0,8537 | 0,0335 | -0,1407 | -0,4895 |
| 0,0813 | 0,0440 | -0,1521 | -0,5292 | 0,8943 | 0,0278 | 0,3080 | 1,0715 |
| 0,1220 | 0,0378 | -0,0037 | -0,0130 | 0,9350 | 0,0403 | 0,8251 | 2,8703 |
| 0,1626 | 0,0377 | 0,1217 | 0,4233 | 0,9756 | 0,0738 | 0,6083 | 2,1162 |
| 0,2033 | 0,0426 | 0,3193 | 1,1108 | 1,0163 | 0,0986 | 0,3422 | 1,1904 |
| 0,2439 | 0,0556 | 0,5209 | 1,8122 | 1,0569 | 0,1125 | -0,0951 | -0,3308 |
| 0,2846 | 0,0768 | 1,0000 | 3,4786 | 1,0976 | 0,1086 | -0,3080 | -1,0715 |
| 0,3252 | 0,1174 | 1,7642 | 6,1370 | 1,1382 | 0,0961 | -0,3802 | -1,3227 |
| 0,3659 | 0,1891 | 2,6388 | 9,1794 | 1,1789 | 0,0806 | -0,3954 | -1,3755 |
| 0,4065 | 0,2964 | 2,8325 | 9,8535 | 1,2195 | 0,0646 | -0,3536 | -1,2302 |
| 0,4472 | 0,4115 | 1,8593 | 6,4678 | 1,2602 | 0,0502 | -0,2547 | -0,8860 |
| 0,4878 | 0,4871 | 1,1902 | 4,1402 | 1,3008 | 0,0398 | -0,1293 | -0,4497 |
| 0,5285 | 0,5355 | 0,3383 | 1,1770 | 1,3415 | 0,0346 | -0,0380 | -0,1323 |
| 0,5691 | 0,5493 | -0,6730 | -2,3410 | 1,3821 | 0,0330 | -0,0646 | -0,2248 |
| 0,6098 | 0,5219 | -1,5133 | -5,2644 | 1,4228 | 0,0304 | 0,0114 | 0,0398 |
| 0,6504 | 0,4604 | -1,9999 | -6,9569 | 1,4634 | 0,0309 | -0,0076 | -0,0264 |
| 0,6911 | 0,3791 | -2,3156 | -8,0551 | 1,5041 | 0,0306 | 0,0532 | 0,1851 |
| 0,7317 | 0,2850 | -2,6083 | -9,0734 | 1,5447 | 0,0327 | 0,1901 | 0,6611 |
| 0,7724 | 0,1789 | -2,2432 | -7,8035 | 1,5854 | 0,0404 | 0,4107 | 1,4286 |

Tabla 15: Voltaje generado en función de la caminata.

Fuente: Los autores

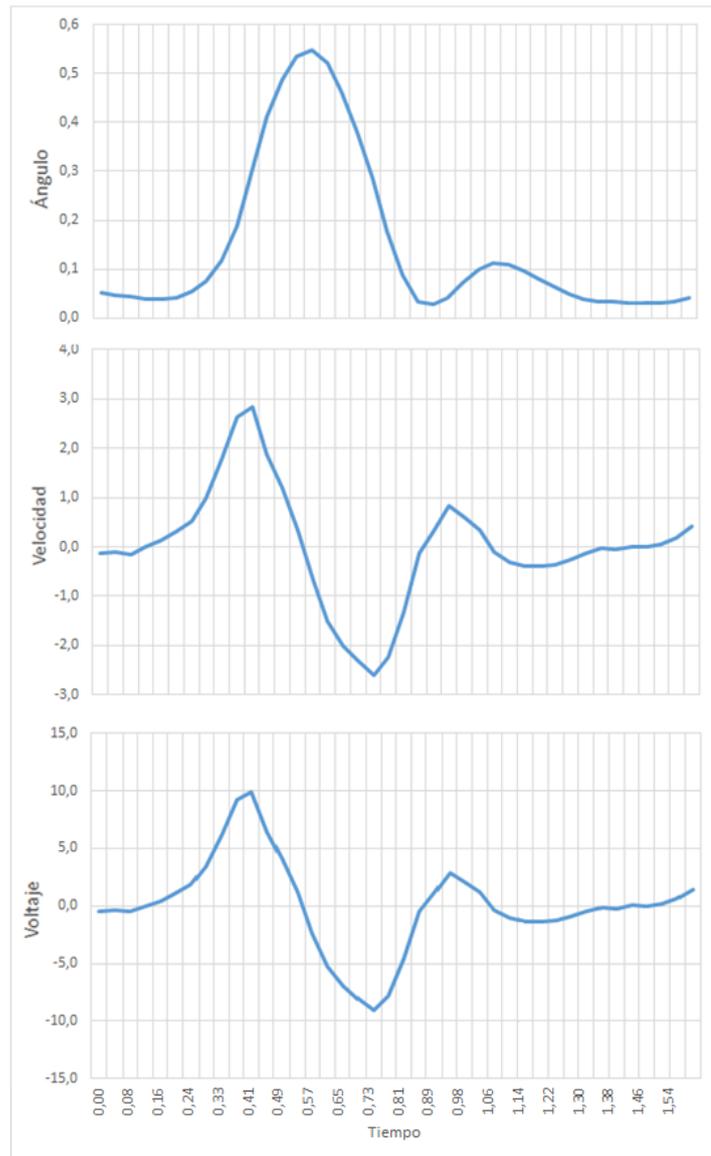


Figura 61: Trayectoria de caminata y voltaje generado a vacío.

Fuente: Los autores.

Para calcular el voltaje real tenemos que restar la tensión contra electromotriz, esto se produce ya que circula una corriente por el bobinado interno y como el mismo posee una resistencia se crea una tensión de polaridad inversa en los terminales.

$$V_T = E_A - I_A R_A \quad (2.12)$$

Donde: V_T es el voltaje total (V), E_A es el voltaje generado sin pérdidas (V), I_A es la corriente de inducido (A) y R_A es la resistencia de armadura.

El voltaje generado E_A se lo obtiene con los parámetros ya calculados, la corriente I_A está en función de la carga, entonces solo hace falta el valor de la resistencia de armadura R_A , esto se lo puede obtener colocando un voltaje bajo y

trabajando el rotor para que circule una corriente sin que exista movimiento y no se cree ningún valor inducido, y por ley de ohm se obtiene R_A .

$$V_{pueba} = 1.269V \quad (2.13)$$

Y se midió una corriente de

$$I_A = 22.6mA$$

Obteniendo un valor de

$$R_A = 56.1504\Omega$$

Tomando la ecuación (2.11), R_A y (2.12) tenemos reemplazando:

$$V_T = (108K\varphi\omega_{rodilla}) - I_A(56.1504\Omega) \quad (2.14)$$

Reemplazando los valores de K y φ .

$$V_T = (108 * 37.5605 * 0.000834088 * \omega_{rodilla}) - I_A(56.1504\Omega)$$

$$V_T = (3.38351 * \omega_{rodilla}) - I_A(56.1504\Omega)$$

La ecuación (2.14) representa el voltaje en los terminales del generador (figura 62), pero dado que se tiene una señal de voltaje con valores positivos y negativos se la rectificó para obtener una tensión DC, esto produce una caída de tensión de $0.6V$ en los diodos de germanio, como se mencionó en el punto 2.6.

$$V_{DC} = abs(V_T) - 0.6V \quad (2.15)$$

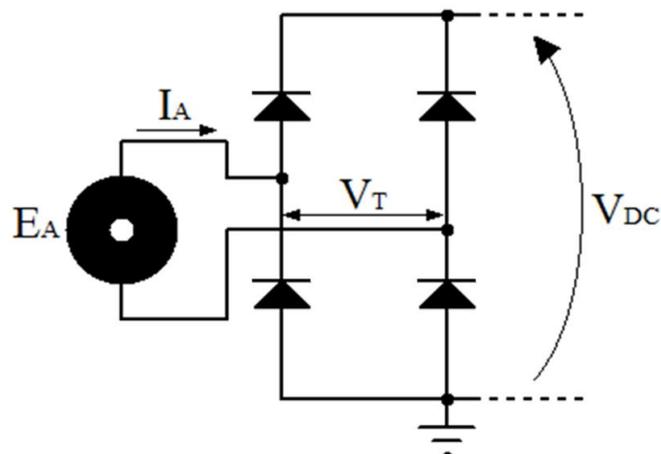


Figura 62: Voltaje generado y sus cambios en el circuito.

Fuente: Los autores

El modulo usado para la elevación de voltaje XL6009 posee un pin en su integrado de feedback para su autocontrol, este valor se lo regula con un potenciómetro de calibración, el cual se ha colocado en 7.5V, ya que el programa de control conecta los capacitores al regulador y la batería en 7V.

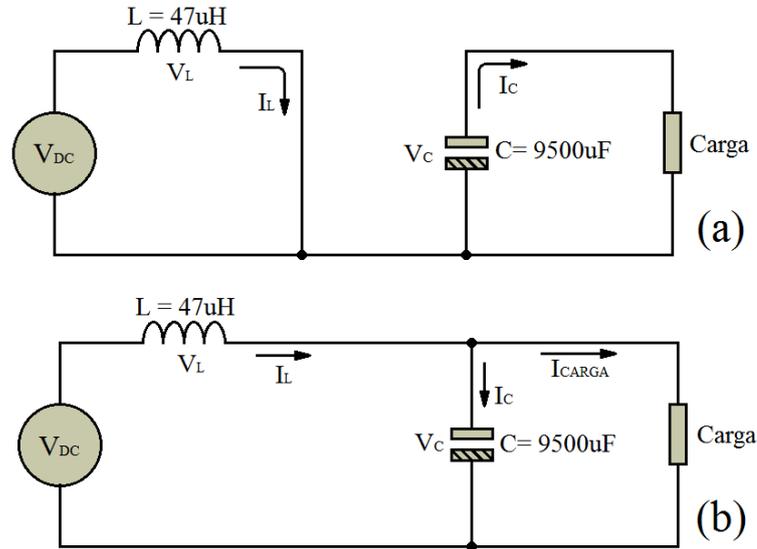


Figura 63: Módulo boost XL6009: (a) Estado 1 (b) Estado 2.

Fuente: Los autores

Para el estado 1 (figura 63a) se tiene que la ecuación de la malla 1 es:

$$V_{DC} = V_L = L \frac{\Delta i}{\Delta t} \quad (2.16)$$

Como se tiene un valor de voltaje (2.15) se la reemplaza en (2.16)

$$V_{DC} = abs(V_T) - 0.6V = (47\mu H) \frac{\Delta i}{\Delta t} \quad (2.17)$$

Y para la malla 2 es:

$$V_C = \frac{Q}{C} \quad (2.18)$$

Para el estado 2 se tiene que:

$$V_{DC} + V_L = V_C \quad (2.19)$$

$$I_L = I_C + I_{CARGA} \quad (2.20)$$

Dado que el modulo tiene su circuito de control interno, y la hoja de especificaciones solo nos da una ecuación:

$$V_{out} = 1.25V * \left(1 + \frac{R1}{R2}\right) \quad (2.21)$$

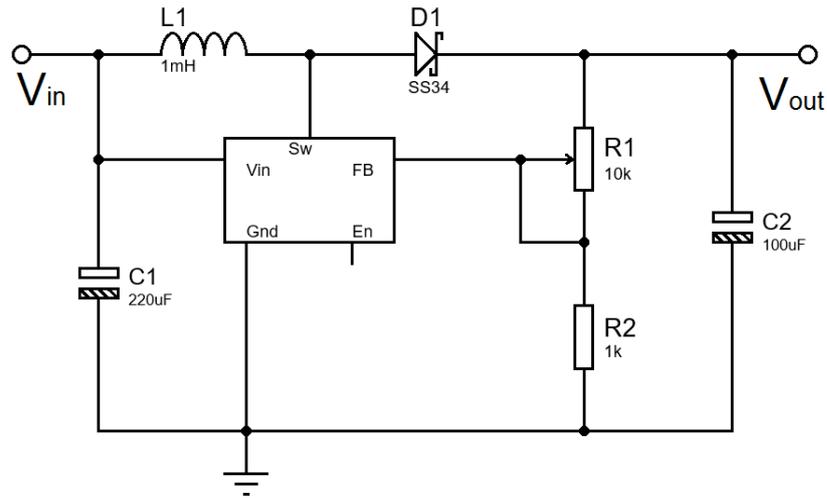


Figura 64: Diagrama esquemático del módulo boost XL6009.

Fuente: Los autores.

Estos valores de resistencia están dados por R1 Y R2, como se muestra en el circuito de la figura 64, y en configuración de partidor de tensión va a la entrada Feedback, mide el valor de voltaje y lo estabiliza. Para este caso lo tenemos establecido en 7V, tanto en el convertidor como el regulador, por lo tanto no se va a superar este nivel.

