



BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA

FACULTAD DE CIENCIAS DE LA ELECTRÓNICA

MAESTRÍA EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA, OPCIÓN
INSTRUMENTACIÓN ELECTRÓNICA

Tesis para obtener el grado de
MAESTRO EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA

Sistema Cosechador de Energía Híbrido Basado en Tres Fuentes

Presenta:

Ing. José Antonio Rodríguez Cruz

Asesor:

Dr. Roberto Carlos Ambrosio Lázaro

Dr. Johan Jair Estrada López

Dr. Víctor R. González Díaz

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por haberme brindado el apoyo económico durante los dos años de maestría y evitar una preocupación en mi manutención.

A la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla (BUAP) por brindarme la oportunidad de explorar este nuevo camino del conocimiento y el apoyo diario que un estudiante necesita.

A la Facultad de Ciencias de la Electrónica (FCE) por permitirme ser parte de su grupo de jóvenes investigadores.

A mis asesores de tesis el Dr. Roberto Carlos Ambrosio Lázaro, Dr. Johan Jair Estrada López, Dr. Víctor Rodolfo González Díaz, por brindarme su tiempo para compartirme sus conocimientos, pero sobre todo la paciencia que me tuvieron.

A los miembros del jurado revisor Dr. José Fermi Guerrero Castellanos, Dr. Salvador Eugenio Ayala Raggi, Dra. María Monserrat Morín Castillo, por el tiempo invertido y por los consejos que me brindaron en cada una de las presentaciones que tuve oportunidad de exponerles mi tema.

A todos los docentes que me guiaron y acompañaron durante mi formación en el posgrado al compartirme sus conocimientos en cada una de las asignaturas impartidas.

A mi familia por darme ánimo y la fuerza necesaria durante este arduo proceso de mi formación académica, pero sobre todo por confiar y creer en mí.

A mi novia Karina Águila Sánchez porque al igual que todos, me supo brindar su apoyo, dar sus consejos y alentarme cuando más lo necesitaba.

Y por último, pero no por menos importante a todas las personas y amigos que me acompañaron desde siempre.

DEDICATORIA

Las personas nunca terminamos de aprender cosas nuevas, de enfrentar nuevos retos cada día por muy simples que se vean. Termina una etapa más en mi preparación académica en la que tuve el privilegio de volver a experimentar desvelos, preocupaciones, angustias y una serie de sacrificios que ahora sé que habrán valido la pena porque la principal razón de mi persona es no defraudar a quienes confiaron una vez más en mí.

Quiero dedicar este logro a mi familia: mi padre José Antonio Rodríguez Aguilar, mi madre Irene Cruz Juárez, mi hermana María Angélica Rodríguez Cruz y a mis sobrinos Ricardo Antonio Ramos Rodríguez y Romina Ramos Rodríguez, quienes han sido siempre el pilar de mi formación y crecimiento como persona, a ellos quienes siempre han tenido el sueño de verme sobresalir en todos los aspectos.

Porque como una vez me lo dijeron: Poner todo el esfuerzo en algo, te dará siempre buenos frutos.

Índice general

1. CONTEXTO Y MOTIVACIÓN	1
1.1. ANTECEDENTES	1
1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	8
1.3. HIPÓTESIS	9
1.4. OBJETIVOS	9
1.5. JUSTIFICACIÓN	9
1.6. PROPUESTA	10
2. ESTADO DEL ARTE Y ANTECEDENTES GENERALES	13
2.1. CONCEPTOS	13
2.1.1. EFICIENCIA	13
2.1.2. SELECCIÓN DE SENSORES	14
2.1.3. PIEZOELÉCTRICO	14
2.1.4. Modelado	17
2.1.5. Metodología de Análisis	19
2.1.6. FOTOVOLTAICA	20
2.1.7. BIOMECÁNICO	25
2.1.8. BATERÍAS	34
2.1.9. RECOLECTORES DE ENERGÍA	35
2.2. COSECHADORES DE ENERGÍA HÍBRIDO	37
2.3. Seguidores Del Máximo Punto De Potencia (MPPT)	45
2.4. APLICACIONES PARA LA COSECHA DE ENERGÍA BASADA EN EL MOVIMIENTO	45
2.4.1. REDES DE SENSORES INALÁMBRICOS (WSN).	45
2.4.2. OTRAS APLICACIONES	46
3. MODELADO DE CADA UNO DE LOS ELEMENTOS	47
3.1. Celda Solar	47
3.1.1. Recolección De Datos	47
3.1.2. Tratamiento De Datos	49
3.1.3. Simulación y Análisis de Celda Solar	51

3.2. Elemento Piezoeléctrico	53
3.2.1. Modelado	53
3.2.2. Simulación De Elemento Piezoeléctrico	56
4. DISEÑO DEL SISTEMA DE RECOLECCIÓN DE ENERGÍA HÍBRIDO A PARTIR DE 3 FUENTES	58
4.1. Celda Solar	58
4.2. Elemento Piezoeléctrico	59
4.3. Elemento Biomecánico	64
4.4. Diseño E Implementación	66
4.4.1. Generador Solar	66
4.4.2. Generador Biomecánico	73
4.4.3. Recolección de Energía a Partir de Dos Fuentes Ajustando el MPPT	79
4.4.4. Caracterización de elemento Piezoeléctrico.	83
4.4.5. Cosecha de Energía - Buscando Alternativas	95
4.5. Desarrollo Del Sistema de Cosecha de Energía Con Optoacopladores PC817	100
4.5.1. ANÁLISIS ESTADÍSTICO.	108
5. RESULTADOS Y ANÁLISIS	110
5.1. Análisis Estadístico	112
5.1.1. ANÁLISIS ANOVA	117
5.2. VENTAJAS DEL SISTEMA DE COSECHA DE ENERGÍA REALIZADO	123
5.3. Eficiencia del Sistema	124
6. CONCLUSIONES Y TRABAJO A FUTURO	128
A. Códigos Implementados	130
A.1. Código implementado para seleccionar el MPPT a partir de una sola fuente.	130
A.2. Código implementado para seleccionar la fuente que está proporcionando energía.	131
A.3. Código para selecció del MPPT de acuerdo con la fuente en uso.	132
A.4. Código para sistema híbrido de recolección de energía a partir de 3 fuentes con ajuste del control MPPT de acuerdo con la fuente en uso.	133
B. Interruptor MOSFET Back-To-Back	138
B.1. Interruptor MOSFET Back-To-Back	138
C. Costo de implementación y Artículos Publicados	148
BIBLIOGRAFIA	152

Índice de figuras

1.1. Consumo de energía para diferentes aplicaciones y densidad de energía para diferentes fuentes de energía. [1].	2
1.2. Arquitecturas convencionales para sistemas de cosecha de energía híbridos [2].	4
1.3. Comparación de densidad de potencia vs. voltaje de regeneración común y de suministro de energía [3].	5
1.4. Estructura híbrida de cosecha de energía [4].	6
1.5. Diagrama a bloques del circuito propuesto.	11
2.1. Configuración viga en voladizo de elemento piezoeléctrico.	15
2.2. Definición de ejes para materiales piezoeléctricos [5].	16
2.3. Diagrama a bloques de recolección de energía piezoeléctrica [6].	17
2.4. Microgenerador con transducción piezoeléctrica [7].	17
2.5. Circuito equivalente de microgenerador con acoplamiento electromecánico bajo [7].	18
2.6. Modelo piezoeléctrico simplificado [7].	18
2.7. Recolector de energía piezoeléctrico típico [8].	19
2.8. Estructura de una celda solar de silicio [9].	21
2.9. Circuito equivalente de un panel solar [10].	21
2.10. Extracción de la resistencia en serie y shunt a partir de la curva I-V bajo iluminación [11].	23
2.11. Curvas características I-V y P-V de una celda solar típica [12].	23
2.12. Resistencia característica de una celda solar [13].	24
2.13. Posición anatómica con tres planos de referencia (Sagital, transversal y frontal) y sus direcciones fundamentales [14].	27
2.14. Movimientos de la cadera y la rodilla respectivamente [14].	27
2.15. Descripción de las fases del ciclo de marcha [14].	28
2.16. Diagrama de los ángulos presentes en la rodilla [14].	28
2.17. a) Diseño del sistema de sensado, b) Implementación del sistema de sensado [14].	29

2.18. Gráfica del ángulo de rodilla por filtro complementario [14].	30
2.19. Resultados de la implementación del filtro de Kalman [14].	30
2.20. Estimación del ángulo con observador no lineal [14].	31
2.21. Diagrama a bloques del sistema de generación de energía [14].	32
2.22. Gráfica comparativa de posición deseada en azul y posición sensada por el servomecanismo en verde [14].	32
2.23. Diseño asistido por computadora (CAD) del sistema de transmisión [14].	33
2.24. Impresión 3D e implementación del sistema de transmisión [14].	33
2.25. Fuentes de energía y sus transductores para la conversión a energía eléctrica [15].	37
2.26. Circuito sumador para conectar múltiples fuentes [16].	39
2.27. Sistema híbrido de recolección de energía propuesto en [17].	40
2.28. Arquitectura Power ORing para la recolección de energía a partir de múl- tiples entradas [18].	40
2.29. Combinador de energía basado en buck-boost con esquema de inductor compartido [18].	42
2.30. Concepto básico de un combinador de potencia de DC basado en conden- sadores conmutados para la recolección de energía. [18].	42
2.31. Estructura topológica del MIC propuesto en [19]	43
3.1. conexión de una celda solar al instrumento de medición [20].	48
3.2. Diagrama de flujo del algoritmo que se implementó en Matlab.	48
3.3. Curvas características I-V y P-V experimentales.	50
3.4. Modelo eléctrico Single-Diode de una celda solar en LTSpice.	51
3.5. Curvas características I-V y P-V Simuladas.	52
3.6. Dimensiones y especificaciones de la capa del piezoeléctrico [21].	53
3.7. Gráfica Masa de Prueba vs. Frecuencia	54
3.8. Potencia vs. Frecuencia	55
3.9. Potencia vs. R_L	55
3.10. Diagrama de interfaz estándar en LTSpice para simulación de elemento piezoeléctrico.	56
3.11. Gráfica con los valores de corriente, voltaje y potencia de salida del ele- mento piezoeléctrico.	57
4.1. Elemento CAD para celda solar.	58
4.2. Elemento piezoeléctrico modelo S118-J1SS-1808YB.	59
4.3. Características dimensionales de elemento piezoeléctrico.	59
4.4. Elemento CAD para elemento piezoeléctrico.	61
4.5. Sistema para emular el impacto de una pisada en el ciclo de la marcha.	61