Para la carga del condensador usamos la ecuación:

$$t = \frac{Cv}{i} \quad (2.6)$$

$$i = \frac{(9500\mu F)(1V)}{t}$$

Lo que nos daría la corriente en función del tiempo de descarga del condensador, el cual es un promedio de 0.06719 segundos, y el voltaje cae desde 7V a 6V.

$$i = \frac{(9500\mu F)(1V)}{0.06719 s}$$

$$i = 0.14139 mA$$

Es el valor de corriente entregada a la batería durante el pico de voltaje.

CAPÍTULO 3. ANÁLISIS DE DATOS Y RESULTADOS

En este capítulo se presentará los resultados obtenidos con el prototipo

3.1 Elección del motor más adecuado

De las pruebas realizadas se tiene que hay dos generadores viables para la construcción del prototipo, estos son el motor DC MG995 (figura 26b) y el motor DC Copal LC 30G (figura 32, a continuación se presenta la comparación entre estos (tabla 16).

| Motor | Peso | Relación de conversión | Torque (motor) | Potencia máxima generada |
|--------------|------|------------------------|----------------|--------------------------|
| MG995 | 56g | 479:1 | 13 kg-cm | 0,5686W |
| Copal LC 30G | 220g | 30:1 | 1,99 kg-cm | 0,311W |

Tabla 16: Comparación de generadores.

Fuente: Los autores.

La mejor opción es el motor MG995 con el cual se empezó a construir el prototipo (figura 31), pero presenta un inconveniente, sus engranes metálicos son de cobre y su relación de conversión es de 479 a 1, lo que hace que al aplicar una fuerza o velocidad mayor de giro tiende a dañar los dientes (figura 65(b,c)).



Figura 65: (a) Engranés de cobre del Motor MG995. (b,c) Engrane con dientes dañados.

Fuente: Los autores.

Por este inconveniente se cambió el prototipo al motor copal LC 30G (figura 32) el cual entregó un máximo de potencia de 0.311W con una relación de conversión mucho más pequeña 30:1, además presenta engranes más resistentes y de mayor tamaño (figura 66).



Figura 66: Engranés del motor copal LC 30G.

Fuente: Los autores.

3.2 Análisis de energía generada

Para iniciar el análisis de la energía generada se parte de la comparación de resultados de la producida con y sin convertidor elevador DC-DC, ya que al aplicar el mismo se incrementa el voltaje de salida, lo que produce que los capacitores de respaldo se carguen más rápido, en la figura 67a se puede observar que se tiene 9 picos de voltaje en un periodo de 20s, mientras que en la figura 67b se tiene 14 picos en un periodo de 5s, o 56 en 20s.

Después de aplicar el convertidor, se produce un incremento del 622.2% en cantidad de pulsos.

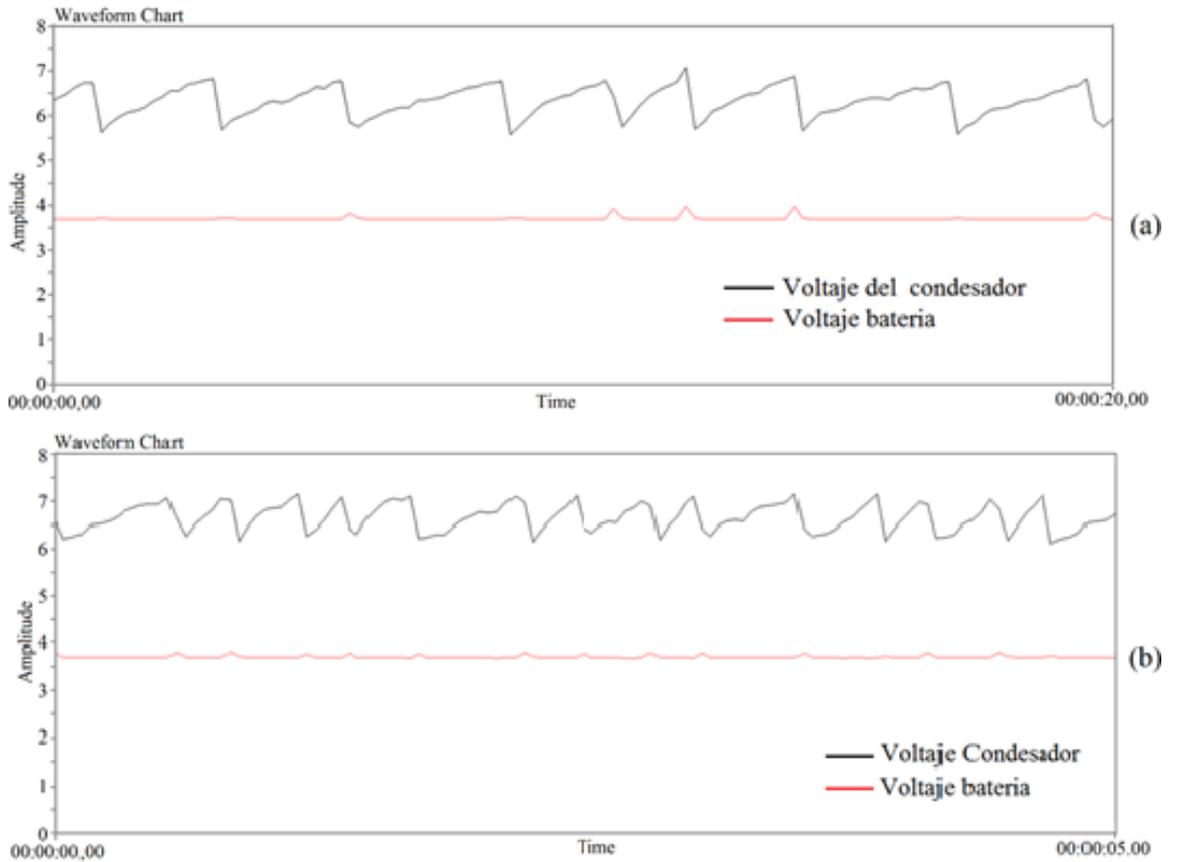


Figura 67: Comparación del voltaje en los capacitores para la carga en la batería (a, b)

Fuente: Los autores.

De igual manera se midió el valor de corriente para observar el cambio, en lo que se registró un valor de 20.80mA sin convertidor (figura 68a) y 139.14mA con convertidor (figura 68b), representando un incremento de amperaje 668.9%, este valor de corriente se lo midió después de la batería, siendo el mismo la corriente pulsante de carga.

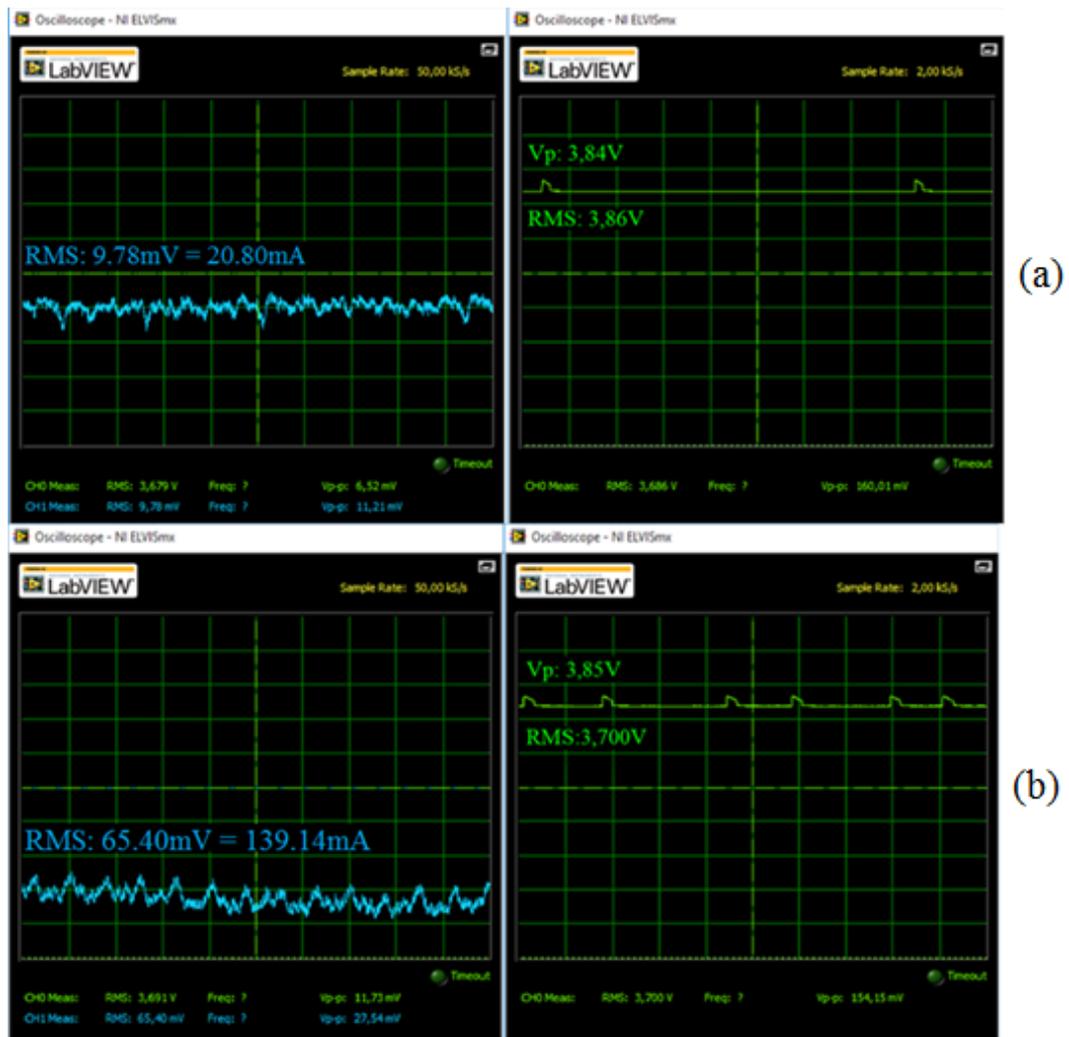


Figura 68: Comparación de la señal de corriente invertida y voltaje pulsante en la batería (a, b).

Fuente: Los autores.

De igual manera se midió el valor de corriente para observar el cambio, en lo que se registró un valor de 20.80mA sin convertidor (figura 68a) y 139.14mA con convertidor (figura 68b), representando un incremento de amperaje 668.9%, este valor de corriente se lo midió después de la batería, siendo el mismo la corriente pulsante de carga.

En la figura 69 se puede observar cómo quedó el circuito final aplicando módulo DC-DC XL6009, quedando de esta manera finalizado el circuito del prototipo.

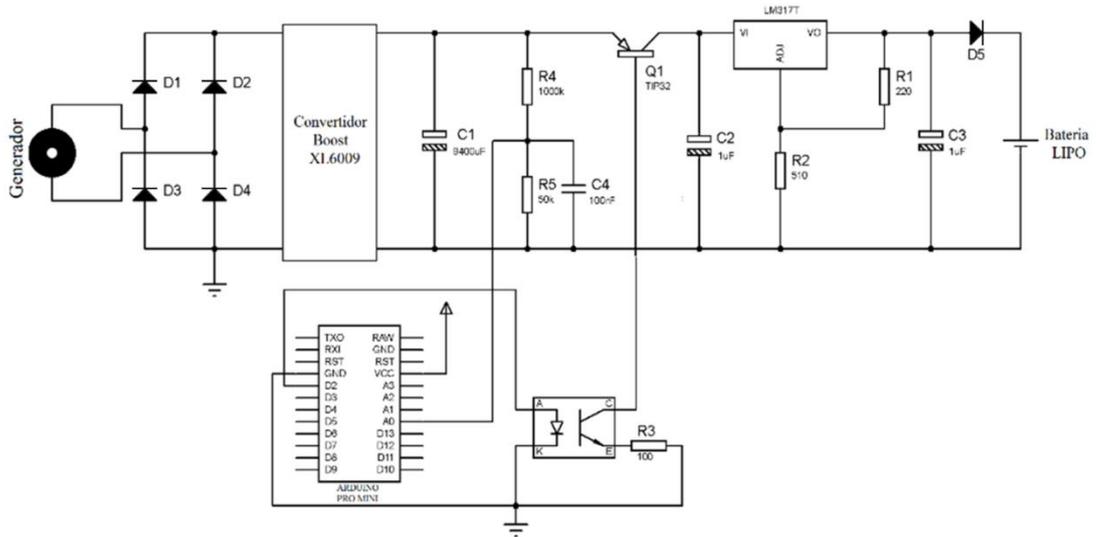


Figura 69: Diagrama Electrónico final del prototipo. (Anexo 6)

Fuente: Los autores.

Con el prototipo completo se procedió a realizar la carga de la batería, por un periodo prolongado de tiempo, de lo cual se obtuvo los datos de la gráfica 70, partiendo desde un valor de 3.6V y llegando a 3.8V.