4.6. Señal de salida sin masa de prueba de elemento piezoeléctrico.	62
4.7. Señal de salida de elemento piezoeléctrico con masa de prueba de 3 gramos.	62
4.8. Elemento piezoeléctrico conectado en viga en voladizo.	63
4.9. Señal A.C. (rojo) y señal D.C. (amarilla) de elemento piezoeléctrico.	64
4.10. Reconstrucción del sistema biomecánico.	65
4.11. Señal de elemento biomecánico sin conectar a su centro de control.	65
4.12. Circuito típico de aplicación de ADP5090.	66
4.13. Placa de evaluación para cada una de las fuentes a utilizar.	67
4.14. Descripción de las placas de evaluación para las fuentes a utilizar.	67
4.15. Diagrama de conexión de placas de almacén de energía.	68
4.16. Esquema de conexión de celda solar conectando y desconectando una carga.	68
4.17. Medición de voltaje en celda solar sin carga ($V_{out}=1.2V$).	69
4.18. Medición de voltaje en celda solar con carga ($V_{out}=900mV$).	69
4.19. Esquema de conexión de celda solar a placa de evaluación y chip de harvesting.	70
4.20. Recolección de energía solar utilizando un chip de harvesting.	70
4.21. Voltaje de salida de 3V (sin carga) de ADP5090.	71
4.22. Voltaje de salida de 1.6V (con carga) de ADP5090.	71
4.23. Activación de transistor MOSFET para selección de MPPT.	72
4.24. Señal de activación de transistor MOSFET IRLZ44 para ajuste de MPPT de celda solar.	72
4.25. Esquema de conexión de elemento biomecánico conectando y desconectando una carga.	73
4.26. Medición de voltaje en elemento biomecánico sin carga ($V_{out} = 3V$).	74
4.27. Medición de voltaje en elemento biomecánico con carga ($V_{out} = 2.6V$).	74
4.28. Esquema de conexión de elemento biomecánico a placa de acondicionamiento de energía y chip de harvesting.	75
4.29. Conexión de elemento biomecánico a placa de acondicionamiento de energía y ADP5090 sin carga.	75
4.30. Conexión de elemento biomecánico a placa de acondicionamiento de energía y ADP5090 con carga.	76
4.31. Diagrama de conexión para recolección de energía a partir de dos fuentes.	77
4.32. Implementación física para la recolección a partir de dos fuentes.	77
4.33. Recolección de energía a partir del elemento biomecánico.	78
4.34. Recolección de energía a partir de la celda solar.	78
4.35. Arreglo de resistencias externas que configuran el MPPT.	80
4.36. Implementación de arreglo de resistencias para ajustar el MPPT para fuentes lineales y no lineales	81
4.37. Recolección de energía de elemento biomecánico.	82
4.38. Recolección de energía de celda solar y ajuste de control MPPT.	83

4.39. Diagrama de conexión de placa de almacén de energía para elemento piezoeléctrico.	83
4.40. Elemento piezoeléctrico montado en elemento CAD.	84
4.41. Elemento piezoeléctrico posicionado a la altura de la cintura.	84
4.42. Señal generando una pisada.	85
4.43. Señal generada a partir de un brinco.	85
4.44. Señal generada a partir de brincos continuos.	86
4.45. Señal generada cuando se trota o corre.	87
4.46. Arreglo de resistencias para obtener el 50 % del V_{oc} del elemento piezoeléctrico.	87
4.47. Voltaje rectificado de elemento piezoeléctrico de 1.2V (señal roja) utilizando R1 y R2 de $10M\Omega$. Datos del canal CH1.	88
4.48. Voltaje MPPT de 100mV (Señal amarilla) utilizando R1 y R2 de $10M\Omega$. Datos del canal CH2.	88
4.49. Voltaje rectificado de elemento piezoeléctrico de 376mV (Señal roja) utilizando R1 y R2 de $10K\Omega$. Datos del canal CH1.	89
4.50. Voltaje MPPT de 184mV (Señal amarilla) utilizando R1 y R2 de $10K\Omega$. Datos del canal CH2	90
4.51. Conexión de elemento piezoeléctrico y resistencias MPPT a chip de recolección ADP5090.	90
4.52. Diagrama de conexión para dos fuentes.	91
4.53. Adición de diodo rectificador en celda solar para evitar un flujo de corriente inversa.	91
4.54. Control MPPT con resistencias en el orden de $M\Omega$ para elemento biomecánico.	92
4.55. Control MPPT con resistencias en el orden de $M\Omega$ para celda solar.	93
4.56. Control MPPT con resistencias en el orden de $K\Omega$ para elemento biomecánico.	93
4.57. Control MPPT con resistencias en el orden de $K\Omega$ para celda solar.	94
4.58. Estructura interna del transistor MPSA13.	95
4.59. Recolección de energía a partir de 2 fuentes (celda solar y elemento biomecánico).	95
4.60. Conexión utilizando transistores BJT MPSA13.	96
4.61. Estructura interna de un fototransistor.	96
4.62. Diagrama de conexión de fototransistores.	97
4.63. Implementación de fototransistores para la recolección de energía.	97
4.64. Diagrama seguidor de voltaje.	98
4.65. Configuración OPAM LM358.	98
4.66. Medición de voltaje MPPT en elemento piezoeléctrico implementando seguidor de voltaje.	99
4.67. Medición de voltaje MPPT en elemento biomecánico.	99

4.68. Medición de voltaje MPPT en fotocelda implementando seguidor de voltaje.	100
4.69. Configuración PowerOring para la recolección de energía.	101
4.70. Configuración PowerORing utilizando fototransistores PC817 para la recolección de energía a partir de 3 fuentes.	101
4.71. Diagrama de máquina de estados para la cosecha de energía.	102
4.72. Estado 00 prioridad elemento biomecánico.	104
4.73. Estado 01 prioridad elemento biomecánico.	105
4.74. Estado 02 prioridad elemento piezoeléctrico.	105
4.75. Estado 03 prioridad elemento piezoeléctrico.	106
4.76. Estado 04 prioridad celda solar.	106
4.77. Estado 05 prioridad celda solar.	107
4.78. Estado 06 prioridad elemento piezoeléctrico.	107
4.79. Estado 07 prioridad elemento piezoeléctrico.	108
5.1. Diagrama de bloques del sistema de recolección de energía	110
5.2. Sistema híbrido de recolección de energía implementado físicamente.	111
5.3. Posicionamiento para el sistema híbrido de recolección de energía.	112
5.4. Posicionamiento experimental del sistema híbrido de recolección de energía.	112
5.5. Gráfica correspondiente a la prueba de caminar.	119
5.6. Gráfica correspondiente a la prueba de trotar.	120
5.7. Gráfica correspondiente a la prueba de trotar.	120
5.8. Gráfica de comparación de voltajes entre fuentes utilizadas a nivel laboratorio y campo, con su respectiva desviación estándar.	121
5.9. Eficiencia del sistema de cosecha de energía en diferentes condiciones.	125
5.10. Eficiencia del sistema de cosecha de energía en diferentes condiciones.	126
5.11. Comparación de calorías quemadas y voltaje obtenido en diferentes condiciones de uso.	127
B.1. Diodo corporal de transistor MOSFET canal N (IRLZ44).	138
B.2. Transistor MOSFET y diodo conectados en serie.	139
B.3. Configuración Back-To-Back.	139
B.4. Simulación del sistema de recolección de energía utilizando la configuración back-to-back con transistores MOSFET.	140
B.5. Elemento biomecánico entregando energía.	141
B.6. Elemento piezoeléctrico entregando energía.	141
B.7. Celda solar entregando energía.	142
B.8. Elemento biomecánico proporcionando menos de 3V.	143
B.9. Elemento piezoeléctrico proporcionando menos de 3V.	143
B.10. Celda solar proporcionando menos de 3v.	144

B.11.Diagrama de conexión para la cosecha de energía a partir de 2 fuentes. . .	144
B.12.Implementación física de transistores en configuración Back-To-Back y activación del arreglo 2.	145
B.13.Flujo de energía a través del arreglo 2.	145
B.14.Activación del arreglo 1 en configuración back-to-back.	146
B.15.Flujo de energía a través del arreglo 1.	146
B.16.Medición de fuentes de energía.	147

Índice de Tablas

1.1. Comparación de los diferentes voltajes de cosechadores de circuito abierto, dificultades de origen y requisitos de seguimiento [22].	4
2.1. Propiedades de materiales piezoeléctricos de uso común [23].	15
2.2. Tabla comparativa de generación de energía en diferentes articulaciones [14].	26
2.3. Liberación de energía y extracción de energía [24].	36
2.4. Comparación entre diferentes sistemas de cosecha de energía encontrados en el estado del arte [2].	38
2.5. Comparación de diferentes topologías en un sistema de recolección híbrido.	44
3.1. Parámetros obtenidos de la caracterización de una celda solar comercial. .	49
3.2. Tabla de especificaciones generales [21].	53
3.3. Tabla de especificaciones sin masa de prueba [21].	54
4.1. Especificaciones generales de elemento piezoeléctrico.	60
4.2. Especificaciones sin masa de prueba de elemento piezoeléctrico.	60
4.3. Criterio de selección de MPPPT.	82
4.4. voltaje de salida regulado.	94
4.5. Discriminación de fuentes para la cosecha de energía.	102
4.6. Estados que se repiten acorde a la discriminación de energía.	103
4.7. Niveles de voltaje para la recolección de energía.	104
4.8. Propuesta de diseño de experimentos.	109
5.1. Resultados de la prueba caminando 10m.	113
5.2. Resultados de la prueba trotando 10m.	113
5.3. Resultados de la prueba marchando 10m.	114
5.4. Resultados de la prueba caminando 20m.	114
5.5. Resultados de la prueba trotando 20m.	115
5.6. Resultados de la prueba marchando 20m.	115
5.7. Resultados de la prueba caminando 30m.	116
5.8. Resultados de la prueba trotando 30m.	116
5.9. Resultados de la prueba marchando 30m.	117

5.10. Análisis ANOVA para fuentes a utilizar.	118
5.11. Análisis ANOVA para condiciones de uso.	119
5.12. Comparación de este trabajo con recolectores de energía híbrido consulta- dos en el estado del arte.	123
5.13. Comparación de voltaje obtenido y calorías quemadas en diferentes condi- ciones de uso.	126
C.1. Costo de implementación de sistema de cosecha de energía.	149

Capítulo 1

CONTEXTO Y MOTIVACIÓN

1.1. ANTECEDENTES

El rápido crecimiento en la ciencia, tecnología y la industria tiene un incremento en las necesidades de energía eléctrica. Alrededor del 87% del consumo de energía en el mundo proviene de los fósiles (aceite, gas natural y carbón) los cuales son una fuente de energía natural que no pueden renovarse y dejan un impacto negativo para el medio ambiente [11].