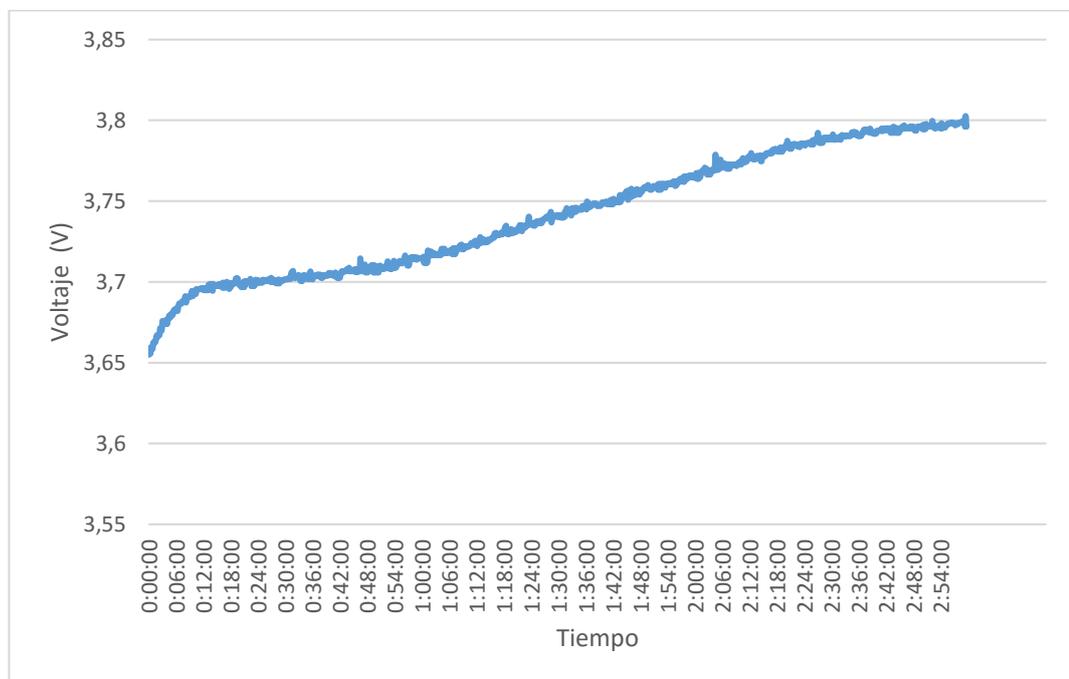


Figura 70: Carga de la batería con el prototipo completo.

Fuente: Los autores.

| | Voltaje (V) | Corriente (mA) | Potencia (W) |
|----------------------|-------------|----------------|--------------|
| Pruebas preliminares | 3,821 | 81 | 0,311 |
| Carga sin elevador | 3.84 | 20.80 | 0.0798 |
| Carga con elevador | 3.85 | 139.14 | 0.5356 |

Tabla 17: Comparación de potencias obtenidas.

Fuente: Los autores.

Durante un periodo de 3 horas se realizó una caminata simulada continua, obteniendo una carga o incremento de voltaje en la batería de 0.2026V, lo que representa un 33.76% del total de la batería. Esta prueba fue realizada en una distancia de 12,93km a una velocidad promedio de 4.31km/h.

A continuación se realizó una prueba en caminata real, en un periodo de 35 minutos y recorriendo una distancia de 3.8km, con la ayuda de un podómetro se sacó un total de 4234 pasos a una velocidad de 4.5km/h, generando un total de 3.7V (figura 71).

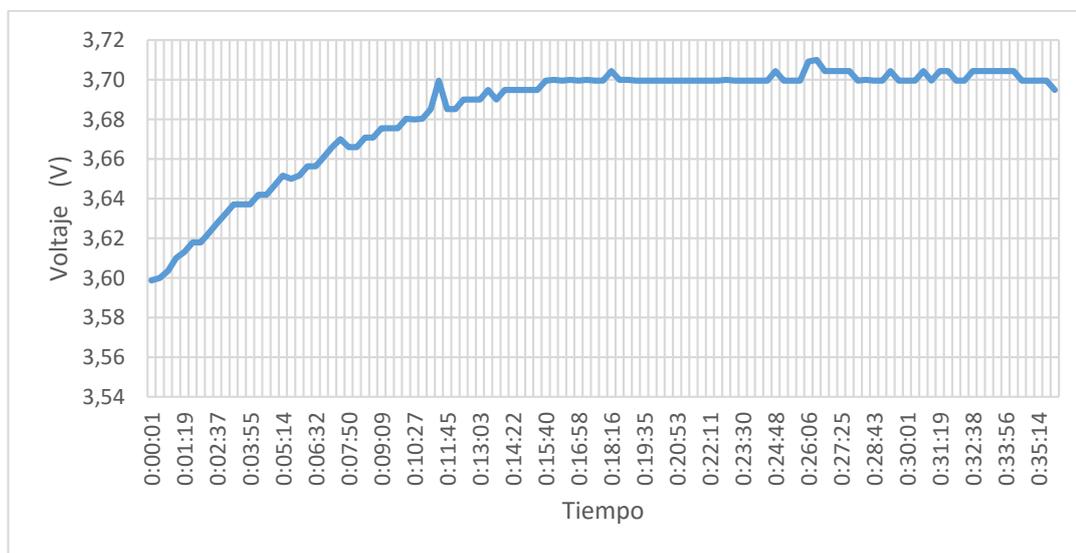


Figura 71: Carga de la batería durante caminata.

Fuente: Los autores.

Posterior a estos se realizó una medición de descarga de la batería para observar la cantidad de energía recolectada. Para esto se usó una resistencia conocida como carga, a la cual se midió la corriente y se controló que el voltaje alcance 3.6V (figura 72a).

Los resultados de la prueba mostraron una corriente promedio de 68.28mA durante un tiempo de 9 minutos (figura 72b), y una potencia de 0.249W durante este tiempo.

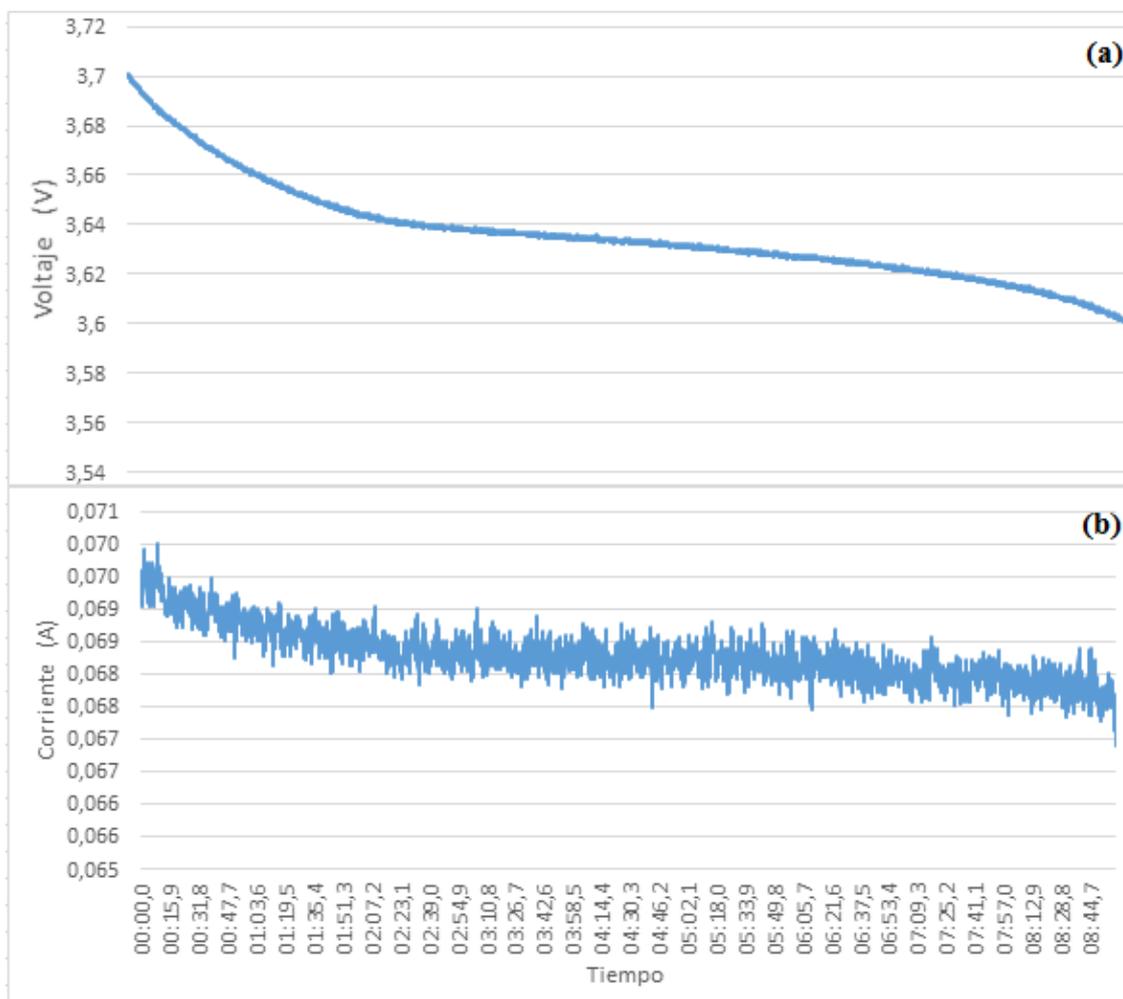


Figura 72: Valores de descarga de la batería cargada con caminata (a) Voltaje, (b) Corriente.

Fuente: Los autores.

3.2 Análisis de eficiencia

Para plantear este análisis se partirá de la carga ideal de la batería, que se la realiza con una fuente de voltaje fija.

La hoja de datos de la batería propone una carga con una fuente de voltaje a un valor fijo de 4.2V, con lo que se obtiene el resultado observado en la figura 73.

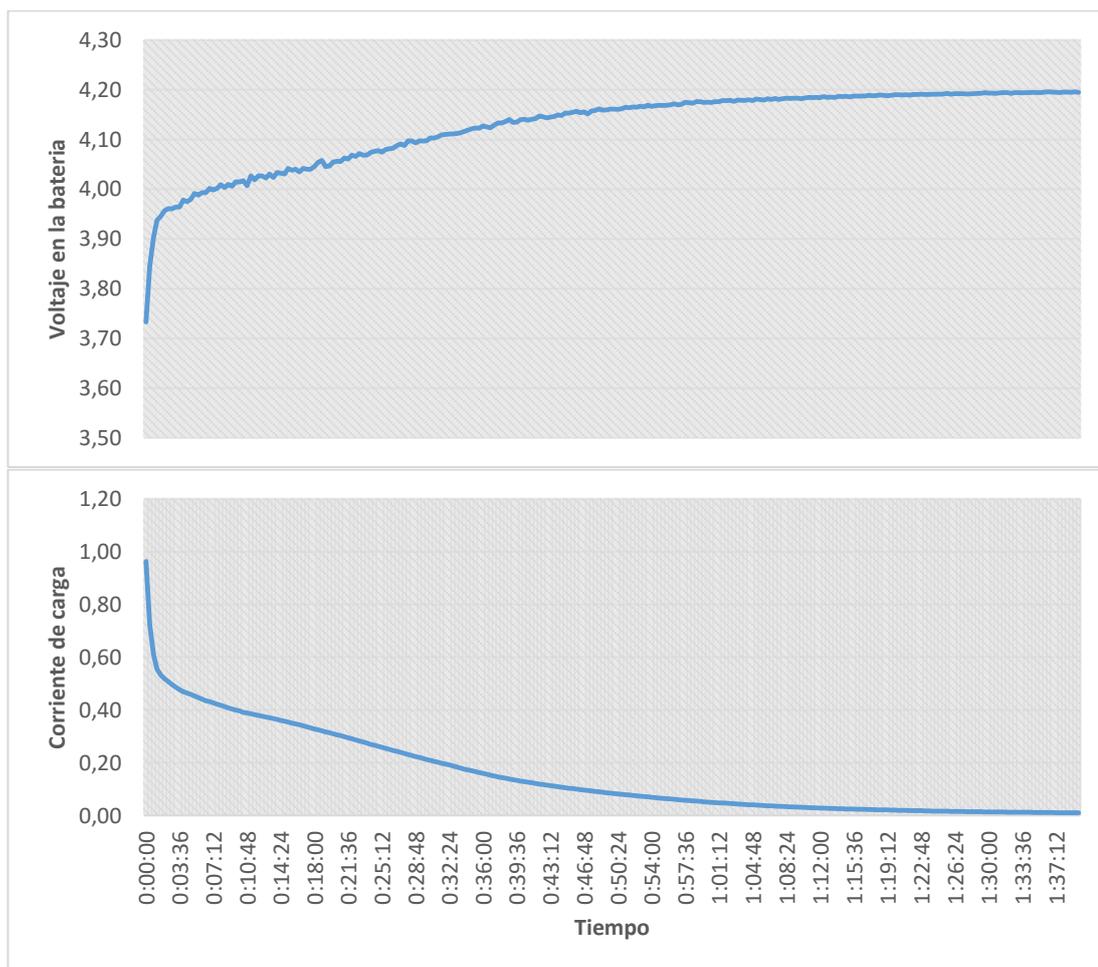


Figura 73: Carga de la batería con el sistema completo voltaje y corriente.

Fuente: Los autores.

Se inicia con un valor de 3.6V en la batería según la hoja de datos de la misma equivale a un valor de 0% de carga y se propone llegar al 100%, además especifica que una carga rápida se realiza en 2.5 horas y una carga estándar en 3 horas.

Para probar los parámetros se realizó una carga rápida, para que se llegue a los 4.2V en 1:40:00, mientras que al prototipo le lleva 3:00:00 alcanzar un 33.76%,

realizando una carga lenta. Se estima que para llegar al 100% se necesita una caminata de 9:00:00, y una distancia recorrida de 36km.

Esto se produce ya que se tiene un promedio de 3 pulsos de voltaje por segundo (figura 74), y el ancho de cada pulso es de 70ms, es decir que se tiene un total de 210ms de voltaje por segundo. Además se mide la corriente con una resistencia de 0.7Ω en serie a la batería, obteniendo por ley de Ohm un valor de 265.6mA.

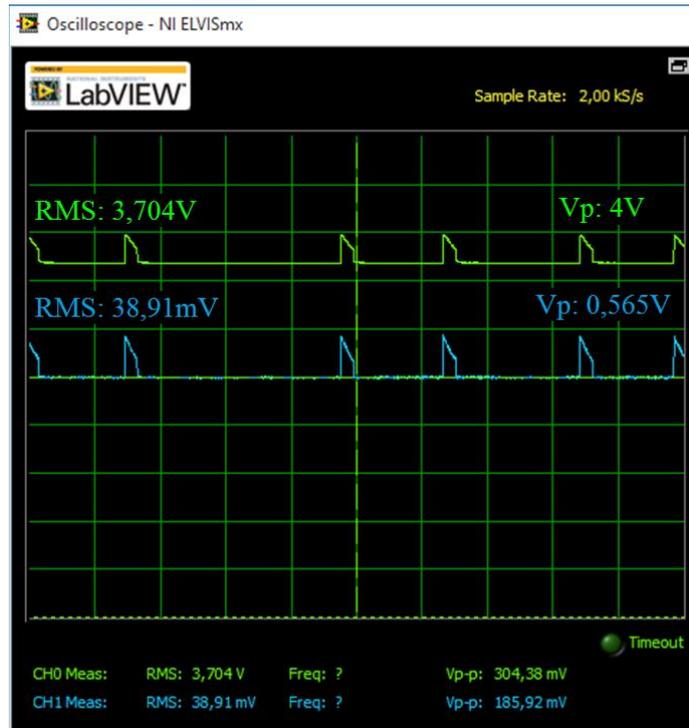


Figura 74: Pulsos de voltaje y corriente de carga en la batería.

Fuente: Los autores.

Calculando un valor de eficiencia con respecto al tiempo tendríamos que un voltaje continuo, en un segundo seria el 100% eficiente, entonces si tenemos aplicación de voltaje durante 210ms.

$$\eta_t = \frac{210ms * 100\%}{1000s} \quad (3.1)$$

$$\eta_t = 21\%$$

Se tiene que por el movimiento que realiza la rodilla al caminar se limita la energía que se puede extraer. En la figura 75 se puede ver el ángulo y velocidad en función del tiempo durante la caminata.

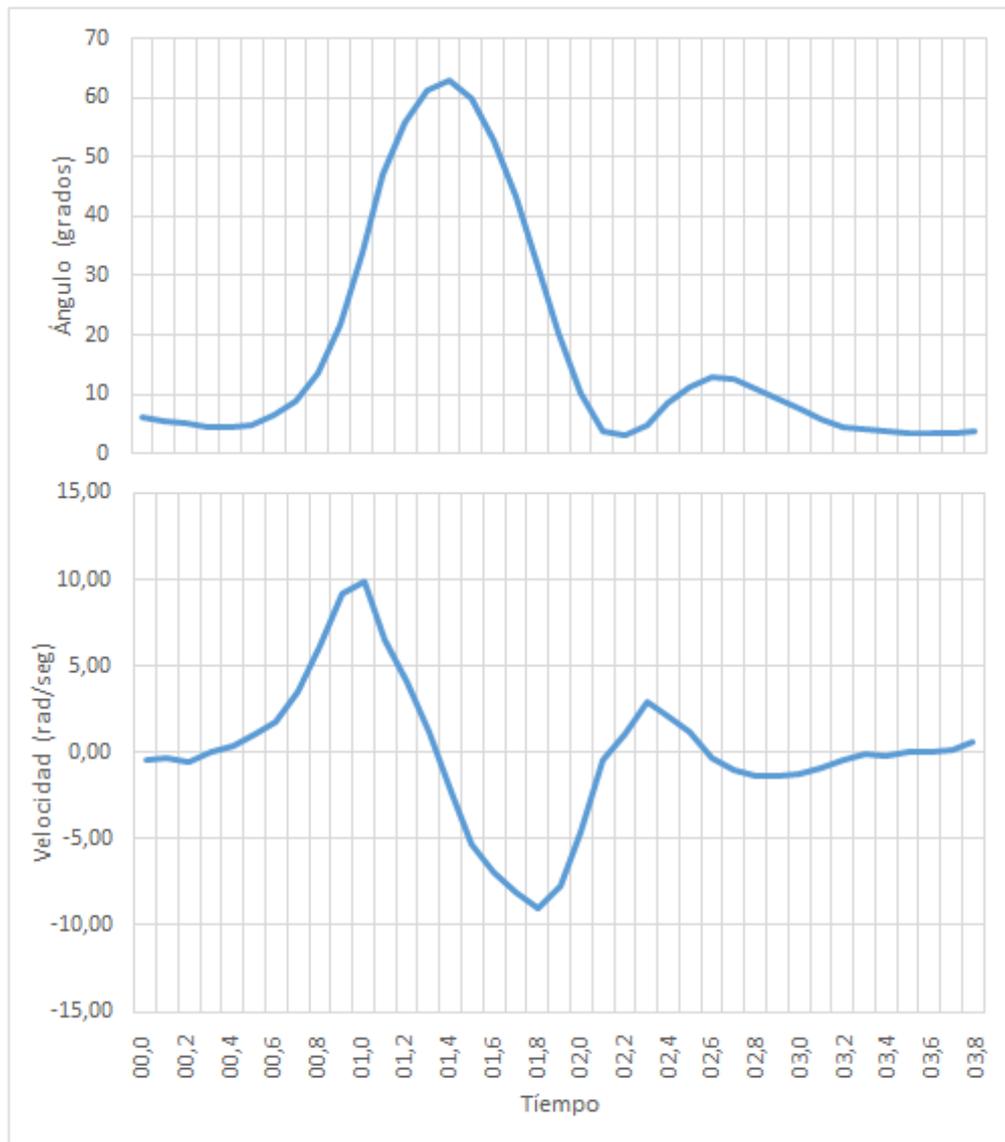


Figura 75: Trayectoria de caminata y velocidad de giro de la rodilla.

Fuente: Los autores.

La señal de velocidad se traduce directamente en voltaje generado, si rectificamos esta señal y calculamos el promedio, como se observa en la figura 76 tenemos un promedio de 2.2V y un máximo de 9.25V

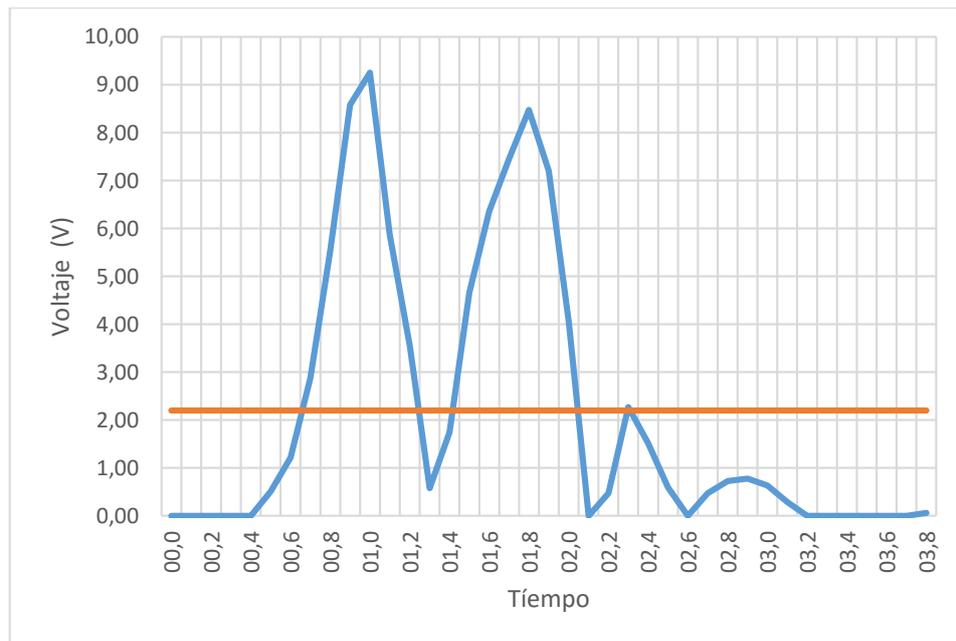


Figura 76: Señal de voltaje rectificado.

Fuente: Los autores

De esto podemos deducir que si se tuviera un giro continuo con el máximo de velocidad sería una recta en 9.25V, siendo el 100% eficiente, pero la señal de velocidad de giro de la rodilla se distribuye llegando solamente a una recta de 2.2V que equivale.

$$\eta_v = \frac{2.2V * 100\%}{9.25V} \quad (3.2)$$

$$\eta_v = 23.7837\%$$

Dando como resultado que solo se puede aprovechar el 23.78% de la velocidad de giro de la rodilla.

▪ Análisis de ergonomía

Uno de los posibles problemas que se puede presentar en el prototipo (figura77) es el peso del mismo. El prototipo completo alcanza un peso de 1170gr (2,57lb); sin embargo, en la literatura se establece un rango de pesos entre 800 a 1300gr como una variable importante que puede causar una lesión conocida como Tendinitis, donde los tendones se inflaman por una actividad física forzada o tensión prolongada en los

ligamentos. Además se puede alterar el patrón normal de marcha de la persona al poner peso en los tobillos o rodillas [40]. Considerando este último argumento, parte del trabajo futuro consistiría en buscar materiales más livianos para la construcción del sistema.



Figura 77: Prototipo colocado en la persona.

Fuente: Los autores

▪ Presupuesto

En la siguiente tabla 18 se muestran los gastos necesarios para realizar el prototipo.

| Descripción | Cantidad | Valor unitario | Valor total |
|----------------------------------|----------|----------------|-------------|
| Generador | 4 | \$20.00 | \$80.00 |
| Rodillera con soportes metálicos | 1 | \$30.00 | \$30.00 |
| Taladro manual | 1 | \$10.00 | \$10.00 |

| | | | |
|--------------------------|------|----------|----------|
| Engrane nylon | 1 | \$10.00 | \$10.00 |
| Estructura del soporte | 1 | \$15.00 | \$15.00 |
| Caja plástica | 1 | \$5.00 | \$5.00 |
| Convertidor XL6009 | 1 | \$6.00 | \$6.00 |
| Arduino Pro Mini | 1 | \$12.00 | \$12.00 |
| Bateria LiPo 3.7V 250mAh | 2 | \$5 | \$10 |
| Placa PCB | 3 | \$6.00 | \$18.00 |
| Sistema de simulación | 1 | \$68 | \$68 |
| Diseño Placa | 4 h | \$5 | \$20 |
| Programación Arduino | 20 h | \$5 | \$100 |
| | | Subtotal | \$390.00 |
| | | Iva 14% | \$54.6 |
| | | Total | \$444.6 |

Tabla 18: *Presupuesto total del prototipo.*

Fuente: *Los autores*

CAPÍTULO 4. CONCLUSIONES

4.1 Conclusiones

Existen muchos sistemas de generación de energía potenciados por el movimiento humano, pero no se los ha dado importancia en el medio, por eso no se han popularizado. El coste elevado de estos sistemas y los aranceles a las importaciones ocasionan el incremento en el precio final del mismo, por esta razón no se puede adquirir este tipo de dispositivos en el medio.

Este tipo de sistemas de generación de energía por medio del movimiento permitiría no solo cargar dispositivos móviles, sino también para alimentar prótesis u órtesis activas, de tal manera que una persona amputada pueda tener un mayor funcionamiento de la misma sin la necesidad de recargarla. Nuestro sistema se adapta a la articulación de la rodilla debido a su mayor ángulo de giro durante un proceso de marcha normal. La variación angular alcanza aproximadamente un pico de 70 grados y una velocidad angular de 2.8 rad/s, siendo esta articulación la mejor opción para la aplicación del proyecto.