El continuo daño ambiental y el uso de combustibles fósiles hacen un importante llamado a la planificación de un modelo energético que satisfaga las necesidades del ser humano y permita cuidar el medio ambiente. Es por esta razón que las energías renovables representan una prometedora solución frente a las deficiencias energéticas y a la problemática ambiental que amenaza el desarrollo de las principales actividades humanas [10]. Por lo tanto, es necesario el desarrollo de un sistema que sea capaz de obtener energía eléctrica a partir de fuentes naturales que sean amigables con el medio ambiente, tal como la utilización de la energía solar [11].

En la actualidad, el uso de aparatos electrónicos se está expandiendo rápidamente, los dispositivos electrónicos son reducidos en tamaño y el consumo de energía se reduce considerablemente por nueva tecnología electrónica. Los aparatos portátiles podrían ser integrados en accesorios y ropa tal como camisas, lentes, relojes, gorros, etc. Estos aparatos portátiles son soportados por un sistema de batería el cual requiere una carga frecuente. Para cargar estos dispositivos la fuente de energía no está disponible de manera accesible, lo cual es un retraso para los usuarios cada día. Este problema se puede superar utilizando las técnicas de recolección de energía las cuales capturan a ésta de fuentes naturales disponibles como lo es la energía solar, eólica, termal, de radio frecuencia (RF), vibracional y fotovoltaico, por mencionar algunas. La principal función de los circuitos cosechadores es capturar energía de manera eficiente con la menor pérdida y almacenarla

para un uso futuro, donde los niveles de energía son del orden de micro y nanowatts [25]. En la Figura 1.1 se puede observar el consumo de energía para diferentes aplicaciones y la densidad de energía para diferentes fuentes de energía.

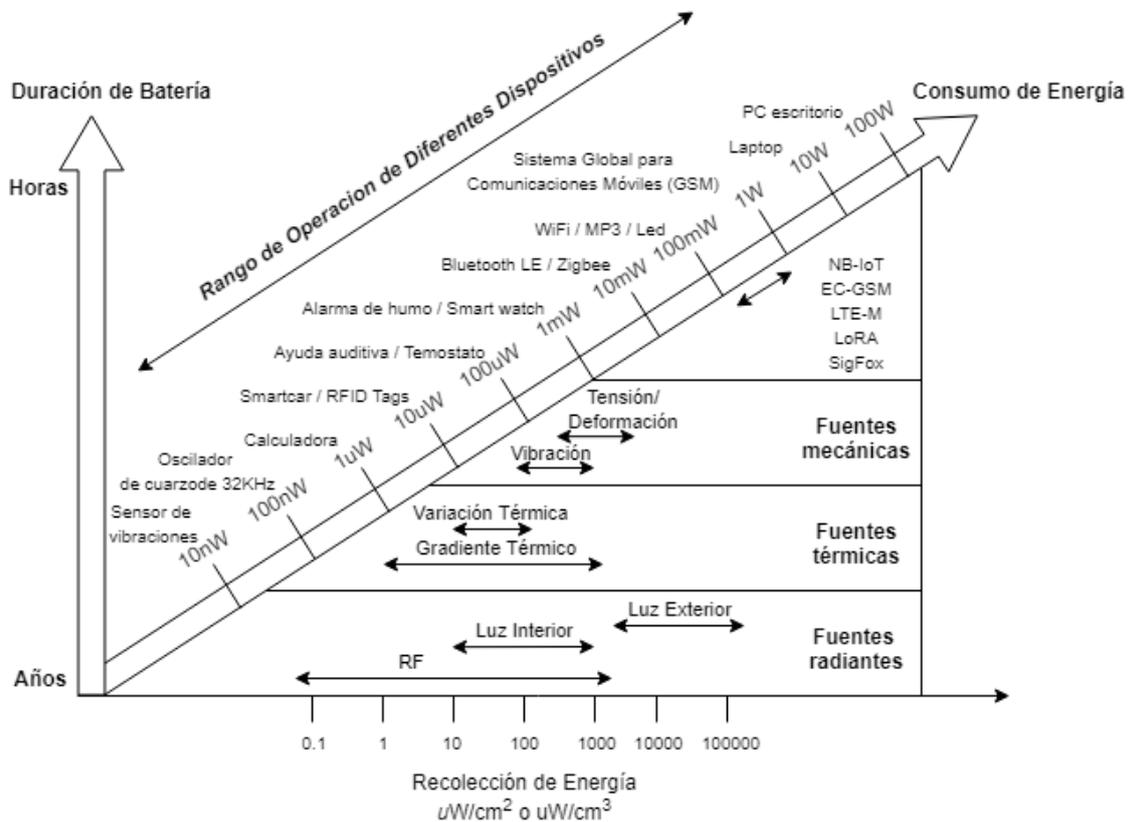


Figura 1.1: Consumo de energía para diferentes aplicaciones y densidad de energía para diferentes fuentes de energía. [1].

Recientemente, se han desarrollado recientes en circuitos electrónicos que han hecho que las redes de sensores inalámbricos (WSN's - Wireless Sensor Networks) de baja potencia estén ampliamente disponibles para edificios inteligentes, industria automotriz y electrónica implantable. Aunque las técnicas de diseño de baja potencia prolongan la operación de los WSN's, las baterías de tamaño limitado utilizadas para suministrar energía a los nodos de sensores limitan su tiempo de vida útil. El volumen de la batería no disminuye a la misma velocidad como los sensores electrónicos y por lo tanto, forma la mayor parte del sistema. Además, el reemplazo y mantenimiento de estas baterías puede ser costoso y prácticamente imposible debido a la ubicación del sensor o al número cada vez mayor de nodos de sensores. Tanto los sistemas de recolección de energía como los nodos de sensores inalámbricos autoalimentados, dependen de un conjunto diverso de fuentes de energía que se encuentran en su entorno y en constante cambio para obtener energía [4]. Para tratar con una gran variación en las condiciones ambientales se necesita una fuente

de energía altamente flexible [26]. Una solución factible para extender la vida útil de un nodo WSN es recolectar energía de fuentes de energía ambiental para recargar la batería o para operar sin ellas. Además, también se están haciendo intentos para aumentar la duración de la batería de los dispositivos portátiles que utilizan la recolección de energía [2, 22].

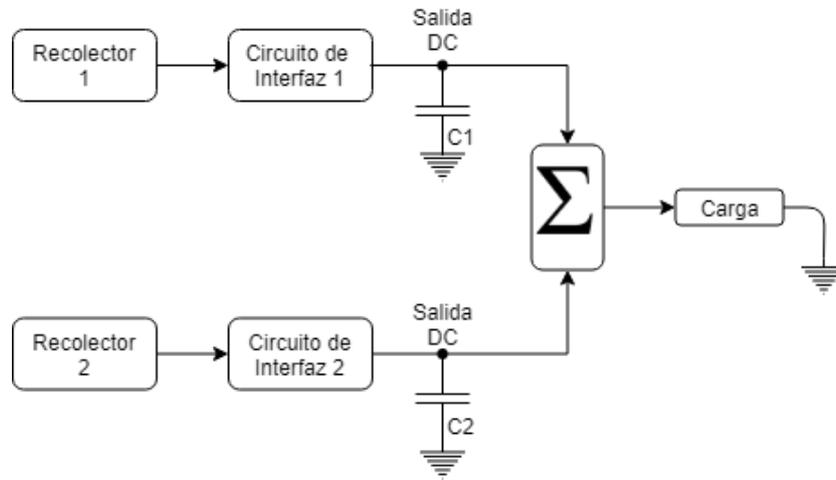
Se han diseñado y fabricado diversos transductores y circuitos de administración de energía para almacenarla a partir de una sola fuente y convertirla a una forma utilizable. Sin embargo, alimentar los WSN's exclusivamente con una fuente de energía reduce la confiabilidad del sistema debido al hecho de que la mayoría de las fuentes de energía son impredeciblemente intermitentes [2, 27], es decir, la recolección de energía por naturaleza es esporádica, haciéndola no confiable para sistemas prácticos [22]. Por lo tanto, una configuración híbrida eficiente en la cual el sistema extrae energía a partir de diferentes fuentes puede mejorar la resistencia y la confiabilidad de la operación del sistema [2].

Durante la última década, varios diseños de interfaz y cosechadores de energía híbridos han sido propuestos para extraer energía de fuentes del medio ambiente. Existen dos enfoques comunes en la literatura: 1) Adición de voltaje y 2) inductor compartido. La técnica de "Adición de Voltaje" que se muestra en la Figura 1.2(a) comprende un circuito de interface individual para cada cosechador de energía y la adición de señales de voltaje de salida generadas para impulsar una sola carga. Aunque esta topología tiene un control simple, impone limitaciones debido a la interacción entre circuitos integrados individuales en la etapa de salida y reduce la eficiencia general de los sistemas híbridos. En la técnica de "Inductor Compartido" que se muestra en la Figura 1.2(b), la energía generada por cada cosechador en el sistema de entradas múltiples es inicialmente almacenada en su propio condensador de amortiguación; ésta topología se utiliza para extraer energía de cada fuente en secuencia [2].