Para el generador se buscaron varios modelos de motor DC y AC. Desde la perspectiva biomecánica de la marcha humana debemos tomar en cuenta las dimensiones y peso del motor, considerando que nuestro sistema no puede superar ciertas dimensiones ya que sería muy grande para llevarlo acoplado a la rodilla o muy pesado. Otro factor importante que consideramos es la facilidad de adquisición de este motor para repuesto o reemplazo, en caso de ruptura o avería del mismo. Bajo estos argumentos se utilizó el motor COPAL LC30G que es usado en copiadoras.

Durante el desarrollo del prototipo se usó una configuración mayor número de engranes, para tener una relación de conversión más alta e incrementar la velocidad en el eje, pero esto produjo que los piñones que están cerca del rotor sufran rupturas. Esto mismo sucede al girar el prototipo a una velocidad elevada, al correr o al cambiar bruscamente el sentido de giro de la rodilla.

Una de las propuestas que se analizó durante el desarrollo del prototipo fue implementar dos motores en la rodilla, uno en la parte externa y otro en la interna de la rodilla, de este modo se hubiese duplicado la potencia generada, pero resultaba

incomodo ya que al caminar podía golpear la pierna opuesta. Otra opción era aplicar un generador a cada rodilla, creando un sistema doble y más eficiente ya que se tenía las señales desfasadas incrementando el voltaje rectificado, el inconveniente que se presentó para este caso es el cableado, desde el primer generador al segundo.

Con los últimos resultados podemos ver que el prototipo genera una carga de 0.1V en una caminata de 35 min, que traducido en valores porcentuales es una carga es un 16.6%, aunque es un valor pequeño en prueba de descarga equivale a 0.249W durante un periodo de 9 minutos, desde 3.7V a 3.6V, que son los rangos recomendados para el uso de baterías de LiPo.

Uno de los métodos para generar una mayor cantidad de energía sería aplicando más velocidad de giro de la rodilla, es decir corriendo o trotando, por lo que se puede encaminar el prototipo a atletas, ya que durante su entrenamiento pueden generar energía para sus dispositivos electrónicos portátiles. También podría ser usado por personas que realizan caminata o trote rutinario para mantener la salud. Puede ser usado por ciclistas, con la ventaja de que puede cambiar o usar cualquier bicicleta ya que el dispositivo se encontraría en la pierna del usuario.

El sistema puede ser usado en caso de campamento o expediciones, donde no es accesible una fuente de energía eléctrica, como en el caso de campistas, excursionistas, guías y guarda parques. También se podría enfocar a rescatistas durante búsquedas.

El prototipo está en fase de desarrollo, es decir que falta mejorar algunos detalles, la primera opción sería mejorar la estructura haciéndola de fibra de carbono, de igual manera se tendría que buscar un material resistente y liviano para los engranes.

Para mejorar la cantidad de voltaje generado se propone utilizar un motor en cada rodilla de tal modo que se tendría las trayectorias desfasadas para sumarlas y obtener mayor potencia en el sistema.

Probar diferentes configuraciones de motores reversibles o generadores que no se probaron para el prototipo, como el caso del generador de flujo axial, con imanes de neodimio, los cuales tienen una cantidad mayor de densidad de flujo magnético.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] L. Recalde, N. Villagrán, “Análisis biomecánico de los miembros inferiores del cuerpo, para el estudio de la transformación de la energía eléctrica, en el pedaleo elíptico,” Universidad Politécnica Salesiana, pp.50-59, Mayo 2015.
- [2] C. Chiriboga, S. Rodríguez, P. Canelos, J. Ortiz, J. Jaramillo. “Estado del arte en el aprovechamiento de energía humana en espacios públicos,” Universidad Técnica Particular de Loja. Loja, Ecuador 2015.
- [3] A.J. Jansen, A.L.N. Stevels. *Human Power, a sustainable option for electronic*, Boston USA: International Symposium on Electronics and the Environment, 1999.
- [4] J Paradiso, T Starner. “Energy scavenging for mobile and wireless electronics,” *IEEE Pervasive Computing*, vol 4 Issue 1, January 2005, pp.18-27.
- [5] T. Starner, JA Paradiso, *Human generated power for mobile electronics*, In: Piguet C, editor, *Low-power electronics design*, Boca Raton, CRC Press, 2005
- [6] Sarah Griffiths, These shoes were made for CHARGING, Fecha de consulta 08 de enero de 2016, Disponible en: <http://www.dailymail.co.uk/sciencetech/article-2889932/These-shoes-CHARGING-Footwear-generates-power-recharge-phone-walk.html>
- [7] J. Maxwell Donelan, “Biomechanical energy harvesting” *IEEE Pervasive Computing*, Simon Fraser University, Burnaby, Canada, pp. 1-4.
- [8] Claudia Estefanía Loaiza Aldeán, “Diseño de un generador de flujo axial activado a manivela,” Universidad Técnica Particular Loja, Agosto 2011.
- [9] L. Góndora, C. Rosales, *Articulación de la Rodilla y su Mecánica Articular*, Laboratorios de Anticuerpos y Biomodelos Experimentales, Medisan. 2003.
- [10] A. Romero, “Evaluación del efecto analgésico de la farmacoacupuntura en pacientes con diagnóstico de artrosis de rodilla,” Escuela Nacional de Medicina y Homeopatía México, p. 65, 2008.

- [11] Henry Rouviere; Andre Delmas, *Anatomía Humana descriptiva, tipográfica y funcional*, Elsevier España: Masson, vol.III, no. 10, 2005.
- [12] Mónica Alexandra Romero Sacoto, “Diseño y construcción de una órtesis de rodilla, destinada a la rehabilitación automatizada de la extremidad inferior,” Universidad Politécnica Salesiana. p. 20, 2012.
- [13] M Nordin,V. Frankel, *Biomecánica básica del sistema musculo esquelético*, España: McGraw- Hill- Interamericana, 2003.
- [14] José L. Pons, *Wearable Robots: Biomechatronic Exoskeletons*, US: Wiley. John Wiley & sons, Ltd, p. 360, 2008).
- [15] Proubasta, I., Gil, L., & Planell, J. A, *Biomecánica de la rodilla. Fundamentos de biomecánica y biomateriales*, Madrid: Ediciones Ergon SA, 127-51,1997.
- [16] M. Panesso, M. Trillos, I. Guzman, “Biomecánica Clínica de la Rodilla,” Universidad del Rosario, Facultad de Rehabilitación y Desarrollo Humano, pp. 18-22.
- [17] B. Contreras, V. Flores, “Diseño, construcción e implementación de un sistema embebido de adquisición de parámetros cinemáticos de la marcha humana en tobillo, rodilla y cadera,” Universidad Politécnica Salesiana, pp. 7-11, 2015.
- [18] D. R. Calliet, *Síndromes dolorosos de Rodilla*. El Manual Moderno. Vol. 3, p. 200, España, 2004.
- [19] Antonio Viladot Voegeli. *Biomecánica de la rodilla*. En Lecciones básicas de biomecánica del aparato locomotor, España: Springer Science & Business Media, pp. 197-206, 2001.
- [20] S. Cerveró, J. Honrado, J. Monzó, R. Sánchez, J. Fenollosa, “Biomechanics of the knee,” H. U. Dr. Peset de Valencia, pp. 38-41.
- [21] J. M. Font-Llagunes, G. Arroyo, F. J. Alonso, and B. M. Vinagre, “Diseño de una órtesis activa para ayuda a la marcha de lesionados medulares,” Enviado XVIII Congreso Nacional de Ingeniería Mecánica, Ciudad Real, 2010.
- [22] Stephen J. Chapman, *Motores y Generadores DC*. En Maquinas Eléctricas, Colombia: Mc Graw Hill, pp. 546-640, 2012.

- [23] Group Company Copal, “Micro DC Motors Standard Specifications”, Fecha de consulta 09 de marzo de 2016, Disponible en: <http://www.nidec-copal-electronics.com/e/product/list/dc-motor/>
- [24] G. González, “Establecimiento del cálculo del diámetro de cresta exterior de un engranaje cónico con técnicas de grafos,” Ingeniería Mecánica, vol. 3, p. 33-39, 2007.
- [25] Marín, Evelio Palomino. "Elementos de medición y análisis de vibraciones en máquinas rotatorias," Centro de Estudios en Ingeniería de Mantenimiento (CEIM), Ave 114, 2007.
- [26] R. Hernández, E. García, “Engranajes cónicos de dientes rectos”, Universidad de Pinar del Río, Ingeniería Mecánica Vol. 7, No. 1, 2007.
- [27] A. Giraldo, S. Narváez, M. Garcés, “Engranajes cónicos de dientes rectos”, Universidad EAFIT Medellín, pp. 3-11, 2014.
- [28] Arduino, “Arduino Pro Mini”, Fecha de consulta 25 de marzo de 2016, Disponible en: <https://www.arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardProMini>
- [29] F. Valderrama, H. Moreno, H. Vega, “Análisis, simulación y control de un convertidor de potencia dc/dc tipo boost”, Universidad San Buena Aventura sede Bogotá, 2011.
- [30] Informática hoy, “Pilas Recargables, ” Fecha de consulta 06 de abril de 2016, Disponible en: <http://www.informatica-hoy.com.ar/electronica-consumo-masivo/Pilas-Recargables.php>
- [31] A. Fernández, J Rodríguez, E. Medina, H Garrido, “Baterías recargables para uso médico: características y circuitos de carga”, Instituto Central de Investigación Digital, Bioingeniería y Física Médica Cubana.
- [32] Shanti Bijani Chiquero, “Electrodeposición y Caracterización de Láminas de Cu₂O. Aplicación como Electrodo de Baterías de Ion-Litio,” Universidad de Málaga, pp. 3-14.
- [33] Claudio Danilo Burgos Mellado, “Estimación del estado de carga para un banco de baterías basada en modelación difusa y filtro extendido de Kalman,” Universidad de Chile, pp. 34-38.

- [34] Karlann Rodríguez López, “Análisis de desempeño entre una batería AGM y plomo ácido”, Instituto Politécnico Nacional, México D. F., p. 27.
- [35] M. Jain, U. Tiwari, M. Gupta, *Walking based wearable mobile phone charger and lightening system*, Medical Imaging, m-Health and Emerging Communication Systems (MedCom), International Conference, pp. 407 -411, Diciembre 2011.
- [36] Xlsemi, “XL6009 Specifications, ” Fecha de consulta 11 de mayo de 2016, Disponible en: <http://www.datasheetspdf.com/PDF/XL6009/775384/1>
- [37] J. David Irwin, *Capacitancia e Inductancia*, En Análisis Básico de Circuitos en Ingeniería, México: Prentice-Hall Hispanoamérica, S.A, p. 255, 1997.
- [38] H. Rashid, *Regulador elevador Boost*. Electrónica de potencia: circuitos, dispositivos y aplicaciones, México: Prentice Hall, pp. 320 a 322, 2005.
- [39] Global trade stars here, “Specifications li-polymer battery 402035 3.7v 250mah”. Fecha de consulta 03 de junio de 2016, Disponible en: https://www.alibaba.com/product-detail/li-polymer-battery-402035-3-7v_60396156632.html
- [40] Salud y bienestar, “Pesas para los tobillos bueno o malo”. Fecha de consulta 15 de junio de 2016, Disponible en: <http://lasaludi.info/son-pesas-para-los-tobillos-bueno-o-malo.html>

ANEXOS

DC GEARED MOTORS

LC30G/LC37G



■ PART NUMBER DESIGNATION

L C 3 7 G - 1 8 3 C 1 / 1 0

Series name

LC30G191C : DC 24 V
LC37G-183C : DC 24 V

Gear ratio

| | |
|-------|--------|
| 1/10 | 1/300 |
| 1/30 | 1/500 |
| 1/60 | 1/1000 |
| 1/100 | 1/1500 |
| 1/150 | |

■ LIST OF PART NUMBERS

| Gear ratio | Part number | Part number |
|------------|--------------------|---------------------|
| 1/10 | LC30G191C 1/10 | LC37G-183C 1/10 |
| 1/30 | LC30G191C 1/30 | LC37G-183C 1/30 |
| 1/60 | LC30G191C 1/60 | LC37G-183C 1/60 |
| 1/100 | LC30G191C 1/100 | LC37G-183C 1/100 |
| 1/150 | LC30G191C 1/150 | LC37G-183C 1/150 |
| 1/300 | ➔ LC30G191C 1/300 | ➔ LC37G-183C 1/300 |
| 1/500 | ➔ LC30G191C 1/500 | ➔ LC37G-183C 1/500 |
| 1/1000 | ➔ LC30G191C 1/1000 | ➔ LC37G-183C 1/1000 |
| 1/1500 | ➔ LC30G191C 1/1500 | ➔ LC37G-183C 1/1500 |

※ Verify the above part numbers when placing orders.

The products indicated by ➔ mark are manufactured upon receipt of order basis.

LC30G/LC37G

DC GEARED MOTORS

STANDARD SPECIFICATIONS

<Motor only>

| Part number | Rated voltage | Rated torque | Rated speed | Rated current | No load speed | No load current | Starting torque | Starting current |
|-------------|---------------|--------------|------------------------|---------------|------------------------|-----------------|-----------------|------------------|
| LC30G191C | 24 V | 9.81 mN·m | 5400 min ⁻¹ | 500 mA | 7000 min ⁻¹ | 60 mA | 34.32 mN·m | 1500 mA |
| LC37G-183C | 24 V | 4.9 mN·m | 5200 min ⁻¹ | 350 mA | 7400 min ⁻¹ | 70 mA | 11.76 mN·m | 600 mA |

<With gearbox>

LC30G191C

| Gear ratio | 1/10 | 1/30 | 1/60 | 1/100 | 1/150 | 1/300 | 1/500 | 1/1000 | 1/1500 |
|---------------------------------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|
| Rated torque mN·m | 98.1 | 196.1 | 294.2 | 588.4 | | | | | |
| Rated speed min ⁻¹ | 540 | 190 | 100 | 60 | 40 | 21 | 13 | 6.5 | 4.4 |
| Rated current A | 0.65 | 0.5 | | 0.37 | 0.23 | 0.25 | 0.2 | 0.15 | |
| No load speed min ⁻¹ | 720 | 230 | 120 | 70 | 47 | 23 | 14 | 7 | 4.5 |

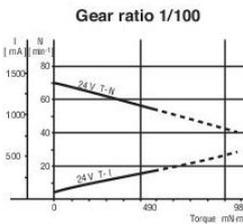
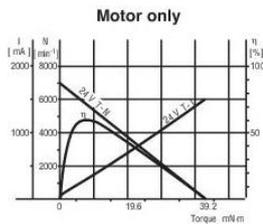
LC37G-183C

| Gear ratio | 1/10 | 1/30 | 1/60 | 1/100 | 1/150 | 1/300 | 1/500 | 1/1000 | 1/1500 |
|---------------------------------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|
| Rated torque mN·m | 29.4 | 49.0 | 147.1 | 196.1 | 294.2 | 588.4 | | | |
| Rated speed min ⁻¹ | 530 | 205 | 94 | 57 | 37 | 19 | 12 | 6.5 | 4.3 |
| Rated current A | 0.35 | | | | 0.3 | | | 0.13 | |
| No load speed min ⁻¹ | 700 | 235 | 117 | 70 | 47 | 23 | 14 | 7 | 4.6 |

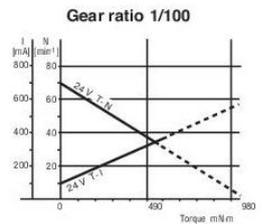
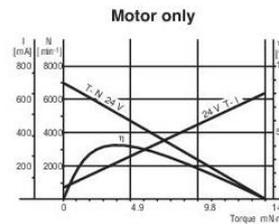
PERFORMANCE CURVES

(Figures in the table are typical values under rated operating condition.)

LC30G191C



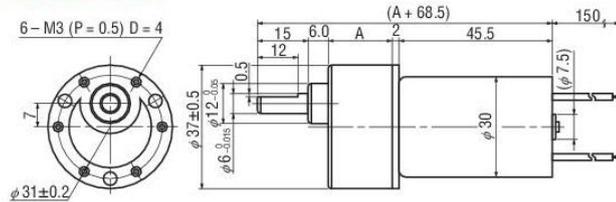
LC37G-183C



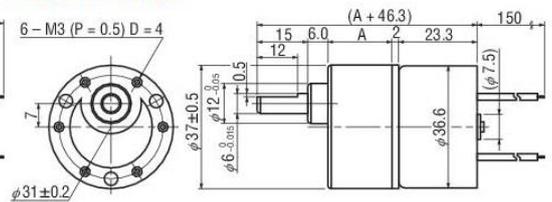
OUTLINE DIMENSIONS

(Unit: mm)

LC30G191C



LC37G-183C



Marks A

| Gear ratio | 1/10 | 1/30 | 1/60 | 1/100 | 1/150 | 1/300 | 1/500 | 1/1000 | 1/1500 |
|------------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|
| A | 19.0 | 21.5 | 24.0 | 26.5 | 29.0 | 31.5 | | | |

Fuente: Group Company Copal - Micro DC Motors Standard Specifications [23]

<http://www.nidec-copal-electronics.com/e/product/list/dc-motor/>

400KHz 60V 4A Switching Current Boost / Buck-Boost / Inverting DC/DC Converter

Features

- Wide 5V to 32V Input Voltage Range
- Positive or Negative Output Voltage Programming with a Single Feedback Pin
- Current Mode Control Provides Excellent Transient Response
- 1.25V reference adjustable version
- Fixed 400KHz Switching Frequency
- Maximum 4A Switching Current
- SW PIN Built in Over Voltage Protection
- Excellent line and load regulation
- EN PIN TTL shutdown capability
- Internal Optimize Power MOSFET
- High efficiency up to 94%
- Built in Frequency Compensation
- Built in Soft-Start Function
- Built in Thermal Shutdown Function
- Built in Current Limit Function
- Available in TO263-5L package

General Description

The XL6009 regulator is a wide input range, current mode, DC/DC converter which is capable of generating either positive or negative output voltages. It can be configured as either a boost, flyback, SEPIC or inverting converter. The XL6009 built in N-channel power MOSFET and fixed frequency oscillator, current-mode architecture results in stable operation over a wide range of supply and output voltages.

The XL6009 regulator is special design for portable electronic equipment applications.

Applications

- EPC / Notebook Car Adapter
- Automotive and Industrial Boost / Buck-Boost / Inverting Converters
- Portable Electronic Equipment



TO263-5L

Figure1. Package Type of XL6009

400KHz 60V 4A Switching Current Boost / Buck-Boost / Inverting DC/DC Converter

Pin Configurations

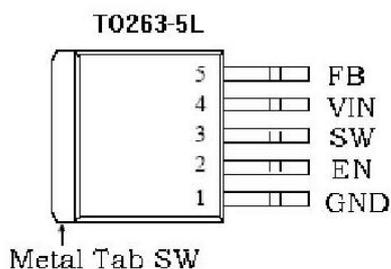


Figure2. Pin Configuration of XL6009 (Top View)

Table 1 Pin Description

| Pin Number | Pin Name | Description |
|------------|----------|---|
| 1 | GND | Ground Pin. |
| 2 | EN | Enable Pin. Drive EN pin low to turn off the device, drive it high to turn it on. Floating is default high. |
| 3 | SW | Power Switch Output Pin (SW). |
| 4 | VIN | Supply Voltage Input Pin. XL6009 operates from a 5V to 32V DC voltage. Bypass Vin to GND with a suitably large capacitor to eliminate noise on the input. |
| 5 | FB | Feedback Pin (FB). Through an external resistor divider network, FB senses the output voltage and regulates it. The feedback threshold voltage is 1.25V. |

400KHz 60V 4A Switching Current Boost / Buck-Boost / Inverting DC/DC Converter

Function Block

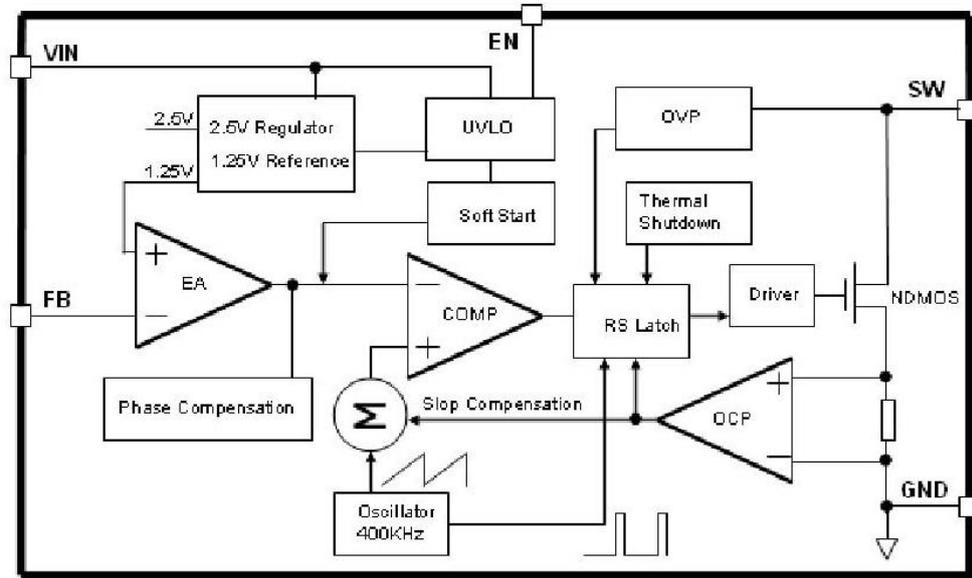


Figure3. Function Block Diagram of XL6009

Typical Application Circuit

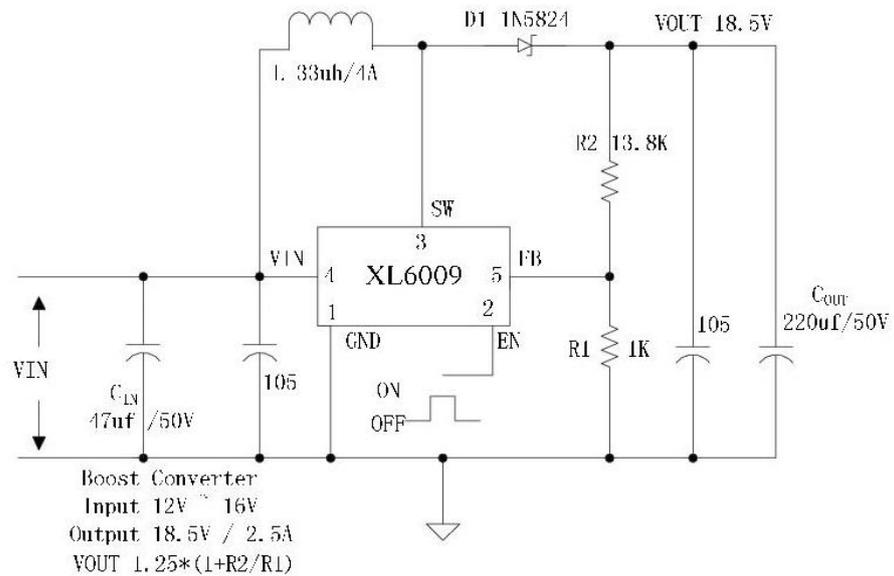


Figure4. XL6009 Typical Application Circuit (Boost Converter)

400KHz 60V 4A Switching Current Boost / Buck-Boost / Inverting DC/DC Converter

Ordering Information

| Package | Temperature Range | Part Number | Marking ID | Packing Type |
|---------|-------------------|-------------|------------|--------------|
| | | Lead Free | Lead Free | |
| | | XL6009E1 | XL6009E1 | Tube |
| | | XL6009TRE1 | XL6009E1 | Tape & Reel |

XLSEMI Pb-free products, as designated with “E1” suffix in the par number, are RoHS compliant.

Absolute Maximum Ratings (Note1)

| Parameter | Symbol | Value | Unit |
|---|---------------------|-------------------------|------|
| Input Voltage | V _{in} | -0.3 to 36 | V |
| Feedback Pin Voltage | V _{FB} | -0.3 to V _{in} | V |
| EN Pin Voltage | V _{EN} | -0.3 to V _{in} | V |
| Output Switch Pin Voltage | V _{Output} | -0.3 to 60 | V |
| Power Dissipation | P _D | Internally limited | mW |
| Thermal Resistance (TO263-5L) (Junction to Ambient, No Heatsink, Free Air) | R _{JA} | 30 | °C/W |
| Operating Junction Temperature | T _J | -40 to 125 | °C |
| Storage Temperature | T _{STG} | -65 to 150 | °C |
| Lead Temperature (Soldering, 10 sec) | T _{LEAD} | 260 | °C |
| ESD (HBM) | | >2000 | V |

Note1: Stresses greater than those listed under Maximum Ratings may cause permanent damage to the device. This is a stress rating only and functional operation of the device at these or any other conditions above those indicated in the operation is not implied. Exposure to absolute maximum rating conditions for extended periods may affect reliability.