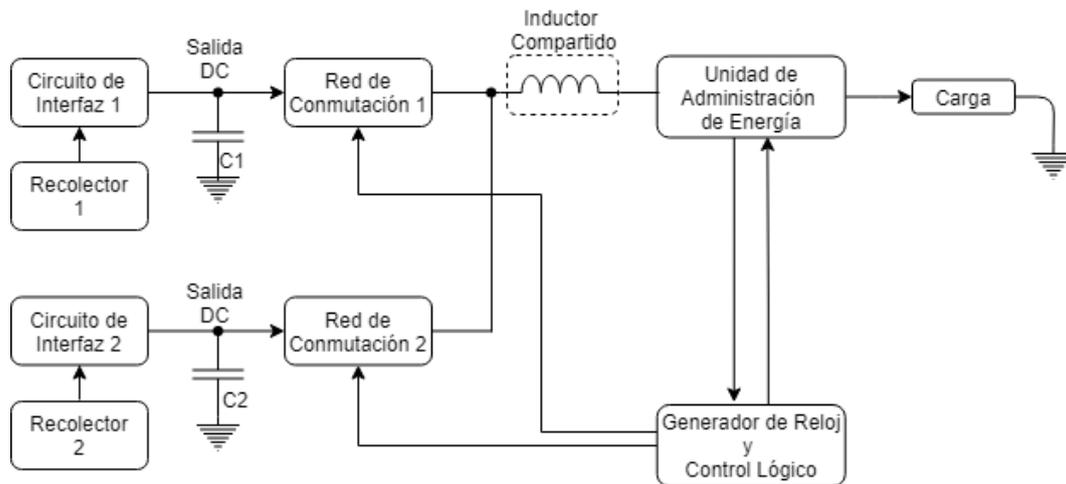
En sistemas de recolección de energía de múltiples entradas presentados en enfoques previos, ha implicado la adición de voltajes de salida de recolectores individuales al apilar condensadores de almacenamiento o seleccionando el recolector con una potencia instantánea máxima y direccionando su potencia a la salida. Sin embargo, existe la necesidad de una arquitectura más eficiente para sistemas de recolección de energía de múltiples entradas. La Tabla 1.1 resume los requerimientos de diferentes recolectores [22].

El aprovechamiento de las vibraciones del medio ambiente tienen un enfoque prometededor (Ver Figura 1.3). En la literatura hay diferentes sistemas electrónicos para aprovechar las vibraciones a baja frecuencia a través de cosechadores electromagnéticos (EM) y vibraciones a alta frecuencia a través de cosechadores piezoeléctricos (PE). La eliminación de esta energía mediante el uso de este tipo de cosechadores en una estructura híbrida puede

mejorar la potencia de salida extraída, ya que existen fuentes de vibración disponibles a bajas y altas frecuencias en el medio ambiente [2, 28].



(a) Técnica de Adición de Voltaje



(b) Técnica de Inductor Compartido

Figura 1.2: Arquitecturas convencionales para sistemas de cosecha de energía híbridos [2].

PARÁMETROS/TIPOS DE COSECHADOR	TÉRMICO	SOLAR	VIBRACIÓN
Material, Tamaño, Condiciones	BiTe, 50cm ² $\Delta T \sim 2-5K$	Si (1-2 series) 500-2000 lux	PZT (1-2 paralelo) >1g
Voltage de circuito cerrado	20-150 mV	150-800 mV	1.5-5 V
Impedancia de fuente	5-10 Ω	0.5-2 K Ω	10-100 K Ω
Extracción de máxima Potencia	Ajuste único	Ajuste único	Ajuste único

Tabla 1.1: Comparación de los diferentes voltajes de cosechadores de circuito abierto, dificultades de origen y requisitos de seguimiento [22].

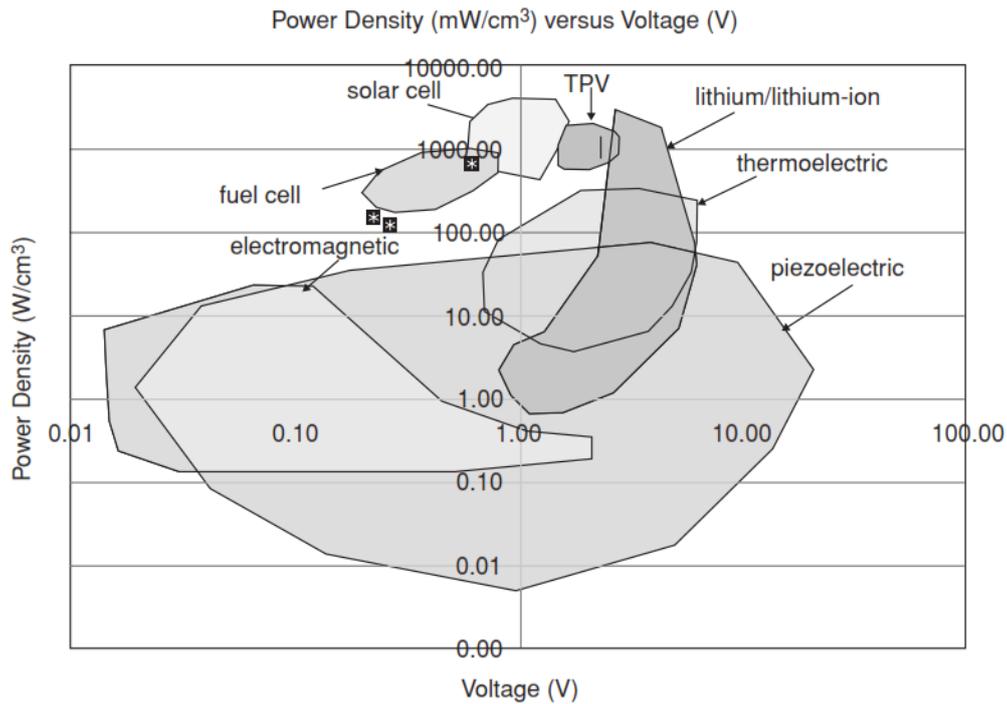


Figura 1.3: Comparación de densidad de potencia vs. voltaje de regeneración común y de suministro de energía [3].

Sin embargo, la recolección de energía de bajas y altas frecuencias en un esquema híbrido es más beneficiosa en términos de mayor capacidad, lo que a su vez mejora la vida útil y la fiabilidad del sistema en comparación con el sistema de entrada de fuente única [2].

La Figura 1.4 muestra un sistema híbrido de recolección de energía con generadores electromagnéticos, piezoeléctricos y termoelectricos (TE). Cada subsistema de recolección está terminado con un diodo Schottky fuera del chip para evitar un flujo de corriente inversa [4].

Tanto los recolectores EM's y PE's producen salidas de AC y necesitan circuitos de rectificación y administración de energía para acumular la carga extraída en un único elemento de almacenamiento. Hasta el momento, el rectificador de puente de diodos de onda completa es el convertidor más común, el cual ha sido implementado para convertir el voltaje AC en voltaje DC [2].

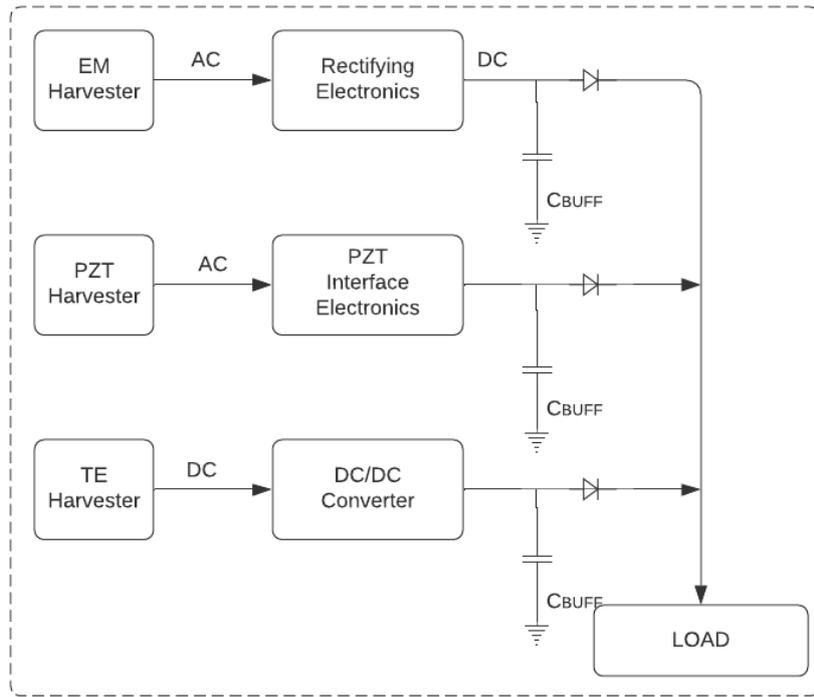


Figura 1.4: Estructura híbrida de cosecha de energía [4].

En 2015 se reportó un documento que describe un circuito integrado (IC – integrated circuit) de administración de energía para la recolección de energía piezoeléctrica que integra un convertidor AC-DC activo con inversión de carga residual junto con una arquitectura de autoabastecimiento inteligente para acelerar la fase de arranque y aumentar la efectividad de la recolección. Debido a la aleatoriedad de la potencia disponible y a su limitación intrínseca típica de decenas de μW , el IC se diseñó cuidadosamente para reducir la corriente de reposo hasta 150 nA, mientras que se espera que la eficiencia sea de al menos el 81%. Permitiendo así, que el sistema sea completamente autónomo incluso con muy poca energía de entrada. El IC se diseñó con una tecnología BCD de $0.32\ \mu\text{m}$ de STMicroelectronics y un área de $4.6\ \text{mm}^2$ [18, 29].

Un artículo que fue presentado en el año 2016 presenta una unidad de gestión de energía autónoma (PMU – Power managetmen Unit) de baja potencia capaz de realizar un seguimiento del punto de máxima potencia para fuentes renovables. Toda la energía proveniente de tres fuentes diferentes (elemento inductivo, piezoeléctrico y fotovoltaico) se agrega en forma de corriente conectando la salida de reguladores lineales individuales. En el esquema implementado no se utiliza ningún mecanismo de carga de la batería, además, el mecanismo de arranque ocurre a través de un circuito Power-on-Reset (POR) el cual es un circuito de arranque alimentado directamente de la fuente renovable. La arquitectura que utiliza también permite almacenar las cargas recolectadas de cada en-

trada en más de un capacitor de salida. La PMU entrega un voltaje de salida regulado a través de un LDO digital. La operación de aumento principal se realiza a través de un convertidor DC-DC capacitivo, consciente de la potencia, controlado dinámicamente, que realiza el procedimiento de ganancia de voltaje requerido. Luego, el LDO digital recibe la información de densidad de potencia de la fuente de recolección de energía del convertidor DC-DC y proporciona la regulación. La información sobre la disponibilidad de la densidad de potencia de la fuente se transmite al LDO digital para seleccionar el mejor tamaño de dispositivo de paso de un banco de tres arreglos. La PMU permite disminuir el consumo de energía al reducir las pérdidas de activación de la puerta asociada con los dispositivos de transistores de paso grande y mejora la eficiencia. El sistema se fabricó en un proceso CMOS de 180 nm y la eficiencia máxima de extremo a extremo se midió al 57% con 1.75 mW de potencia de entrada [18, 30].