400KHz 60V 4A Switching Current Boost / Buck-Boost / Inverting DC/DC Converter

XL6009 Electrical Characteristics

T_a = 25 °C ;unless otherwise specified.

| Symbol | Parameter | Test Condition | Min. | Typ. | Max. | Unit |
|---|------------------|--|-------|------|-------|------|
| <i>System parameters test circuit figure4</i> | | | | | | |
| VFB | Feedback Voltage | V _{in} = 12V to 16V, V _{out} =18V I _{load} =0.1A to 2A | 1.213 | 1.25 | 1.287 | V |
| Efficiency | η | V _{in} =12V, V _{out} =18.5V I _{out} =2A | - | 92 | - | % |

Electrical Characteristics (DC Parameters)

V_{in} = 12V, GND=0V, V_{in} & GND parallel connect a 220uf/50V capacitor; I_{out}=0.5A, T_a = 25°C; the others floating unless otherwise specified.

| Parameters | Symbol | Test Condition | Min. | Typ. | Max. | Unit |
|------------------------------|-------------------|--|------|------------|------|------|
| Input operation voltage | V _{in} | | 5 | | 32 | V |
| Shutdown Supply Current | I _{STBY} | V _{EN} =0V | | 70 | 100 | uA |
| Quiescent Supply Current | I _q | V _{EN} =2V, V _{FB} =V _{in} | | 2.5 | 5 | mA |
| Oscillator Frequency | F _{osc} | | 320 | 400 | 480 | Khz |
| Switch Current Limit | I _L | V _{FB} =0 | | 4 | | A |
| Output Power NMOS | R _{dson} | V _{in} =12V, I _{SW} =4A | | 110 | 120 | mohm |
| EN Pin Threshold | V _{EN} | High (Regulator ON) Low (Regulator OFF) | | 1.4 0.8 | | V |
| EN Pin Input Leakage Current | I _H | V _{EN} =2V (ON) | | 3 | 10 | uA |
| | I _L | V _{EN} =0V (OFF) | | 3 | 10 | uA |
| Max. Duty Cycle | D _{MAX} | V _{FB} =0V | | 90 | | % |

400KHz 60V 4A Switching Current Boost / Buck-Boost / Inverting DC/DC Converter

Schottky Diode Selection Table

| Current | Surface Mount | Through Hole | VR (The same as system maximum input voltage) | | | | |
|---------|---------------|--------------|---|--------|--------|--------|--------|
| | | | 20V | 30V | 40V | 50V | 60V |
| 1A | | ✓ | 1N5817 | 1N5818 | 1N5819 | | |
| | | | | | | | |
| 3A | | ✓ | 1N5820 | 1N5821 | 1N5822 | | |
| | | ✓ | MBR320 | MBR330 | MBR340 | MBR350 | MBR360 |
| | ✓ | | SK32 | SK33 | SK34 | SK35 | SK36 |
| | ✓ | | | 30WQ03 | 30WQ04 | 30WQ05 | |
| | | ✓ | | 31DQ03 | 31DQ04 | 31DQ05 | |
| | | ✓ | SR302 | SR303 | SR304 | SR305 | SR306 |
| 5A | | ✓ | 1N5823 | 1N5824 | 1N5825 | | |
| | | ✓ | SR502 | SR503 | SR504 | SR505 | SR506 |
| | | ✓ | SB520 | SB530 | SB540 | SB550 | SB560 |
| | ✓ | | | 50WQ03 | 50WQ04 | 50WQ05 | |

Typical System Application for EPC/Notebook Car Adapter – Boost (Output 18.5V/2.5A)

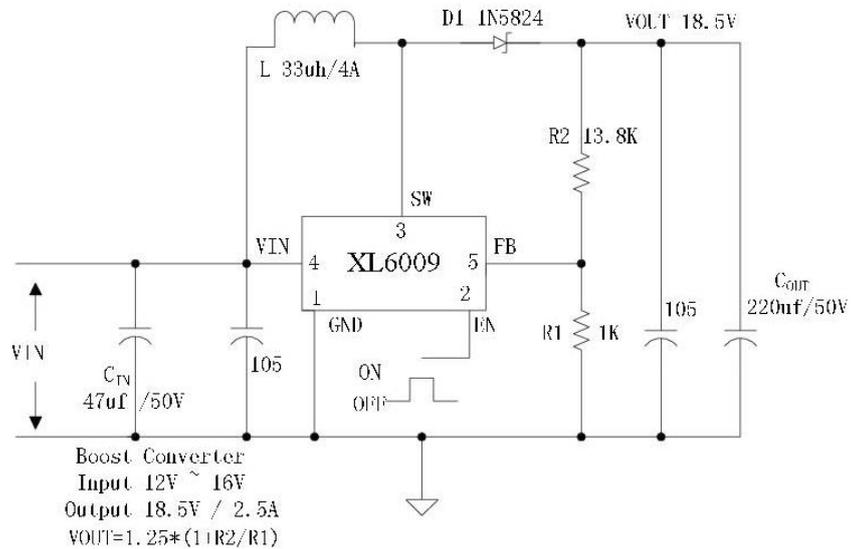


Figure5. XL6009 Typical System Application (Boost Converter)

400KHz 60V 4A Switching Current Boost / Buck-Boost / Inverting DC/DC Converter

**Typical System Application for Portable Notebook Car Adapter
– SEPIC Buck-Boost Topology (Input 10V~30V, Output 12V/2A)**

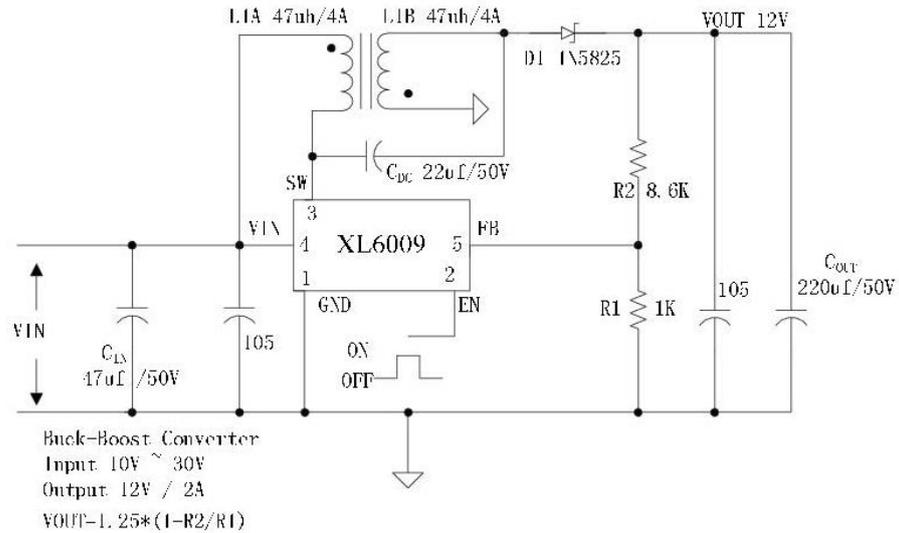


Figure6. XL6009 Typical System Application (SEPIC Buck-Boost Converter)

**Typical System Application for Inverting Converter
– SEPIC Inverting Topology (Input 10V~30V, Output + -12V/1A)**

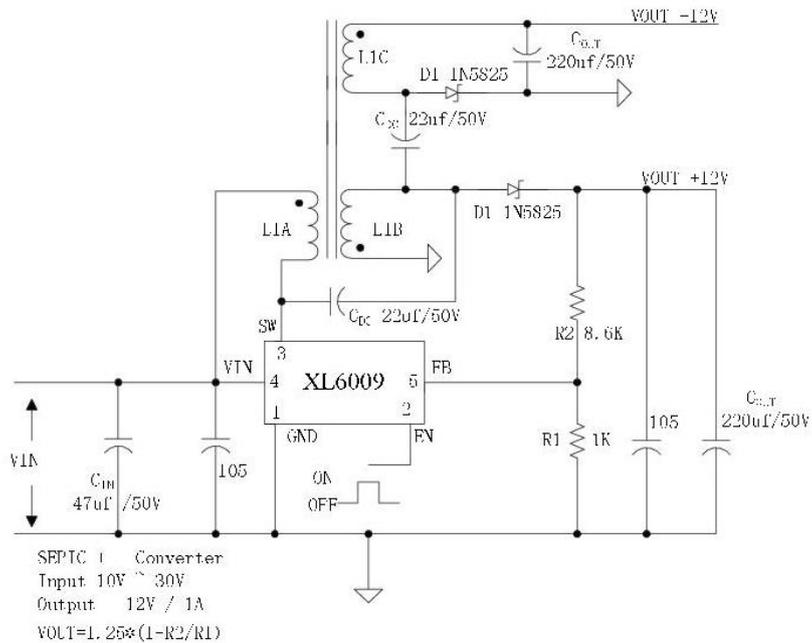
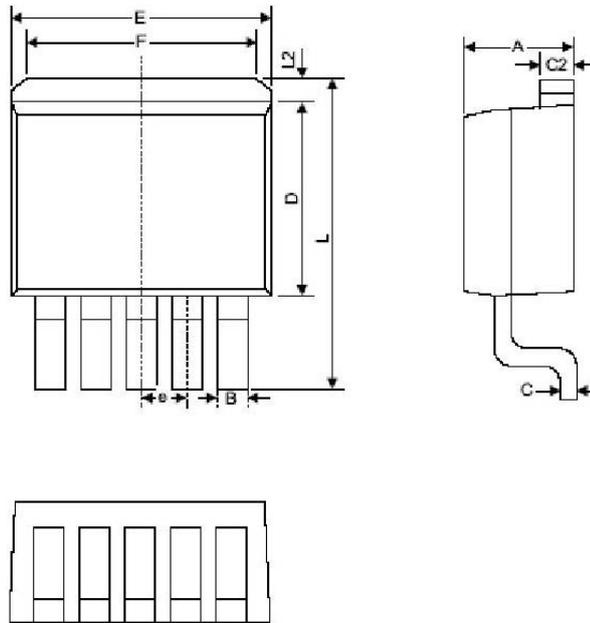


Figure7. XL6009 Typical System Application (SEPIC Inverting Converter)

400KHz 60V 4A Switching Current Boost / Buck-Boost / Inverting DC/DC Converter

Package Information

TO263-5L



| Symbol | Dimensions In Millimeters | | Dimensions In Inches | |
|--------|---------------------------|--------|----------------------|-------|
| | Min | Max | Min | Max |
| A | 4.440 | 4.650 | 0.175 | 0.183 |
| B | 0.710 | 0.970 | 0.028 | 0.038 |
| C | 0.360 | 0.640 | 0.014 | 0.025 |
| C2 | 1.255 | 1.285 | 0.049 | 0.051 |
| D | 8.390 | 8.890 | 0.330 | 0.350 |
| E | 9.960 | 10.360 | 0.392 | 0.408 |
| e | 1.550 | 1.850 | 0.061 | 0.073 |
| F | 6.360 | 7.360 | 0.250 | 0.290 |
| L | 13.950 | 14.750 | 0.549 | 0.581 |
| L2 | 1.120 | 1.420 | 0.044 | 0.056 |

Fuente: XLSEMI - XL6009 Specifications [36]

<http://www.datasheetpdf.com/PDF/XL6009/775384/1>

Anexo 3: Datos tabulados de la curva de voltaje y corriente de carga de la batería de 250mAh de LiPo.

| TIEMPO | VOLTAJE | CORRIENTE |
|---------|---------|-----------|
| 0:00:00 | 3,733 | 0,964 |
| 0:00:24 | 3,845 | 0,724 |
| 0:01:12 | 3,938 | 0,555 |
| 0:01:36 | 3,946 | 0,533 |
| 0:02:00 | 3,957 | 0,518 |
| 0:02:48 | 3,961 | 0,497 |
| 0:03:12 | 3,964 | 0,487 |
| 0:04:00 | 3,978 | 0,469 |
| 0:04:24 | 3,975 | 0,464 |
| 0:05:12 | 3,991 | 0,454 |
| 0:05:36 | 3,988 | 0,447 |
| 0:06:00 | 3,993 | 0,441 |
| 0:06:24 | 3,993 | 0,435 |
| 0:07:12 | 3,998 | 0,427 |
| 0:07:36 | 4,002 | 0,422 |
| 0:08:00 | 4,009 | 0,418 |
| 0:08:24 | 4,003 | 0,413 |
| 0:08:48 | 4,010 | 0,408 |
| 0:09:12 | 4,006 | 0,404 |
| 0:09:36 | 4,015 | 0,400 |
| 0:10:00 | 4,014 | 0,396 |
| 0:15:12 | 4,042 | 0,354 |
| 0:20:00 | 4,054 | 0,31 |
| 0:25:12 | 4,074 | 0,259 |
| 0:30:00 | 4,098 | 0,212 |
| 0:35:12 | 4,123 | 0,166 |
| 0:40:00 | 4,139 | 0,131 |
| 0:45:12 | 4,153 | 0,104 |
| 0:50:00 | 4,161 | 0,083 |
| 0:50:24 | 4,161 | 0,082 |
| 0:55:12 | 4,169 | 0,065 |
| 1:00:00 | 4,175 | 0,051 |
| 1:00:24 | 4,175 | 0,05 |
| 1:05:12 | 4,181 | 0,04 |
| 1:10:00 | 4,182 | 0,031 |
| 1:15:12 | 4,186 | 0,025 |
| 1:20:00 | 4,19 | 0,02 |
| 1:25:12 | 4,191 | 0,017 |
| 1:30:00 | 4,193 | 0,014 |
| 1:35:12 | 4,194 | 0,011 |
| 1:40:00 | 4,195 | 0,01 |

Fuente: *Los autores*

Anexo 4: Datasheet del li-polymer battery 402035 3.7v 250mah lithium polymer battery for MP3/MP4.



Specifications:

| Item | Specification |
|------------------------------------|--|
| Nominal Capacity | 250mah (0.2C, 2.75V discharge) |
| Minimum Capacity | 240mAh (0.2C, 2.75V discharge) |
| Charging Voltage | 4.35V±0.05V |
| Nominal Voltage | 3.7V |
| Charging Method | CC-CV (constant voltage with limited current) |
| Standard Charging Time | Standard charge: 3.0hours Rapid charge: 2.5hours |
| Max. Charge Current | can be customized (ambient temperature 25°C) |
| Max. Discharge Current | can be customized (ambient temperature 25°C) |
| Cell Weight | 5g max. |
| Operating Temperature (Ambient) | Charge: 0 to 45°C Discharge: -20 to 60°C |
| Storage Temperature | 1 year: -20 to 25°C 3 months: -20 to 45°C 1 month: -20 to 50°C |

Product Advantages:

1. Dual IC chips, that can anti-shortcircuit, anti-overcharger, anti-overcurrent, anti-overload;
2. Injection Technology to make battery more stable;
3. With short-circuit production function, safe and reliable;
4. Up to 500 cycles life,low self-discharge,no memory effect;
5. Factory mastered technology and competitive price;
6. CE/ROSH/SGS/UL/MSDS/UN38.3/IEC61233 standard.

Trading detail:

1. Packing: Industrial packing (can be as customer's requirements)
2. MOQ: 2000pcs (*Small trial order accepted*)
3. Delivery time: Usually 15-20 days after payment
4. Payment term: T/T, Western Union, Paypal

Application:

1. Portable electronic devices
2. Bluetooth headset,
3. Digital camera,
4. MP3 player, MP4 player,
5. Cellular phone, Digital phone, mobile phone,
6. PDA, tablet pc
7. DMB,
8. DVD, Portable DVD
9. MD,
10. Digital camcorder, Digital camera

Fuente: Alibaba – Specifications li-polymer battery 402035 3.7v 250mah [37]

https://www.alibaba.com/product-detail/li-polymer-battery-402035-3-7v_60396156632.html

Anexo 5: Programación del controlador Arduino

/*

CARGADOR ELÉCTRICO PORTÁTIL EN BASE A LA CINEMÁTICA DE LA
ARTICULACIÓN DE LA RODILLA

Autores:

Illescas Quichimbo Carlos Antonio

Salazar Baculima Miguel Ignacio

//(320 > 22V) (80 > 5.5V) (180 > 12V) 109=7

*/

```
void setup() {
```

```
  Serial.begin(9600);
```

```
  pinMode(13, OUTPUT);
```

```
  pinMode(2, OUTPUT);
```

```
}
```

```
// the loop routine runs over and over again forever:
```

```
void loop() {
```

```
  // read the input on analog pin 0:
```

```
  int sensorValue = analogRead(A0);
```

```
  // print out the value you read:
```

```
  if (sensorValue >= 109){
```

```
    //
```

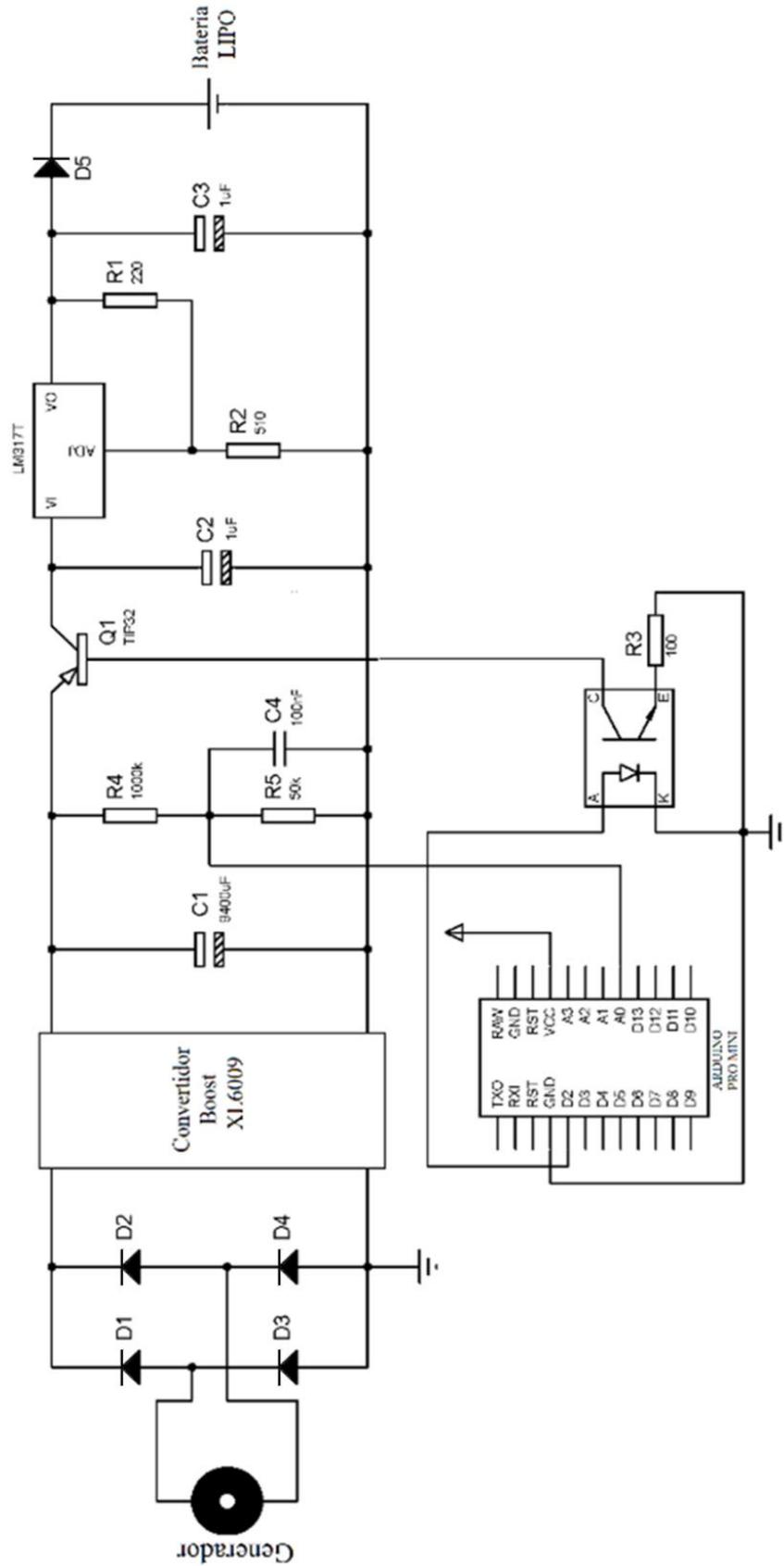
```
    digitalWrite(13,HIGH);
```

```
    digitalWrite(2,HIGH);
```

```
}  
if (sensorValue<=94){  
  //  
  digitalWrite(13,LOW);  
  digitalWrite(2,LOW);  
}  
  
Serial.println(sensorValue);  
delay(1);  
}
```

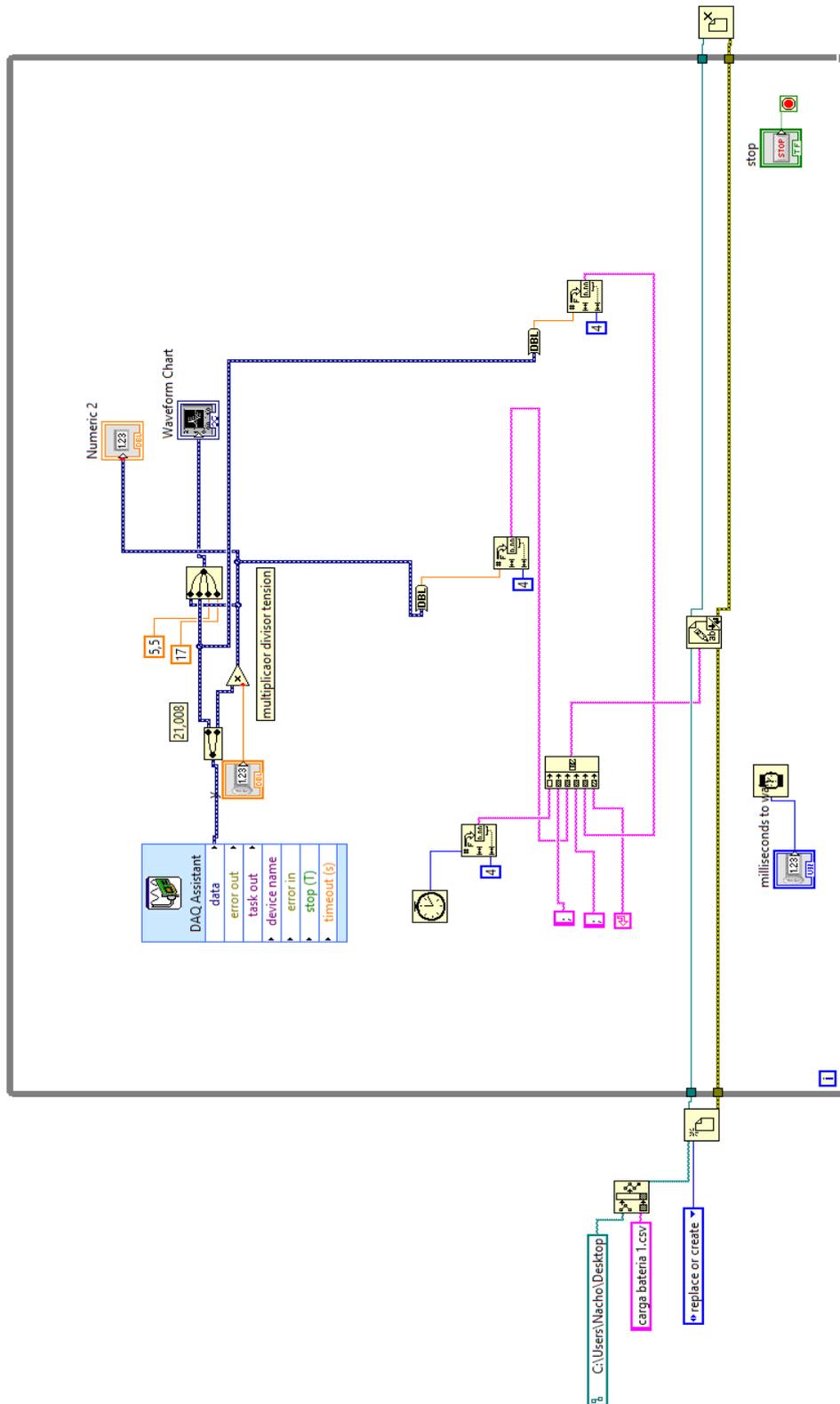
Fuente: *Los autores*

Anexo 6: Diagrama electrónico final del prototipo.



Fuente: Los autores

Anexo 7: Código de programación en Labview para adquirir datos.



Fuente: Los autores

Anexo 8: Interfaz osciloscopio - My Daq.

The screenshot displays the NI ELVISmx Oscilloscope LabVIEW interface. The main window is titled "Oscilloscope - NI ELVISmx" and features the LabVIEW logo. The interface is divided into several sections:

- Basic Settings:** Includes "Channel 0 Settings" (Source: AI 0, Scale: 500 mV, Vertical Position: -5) and "Channel 1 Settings" (Source: AI 1, Scale: 200 mV, Vertical Position: 0). Both channels are enabled with DC coupling.
- Timebase:** Set to 200 ms.
- Trigger:** Type is Immediate, Source is TRIG, and Horizontal Position is 50%.
- Instrument Control:** Device is myDAQ1 (NI myDAQ), Acquisition Mode is Run Continuously. Buttons for Run, Stop, Print, Log, and Help are present.
- Graph Area:** Shows two waveforms (CH0 and CH1) on a grid. The sample rate is 2,00 kS/s. A Timeout indicator is visible.
- Measurements:**
 - CH0 Meas: RMS: 3,704 V, Freq: ?
 - CH1 Meas: RMS: 38,91 mV, Freq: ?
 - Vp-p: 304,38 mV
 - Vp-p: 185,92 mV
- Controls:** Includes "Cursors On" (unchecked), "Display Measurements" (checked for CH0 and CH1), and "Graph Properties" button.

Fuente: Los autores