En 2017 un artículo presentó la implementación de un convertidor elevador no aislado de cuatro entradas que se puede utilizar para la recolección de energía de múltiples fuentes, este convertidor se puede considerar como una bomba de carga Dickson modificada donde cada etapa esta fusionada con un convertidor boost (convertidor elevador) proporcionando así un voltaje de salida reforzado positivo sin ningún transformador adicional. En esta topología, la energía se puede extraer a partir de la interconexión de fuentes de diferentes características de corriente-voltaje a una carga común. Se menciona que el voltaje de salida se puede regular controlando el ciclo de trabajo, logrando así una estrategia de control fácil de implementar [18, 31].

En el mismo año (2017) otro artículo publicado presentó un documento que expone un combinador de DC de condensador conmutado adecuado para aplicaciones de recolección de energía. Dado que el voltaje de DC es pequeño, la adición de los voltajes de diferentes fuentes puede aumentar el voltaje de salida final con capacidad de autoarranque. Este enfoque es válido para cualquier número de fuentes de voltaje de DC. El diseño del combinador de DC de tres entradas sin controlador de circuito cerrado, se fabrica con tecnología CMOS de $0.13 \mu\text{m}$ y el área del chip es de $1.5 \times 1.5 \text{ mm}^2$. Con osciladores diferenciales sintonizables integrados basados en tiristores, el chip puede combinar la potencia de las tres entradas. La modulación de frecuencia manual se utiliza para entregar la máxima potencia a la carga. El sistema demuestra ser funcional incluso si una o dos de las fuentes son débiles o no están disponibles. Para condiciones de interior, la energía de tres celdas solares diferentes se combina donde se recolectan $70 \mu\text{W}$ con un voltaje de circuito abierto de 1.4 V y la corriente de cortocircuito de $160 \mu\text{A}$ [32].

De los trabajos más recientes de investigación presentados en el año 2019, se reporta un artículo que presenta una interfaz de recolección de energía híbrida eficiente mediante

el uso de fuentes EM's y PE's para impulsar una sola carga. La salida del recolector EM se rectifica a través de una estructura duplicadora activa autoalimentada y se almacena en un condensador para luego ser transferida al recolector PE y aumentar la fuerza de amortiguación y extracción de carga. La potencia total que se extrae de ambos cosechadores es mayor que la potencia obtenida de manera individual. La operación híbrida se valida a través de una plataforma compacta y portátil que incluye recolectores EM's y PE's diseñados a medida para absorber la energía del movimiento humano. El sistema proporciona una salida de 1V a 3.4V para encender nodos de sensores inalámbricos con una amplia gama de frecuencias de vibración y genera entre 1 y 100 μ W con una eficiencia máxima de conversión de energía del 90 % [2].

1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El daño al medio ambiente producido por los sistemas tradicionales y el uso de los recursos no renovables para la generación de energía eléctrica es un problema que va en aumento, por tal motivo es necesaria la búsqueda de alternativas amigables con el medio ambiente que satisfagan el consumo energético de los individuos.

Alguno de los efectos es la ausencia de energía eléctrica renovable en lugares que no disponen de infraestructura adecuada para suministrar energía eléctrica que requieren las personas cuando realizan alguna actividad cotidiana (traslado al trabajo, ir al supermercado, salir de paseo, caminar, o vivir en una zona rural, por mencionar algunas) para cargar sus dispositivos portátiles cuando se agota la batería.

Teniendo como efectos negativos que se apague el equipo electrónico (inaccesibilidad al equipo), no cargar la batería del equipo, nula interacción hombre-dispositivo cuando se descarga totalmente la batería, así como el nulo aprovechamiento de los recursos naturales.

Ante esta situación se espera que este proyecto de investigación contribuya como una fuente alternativa de energía eléctrica factible a nivel micro-escala para lugares en donde no se dispone de la energía eléctrica de manera constante y accesible para alimentar dispositivos de uso personal, o nivel macro-escala para zonas rurales con acceso limitado o nulo al sistema de distribución de energía eléctrica.

1.3. HIPÓTESIS

La hipótesis de la presente investigación es la siguiente:

- La generación de energía eléctrica a partir de tres fuentes renovables es eficaz en lugares donde no existe la infraestructura adecuada para su acceso y de esta manera poder alimentar dispositivos de bajo consumo.

1.4. OBJETIVOS

▪ OBJETIVO GENERAL

Implementar a nivel discreto el diseño de un sistema de recolección de energía híbrido para incrementar la capacidad de potencia a través de la combinación de cosechadores individuales fotovoltaico, piezoeléctrico y biomecánico.

▪ OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Conocer y determinar las características, parámetros y/o especificaciones de cada tipo de recolector a utilizar: fotovoltaico, piezoeléctrico y biomecánico.
2. Realizar el modelo y la simulación del recolector de energía híbrido para obtener los parámetros del comportamiento del sistema.
3. Implementar a nivel discreto el diseño del recolector de energía híbrido considerando las etapas de conversión DC-DC y almacenamiento.
4. Realizar pruebas para obtener su eficiencia y compararla con los valores obtenidos en simulación y/o el estado del arte.

1.5. JUSTIFICACIÓN

La motivación de la investigación en este campo se debe al menor consumo de energía de dispositivos electrónicos de bajo consumo, tal como las redes inalámbricas utilizadas en aplicaciones de monitoreo pasivo y activo [3].

El diseño de una unidad de administración de energía tendrá algunos desafíos clave, como [4]:

1. Los convertidores de energía tienen que tratar con un rango adecuado de voltajes de entrada para diferentes recolectores.

-
2. La alta eficiencia de extremo a extremo es considerablemente importante para estos sistemas de ultra bajo consumo.

Al utilizar un recolector de energía es posible lograr un funcionamiento casi perpetuo, sin embargo, el cosechador único o la fuente de recolección única pueden permanecer insuficiente para la alimentación de energía en los sistemas como dispositivos electrónicos, biosensores, monitoreo del cuidado de la salud humana, estructural y de máquinas, y nodos de sensores inalámbricos (WSN's). Dependiendo de una sola fuente de energía reduce la confiabilidad del sistema debido al hecho de que la mayoría de las fuentes de energía son impredeciblemente intermitentes [2]. Para superar este problema, se lleva a cabo la hibridación de recolectores de energía (HEH - Hybrid Energy Harvesting) para poder aumentar la generación de energía limitada en recolectores de energía individuales.

Por lo tanto, una configuración híbrida eficiente en la cual el sistema extrae energía a partir de diferentes fuentes de energía, puede mejorar la resistencia y la confiabilidad de la operación en el sistema, el cual está enfocado para el uso de dispositivos de baja potencia. La relevancia social y tecnológica en este proyecto radica en beneficiar e intentar suplir las necesidades energéticas dirigida a personas que no disponen de energía eléctrica de modo constante y accesible para alimentar dispositivos electrónicos de bajo consumo de potencia como lo son: teléfonos celulares, tabletas electrónicas, reproductores MP3, agendas electrónicas personales, entre otros. En donde el objetivo principal consiste en obtener una solución óptima para el abastecimiento energético aislado de la red eléctrica mediante un sistema de recolección de energía renovable.

El objetivo final en este campo de investigación es alimentar dispositivos de bajo consumo de potencia mediante el uso de energía mecánica disponible en su ambiente como lo son las vibraciones y la marcha humana; y de la energía natural disponible en el medio ambiente como lo es la energía solar. Si esto se logra, los requerimientos de una alimentación externa, los costos de mantenimiento para el reemplazo periódico de baterías así como el desperdicio químico de baterías convencionales podría ser reducido [3].

1.6. PROPUESTA

Los sistemas de cosecha de energía han llamado y recibido la atención en el campo de investigación de energías renovables y sustentables para realizar WSN's auto-alimentados y sistemas de carga automática.

Existen diferentes configuraciones híbridas para la recolección de la energía del medio ambiente o del medio en el que se encuentre, incluyendo dos o más fuentes ya sean del

mismo o diferente tipo para su recolección. Sin embargo, a la fecha no hay una estrategia óptima que implique una necesidad de poder aprovechar cualquier fenómeno que se presente.

Adicionalmente y derivado del análisis de la literatura, se observa que no hay soluciones únicas o generales, por lo que en este trabajo de investigación se propone implementar un recolector de energía híbrido a partir de tres fuentes diferentes (piezoeléctrico, fotovoltaico y biomecánico) para incrementar la potencia de salida DC a través de la combinación de los recolectores mencionados y tener una mejor administración de energía en la recolección de la misma y de esta manera poder alimentar dispositivos de bajo consumo de potencia cuando se requiera de energía eléctrica, teniendo en cuenta que el principal objetivo de una PMU es proporcionar un suministro de energía eléctrica constante a una carga. Igualmente, se propone reutilizar la topología PowerOring debido a que es una de las formas más convencionales de recolectar energía a partir de múltiples fuentes y del mismo modo reducir el número de componentes externos que se necesitan permitiendo un mejor acoplamiento para la recolección de energía.

La Figura 1.5 muestra el diagrama a bloques del circuito propuesto para el sistema cosechador de energía híbrido.

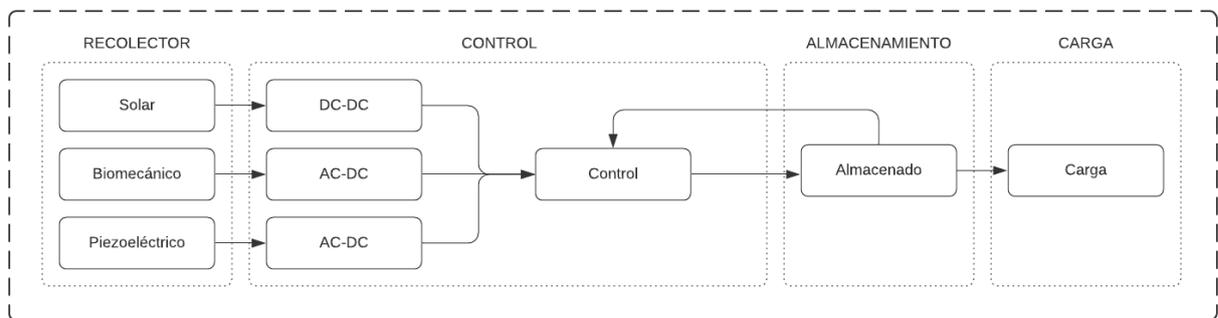


Figura 1.5: Diagrama a bloques del circuito propuesto.

Mediante diferentes etapas del cosechador, se pretende recolectar la energía recibida del medio ambiente; la primera etapa (llamada recolector, cosechador o fuente) corresponde a los módulos recolectores que se utilizaran (solar, biomecánico y piezoeléctrico), su función es captar las pequeñas cantidades de energía por medio de un sensor o transductor, pasando por la etapa de control (segundo bloque) la cual procesara la energía recibida y proporcionara las leyes de conexión y desconexión del sistema de generación de energía y la cual convertirá en energía adecuada para poder así administrarla (circuito administrador de energía), esta etapa es la más importante ya que de ella depende la ma-

por transferencia posible de energía recolectada para evitar el uso de baterías auxiliares, finalmente se pasa a una etapa de almacenamiento la cual retendrá la energía procesada para que ésta sea utilizada o transferida al sistema o elemento de carga cuando se requiera.

La implementación del sistema híbrido se analizará considerando los componentes disponibles en el mercado, debido a que existen diferentes algoritmos para la implementación de un sistema de este tipo. De esta manera, será posible llevar a cabo una evaluación del desempeño del sistema frente a las posibles variantes del proyecto, ya que puede haber condiciones de entorno muy diferentes que pueden influir de manera determinante en la complejidad de la implementación del sistema.

La ventaja de un sistema de recolección de energía híbrido es que se puede aprovechar la energía proveniente de diferentes fuentes al mismo tiempo, lo cual aumenta la confiabilidad y eficiencia del sistema. Con base en la literatura, este tipo de sistemas híbridos deben ser capaces de alimentarse a partir de la energía recolectada, teniendo en cuenta que para el arranque del sistema se tenga la posibilidad de utilizar baterías auxiliares. De esta forma, se aporta una posible solución a la necesidad de alimentar dispositivos de uso personal a partir de la recolección de energía que libera el cuerpo humano durante el ciclo de marcha, la vibración a la cual se está expuesto inconscientemente y a la disponibilidad de la luz solar presente en el medio ambiente prolongando así la vida útil de operación de estos dispositivos al no tener acceso a una red de alimentación .

Capítulo 2

ESTADO DEL ARTE Y ANTECEDENTES GENERALES

2.1. CONCEPTOS

2.1.1. EFICIENCIA

La electricidad es una de las formas de energía de mayor uso, de tal forma que su coste agrava sobre todos y cada uno de los sectores de la industria, servicios y a la economía doméstica. Las proporciones actuales en cuanto a fuentes de energía se distribuyen de la siguiente manera: 80 % combustibles fósiles, 10 % biomasa, 6 % energía nuclear, 2 % energía hidráulica y 2 % energías renovables.

A partir de este hecho, es fácil deducir que cualquier acción que tienda a mejorar la “Eficiencia Energética” de todo lo que represente un “Uso Racional de la Energía”, tendrá repercusiones importantes sobre la economía de todos y cada uno de los sectores implicados. Estos términos se refieren a obtener el máximo rendimiento de la energía consumida y de las instalaciones necesarias para su generación, transporte y utilización, garantizando un funcionamiento sin interferencias de todos los receptores conectados a la red de distribución.

La electricidad tiene un grave inconveniente con respecto a otros tipos de energía ya que no permite su almacenamiento en cantidades significativas, lo cual implica generarla y transportarla en el preciso momento de su utilización. Así, uno de los aspectos fundamentales para el uso racional de energía estriba en generar y transportar en todo momento solo la energía útil (activa) [33].

2.1.2. SELECCIÓN DE SENSORES

Al seleccionar un sensor para la aplicación en particular hay que considerar diferentes factores: 1) **El tipo de medición a realizar**, por ejemplo, la variable a medir, su valor nominal, el rango de valores, la exactitud, velocidad de medición y las condiciones ambientales en las que se realizará la medición y 2) **El tipo de salida que se requiere del sensor**, lo cual determinara las condiciones de acondicionamiento de la señal a fin de contar con las señales de salida idóneas para la medición.

Con base en lo anterior, se pueden identificar los posibles sensores teniendo en cuenta rango, exactitud, linealidad, velocidad de respuesta, confiabilidad, facilidad de mantenimiento, duración, requisitos de alimentación eléctrica, disponibilidad y costo [34].

2.1.3. PIEZOELÉCTRICO

Hay tres métodos principales para la transducción y recolección de la energía inercial: electromagnético, electrostático y piezoeléctrico; siendo éste último la técnica de recolección de energía mecánica más prometedora [7, 28]. En este campo, los elementos piezoeléctricos son buenos candidatos para la recolección de energía mediante las vibraciones ambientales por que son una de las fuentes disponibles más comunes [35] ofreciendo excelentes prestaciones gracias a su alta densidad de potencia que los hace aptos para micro-generadores integrados.

Los materiales piezoeléctricos naturales de uso mas frecuente son el cuarzo y la turmalina, mientras que las sustancias sintéticas de mayor aplicación son cerámicas debido a que tienen gran estabilidad térmica y física, pueden fabricarse en muy distintas formas y con un amplio rango de valores en las propiedades de interés (constante dieléctrica, coeficiente piezoeléctrico, temperatura de Curie, etc.). La Tabla 2.1 resume las principales propiedades de materiales piezoeléctricos de uso común. Entre las ventajas de los sensores piezoeléctricos está su alta sensibilidad y su alta rigidez mecánica, además, su alta impedancia mecánica es muy conveniente para medir variables de esfuerzo (fuerza, presión) [23].

Parámetro Unidad	Densidad Kg*m ³	T _c °C	ε ₁₁ ^T	ε ₃₃ ^T	d pC/N	Resistividad Ω*cm
Cuarzo	2649	550	4.52	4.68	d ₁₁ d ₁₄ 2.31 0.73	≈ 10 ¹⁴
PZT	7500-7900	193-490	-	425-1900	d ₃₃ 80-593	≈ 10 ¹³
PVDF (Kynar)	1780	-	-	12	d ₃₁ 23	≈ 10 ¹⁵

Tabla 2.1: Propiedades de materiales piezoeléctricos de uso común [23].

El efecto piezoeléctrico existe en dos dominios: **1) efecto piezoeléctrico directo** que es la capacidad de convertir la energía mecánica a energía eléctrica y **2) efecto piezoeléctrico indirecto** que describe la conversión de energía eléctrica en energía mecánica [8, 23]. De estos dos dominios el primero se utiliza para fines de recolección de energía .

La configuración de recolección de energía piezoeléctrica más común es “viga en voladizo” como se muestra en la Figura 2.1, ya que se puede producir una tensión mecánica dentro del elemento piezoeléctrico durante la vibración [36] en donde el rendimiento óptimo del sistema se obtiene cuando la frecuencia de la vibración ambiental se acerca a la frecuencia de resonancia del recolector, bajo estas condiciones, la energía de vibración máxima se transfiere a la cosechadora y se convierte en energía eléctrica útil [8]. Cualquiera que sea el tipo de interfaz considerada, el voltaje de salida del elemento piezoeléctrico requiere ser rectificado para asegurar un flujo de carga adecuado en la batería o condensador de almacenamiento antes de ser utilizado por un dispositivo [35]. La potencia de salida de los dispositivos de recolección de energía típicos podría limitarse a unos pocos cientos de micro-vatios solamente [8].

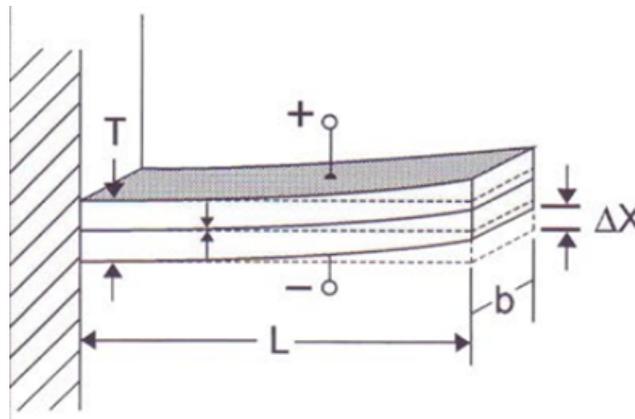


Figura 2.1: Configuración viga en voladizo de elemento piezoeléctrico.

Los materiales piezoeléctricos generalmente se utilizan en dos modos: **1) modo d_{31}** : La tensión se aplica a lo largo de la dirección de la longitud para producir voltaje a lo largo de la dirección del espesor y **2) modo d_{33}** : Tanto la tensión como el voltaje actúan en la misma dirección que es la dirección del espesor [8].

Los subíndices en algunas de las constantes indican la dirección o el modo de las interacciones mecánicas y eléctricas como se muestra en la Figura 2.2, por ejemplo, el “modo 31” indica que la carga eléctrica aplicada al eje 3 causa tensión en el eje 1; ésta tensión producirá una carga eléctrica a lo largo del eje 3, por lo tanto (dado que el dispositivo en la Figura 2.2 forma un capacitor), jalando el material piezoeléctrico a lo largo del eje 1 se desarrolla un voltaje en los 3 ejes.

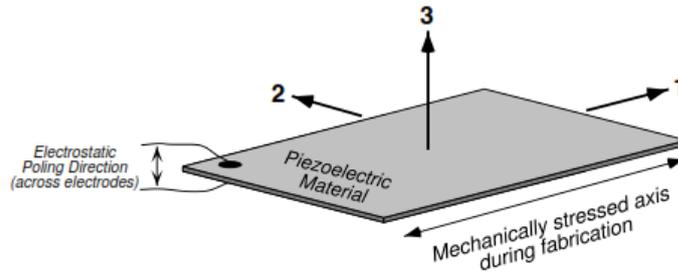


Figura 2.2: Definición de ejes para materiales piezoeléctricos [5].

La descripción de la interrelación entre las magnitudes eléctricas y mecánicas de un material piezoeléctrico se hace mediante las denominadas ecuaciones piezoeléctricas. Para una placa piezoeléctrica de grosor “ h ”, el voltaje generado a través de las terminales del parche PE se puede expresar en términos de la deformación S_1 como:

$$V = \left(\frac{d_{31} \bar{Y}^E h}{\varepsilon_{33}^T} \right) S_1 \quad (2.1)$$

Donde d_{31} es el coeficiente de deformación piezoeléctrica que proporciona el acoplamiento entre la deformación mecánica (a lo largo del eje 1) y el campo eléctrico E_3 (a lo largo del eje 3), $\bar{Y}^E = Y^E(1 + j\eta)$ es el módulo de Young complejo de elasticidad del parche PE a campo eléctrico constante y $\varepsilon_{33}^T = \varepsilon_{33}^T(1 - j\delta)$ la permitividad eléctrica compleja (dirección al eje 3) del material PE a tensión constante; con $j = \sqrt{-1}$, η y δ indicando respectivamente la pérdida mecánica y los factores de pérdida dieléctrica del material PZT [8].

La Figura 2.3 muestra un esquema general de recolección de energía piezoeléctrica que consta de 5 componentes principales: 1) Transductor PE, 2) Convertidor AC-DC debido a que la energía eléctrica a la salida del transductor esta en función del tiempo, 3) Dispositivo de almacén de energía (batería o condensador), 4) Regulador de voltaje para asegurar un voltaje adecuado a la salida y 5) Carga que hará uso de la energía recolectada y procesada [6]. La recolección de energía piezoeléctrica es más atractiva debido a que su estructura es más simple, sin partes móviles, mantenimiento insignificante, gran densidad de energía y no requiere una fuente de voltaje adicional [8].

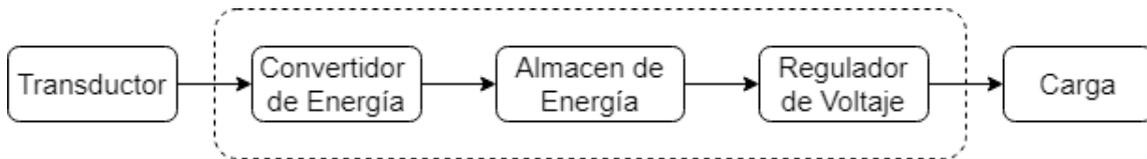


Figura 2.3: Diagrama a bloques de recolección de energía piezoeléctrica [6].

2.1.4. Modelado

En la Figura 2.4 se muestra un modelo de circuito equivalente simple de un microgenerador masa-resorte-amortiguador para un elemento piezoeléctrico con una carga puramente resistiva. El circuito en el lado primario del transformador representa el sistema mecánico (los voltajes corresponden a fuerzas y las corrientes corresponden a velocidades), el transformador representa el mecanismo de transducción piezoeléctrico y el circuito del lado secundario representa la carga eléctrica y las propiedades del transductor piezoeléctrico (incluida su capacitancia incorporada C_p). Debido al coeficiente de acoplamiento relativamente bajo de la mayoría de los materiales piezoeléctricos, el transformador es un dispositivo elevador con una alta relación de vueltas, esto tiene el efecto de que la impedancia combinada de C_p y R_L (cuando se hace referencia al lado primario) es muy baja, de modo que V_1 es baja y efectivamente la carga presenta una pequeña fuerza mecánica. Por lo tanto, el transformador se puede reemplazar por una fuente de corriente controlada por corriente como se muestra en la Fig. 2.5 [7].

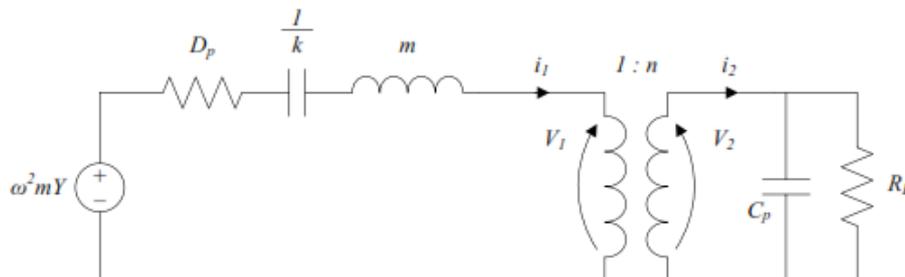


Figura 2.4: Microgenerador con transducción piezoeléctrica [7].

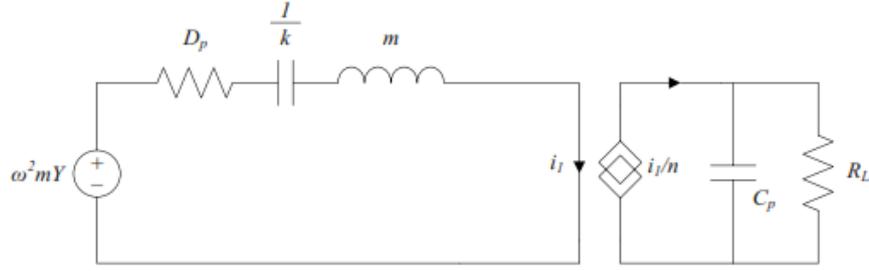


Figura 2.5: Circuito equivalente de microgenerador con acoplamiento electromecánico bajo [7].

Un recolector de energía piezoeléctrico con un nivel de acoplamiento electromecánico lo suficiente bajo como para que cualquier nivel de amortiguación del lado eléctrico haga una diferencia insignificante en la velocidad de la masa de prueba se puede simplificar al circuito de la Fig. 2.6 [7].

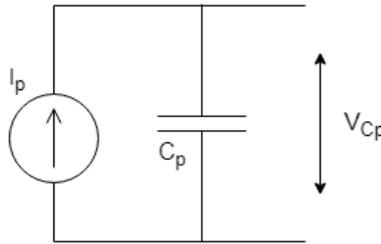


Figura 2.6: Modelo piezoeléctrico simplificado [7].

La frecuencia de resonancia de una viga en voladizo se puede calcular utilizando la ecuación 2.2, donde E es el módulo de Young, I es el momento de inercia, L es la longitud, m es la masa por unidad de longitud de la viga en voladizo y $v_n = 1.875$ es el valor propio del modo de vibración fundamental. Para reducir la frecuencia de resonancia del elemento piezoeléctrico, se puede colocar una masa de prueba al extremo libre del voladizo. La ecuación (2.3) incluye la masa de prueba, donde $v_n'^2 = v_n^2 \sqrt{\frac{0.236}{3}}$, $m_e = 0.236mwL$ es la masa efectiva del voladizo, Δm es la masa de prueba y K es la constante de resorte efectiva del voladizo [36].

$$f_r = \frac{v_n^2}{2\pi L^2} \sqrt{\frac{EI}{m}} \quad (2.2)$$

$$f_r = \frac{v_n'^2}{2\pi L^2} \sqrt{\frac{K}{m_e + \Delta m}} \quad (2.3)$$

Otro parámetro eléctrico importante a considerar en un modelo de transductor piezoeléctrico es la impedancia, misma que se utiliza para identificar la impedancia de carga óptima para la máxima transferencia de potencia que se puede calcular con la ecuación (2.4) ya que estará cerca de la impedancia interna del transductor. [37].

$$RC = \frac{1}{2\pi f_c} \quad (2.4)$$

2.1.5. Metodología de Análisis

El rendimiento de un recolector de energía piezoeléctrico (PEH) depende de tres factores importantes: 1) Material piezoeléctrico, 2) Fuente de entrada (cuerpo humano, vibraciones estructurales, etc.) y 3) Circuitos de acondicionamiento de señal como rectificadores AC-DC. De estos últimos, hay dos tipos de rectificadores convencionales: 1) rectificador de puente completo y 2) rectificadores duplicadores de voltaje [8]. Un PEH típico se muestra en la Figura 2.7.

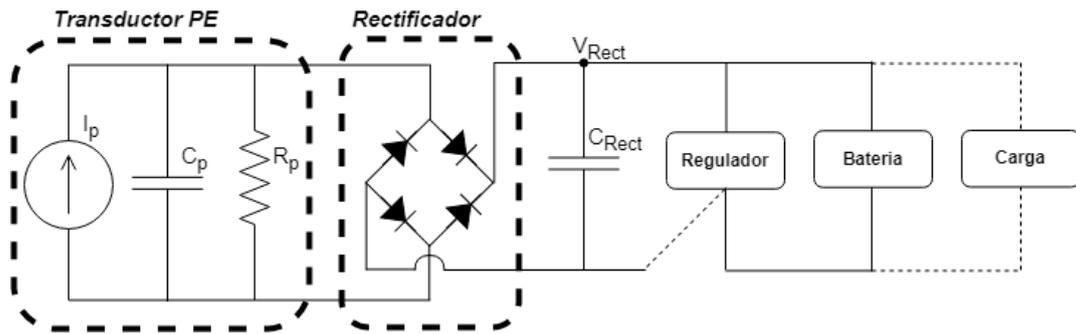


Figura 2.7: Recolector de energía piezoeléctrico típico [8].

Como se muestra en el lado izquierdo punteado de la Fig. 2.7, un transductor PE usualmente se modela como una fuente de corriente sinusoidal $i_p(t) = I_p \sin(2\pi f_p t)$, en paralelo con un capacitor (C_p) y una resistencia grande (R_p). La magnitud de la corriente I_p del transductor PE varía con el nivel de excitación mecánica, aunque se asume que es relativamente constante independientemente de la carga externa; f_p es la frecuencia de excitación del recolector. La salida del transductor tiene una forma de onda AC que debe convertirse a DC mediante un rectificador AC-DC antes de que pueda transferirse a la batería o supercondensador [6]. La capacitancia de salida C_{Rect} típicamente será mucho mayor que la capacitancia piezoeléctrica C_p .

Bajo excitación por una fuente de corriente sinusoidal con una magnitud I_o , frecuencia ω y una carga resistiva de magnitud R_L , se disipará una potencia P_{RL} dada por la ecuación 2.5. A la resistencia de carga óptima de $R_{L_{op}} = \frac{1}{\omega C_P}$, el circuito tiene una potencia

de salida máxima dada por la ecuación 2.6 [7] y la potencia promedio en el tiempo se determina mediante la ecuación 2.7 [38].

$$P_{RL} = \frac{1}{2} \left(\frac{I_o^2 R_L}{1 + R_L^2 \omega^2 C_P^2} \right) \quad (2.5)$$

$$P_{ORL} = \frac{1}{4} \left(\frac{I_o^2}{\omega C_P} \right) \quad (2.6)$$

$$\bar{P} = vI = \frac{\omega^2 b^2 h^2 e_{31}^2 \bar{A}^2}{4(1 + bL\epsilon_{33} \frac{\omega R}{\Delta})^2} \quad (2.7)$$

2.1.6. FOTVOLTAICA

Los sistemas fotovoltaicos convierten directamente la energía solar en energía eléctrica generando inmediatamente energía renovable teniendo en la actualidad poco riesgo tecnológico y aprovechando el recurso aparentemente inagotable del sol, haciendo de este sector uno de los de mayor crecimiento a nivel mundial [10].

Los datos estadísticos recientes demuestran un mercado progresivo de instalaciones cuyos paneles solares forman parte de estructuras físicas tal como las edificaciones (paredes, techos, pasillos, balcones, etc.), también se ha incrementado su aplicación como fuente de energía en sitios rurales desprovistos del servicio de energía eléctrica. Las aplicaciones de los sistemas con paneles fotovoltaicos son diversas: suministro de energía para viviendas, accionamientos de bombas centrífugas, sistemas de telemetría, satélites espaciales, centrales fotovoltaicas con conexión a la red eléctrica, etc [39].

Para la transformación de la energía solar en energía eléctrica requiere que se cumplan tres aspectos fundamentales:

1. Existencia de una unión P-N.
2. Incidencia de fotones con energías igual o mayor que la banda prohibida del semiconductor.
3. Producción de portadores de cargas libres (electrones y huecos), difusión y separación de los portadores a través del campo creado y colección final de los portadores por los electrones respectivos de la celda solar.

La celda solar es el dispositivo donde ocurren los tres eventos mencionados para convertir directamente la radiación solar en electricidad, ya que está constituida por una

unión P-N que convierte directamente la energía de la radiación solar en energía eléctrica generando un voltaje y una corriente entre sus terminales que puede circular por un circuito externo produciendo una potencia máxima (P_{max}) que se puede emplear para energizar cualquier equipo o aparato eléctrico [13].

En la Figura 2.8 se muestra el esquema general de una celda solar, fabricada con silicio.

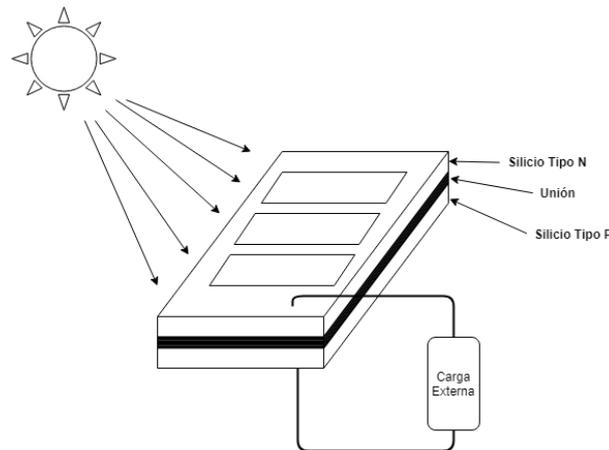


Figura 2.8: Estructura de una celda solar de silicio [9].

El circuito equivalente de una celda solar consta del modelo matemático ideal de un diodo clásico de unión P-N. El circuito más común para analizar el trabajo y comportamiento de las celdas solares es el modelo de diodo único (single-diode) también conocido como 1M5P (One Machine Five Parameters) que se muestra en la Figura 2.9.

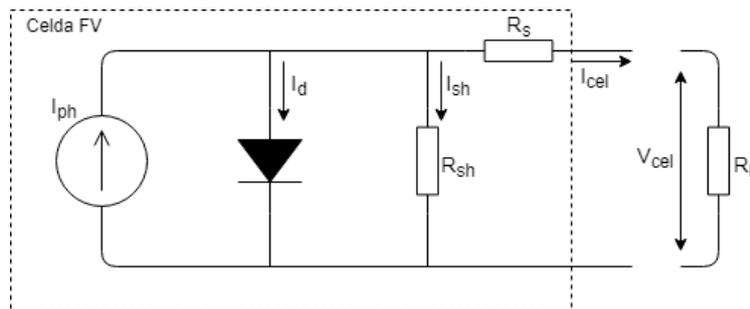


Figura 2.9: Circuito equivalente de un panel solar [10].

Aplicando la ley de voltaje y corriente de Kirchhoff al circuito de la Figura 2.9 con una iluminación dada, se puede deducir la corriente generada (I_{cel}) por el panel solar, como se muestra en las ecuaciones 2.8 y 2.9 [10, 11]. La fuente I_{ph} es la corriente fotogenerada a un valor fijo de radiación solar, la resistencia Shunt (R_{sh}) representa la pérdida por corriente de fuga, la resistencia en serie (R_s) se utiliza para representar la caída de voltaje a la salida aunque también se menciona que ésta si afecta significativamente el comportamiento

de la celda, y la resistencia de carga (R_L) que representa la carga usada para la medición [10]. Además, I_d es la corriente del diodo ideal, I_{sh} es la corriente de fuga en la resistencia shunt, I_0 es la corriente de saturación de polarización inversa del diodo, q es la carga del electrón ($16 \times 10^{-19} C$), V es el voltaje de la celda solar, K_B es la constante de Boltzmann ($138 \times 10^{-23} \frac{J}{K}$), T es la temperatura de operación de la celda y n es el factor de idealidad.

$$I_{cel} = I_{ph} - I_d - I_{sh} \quad (2.8)$$

$$I_{cel} = I_{ph} - I_0 \left[e^{\left(\frac{q(V + R_s I_{cel})}{n K_B T} \right)} - 1 \right] - \frac{(V + R_s I_{cel})}{R_{sh}} \quad (2.9)$$

El término -1 en la ecuación 2.9 se puede despreciar porque el término exponencial suele ser $\gg 1$ excepto para voltajes por debajo de 100mV. Además, a bajos voltajes la corriente fotogenerada (I_{ph}) domina el término I_0 , por lo que el término -1 no es necesario bajo iluminación.

La corriente fotogenerada varía en función de la radiación solar y la temperatura de la celda presentes en la medición [10, 40]. No es fácil determinar los parámetros de la ecuación 2.9 que corresponden a la característica intrínseca de la construcción de celdas solares, pero este modelo ofrece la mejor combinación con valores experimentales. Estos parámetros se pueden extraer utilizando la técnica de ajuste no lineal en una sola curva I-V [11].

La R_s representa la resistencia total de la celda y es un compuesto de: 1) la resistencia interfacial y la resistencia de la capa activa, 2) las resistencias de los electrodos y 3) las diversas resistencias de contacto e interconexión; y la R_{sh} representa la unión P-N de la celda solar. Estos dos parámetros en conjunto tienen una estrecha relación con el factor de llenado (FF) de conversión de energía en la celda solar, ya que disminuyendo R_s hace que aumenten I_{sc} y V_{max} , y aumentando R_{sh} hace que aumenten I_{max} y V_{oc} , por lo que a partir de este supuesto, muchos investigadores desarrollan celdas solares a través de la variación de R_s y R_{sh} [11, 40]. El factor de llenado (FF) como se muestra en la ecuación 2.10, es un parámetro que junto con el V_{oc} e I_{sc} también ayuda a determinar la potencia máxima (P_{max}) de una celda solar [7].

$$FF = \frac{I_{max} V_{max}}{I_{sc} V_{oc}} = \frac{P_{max}}{I_{sc} V_{oc}} \quad (2.10)$$

Los parámetros intrínsecos de la celda solar se pueden extraer a través de varios métodos, como un método manual con aproximación del factor de idealidad. La Figura 2.10 muestra cómo determinar R_s y R_{sh} a partir de la pendiente inversa cerca de V_{oc} e I_{sc} respectivamente, es decir, para calcular R_s se fija un punto (P) sobre la pendiente respecto a V_{oc} y para calcular R_{sh} se fija un punto (P) sobre la pendiente respecto a I_{sc} . Al utilizar esta técnica, no se han encontrado otros parámetros como I_{ph} , I_0 y η .

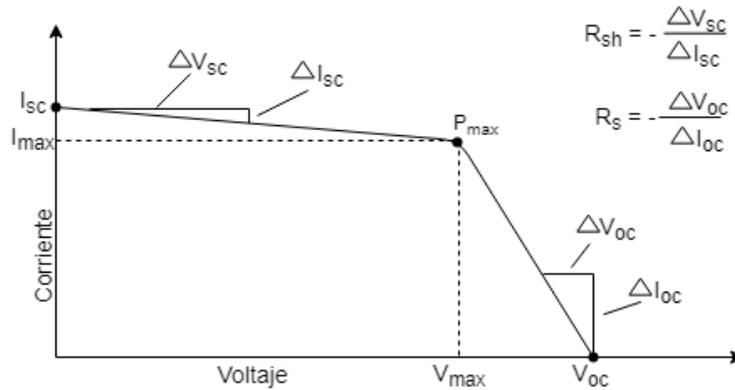


Figura 2.10: Extracción de la resistencia en serie y shunt a partir de la curva I-V bajo iluminación [11].

Una vez calculada la resistencia R_s y R_{sh} se puede calcular I_{ph} mediante la ecuación 2.11 la cual se considera ligeramente equivalente a la I_{sc} [12].

$$I_{ph} = \frac{R_{sh} + R_s}{R_{sh}}(I_{sc}) \quad (2.11)$$

En [12] menciona que a partir del modelo single-diode o 1M5P se pueden deducir fácilmente las curvas características (I-V y P-V) calculando los cinco parámetros desconocidos que en la mayoría de los puntos de cortocircuito, circuito abierto y máxima potencia se incluyen en la hoja de datos de las celdas solares como se ilustra en la Fig.2.11.

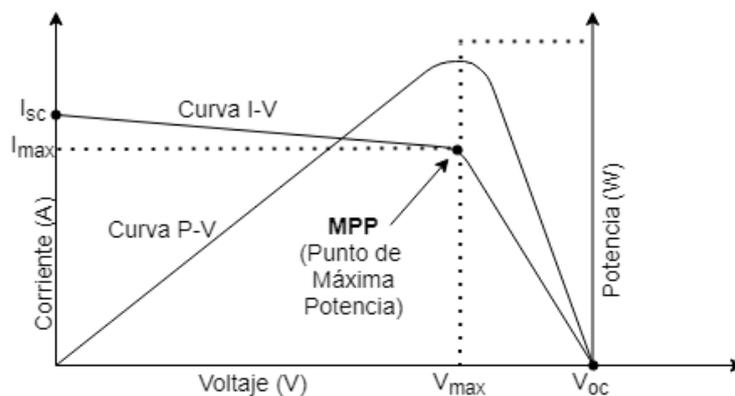


Figura 2.11: Curvas características I-V y P-V de una celda solar típica [12].

La I_{sc} y el V_{oc} son los máximos valores de corriente y voltaje que se pueden extraer de una celda solar, sin embargo, en estos puntos de operación la potencia es cero. Por ello, es necesario encontrar un punto de la curva I-V en donde el producto tenga un máximo valor. En la Figura 2.11 se muestra que este punto corresponde al máximo punto de potencia que la celda puede entregar, es decir, hay un voltaje de máxima potencia (V_{max}) y una corriente de máxima potencia (I_{max}).

La eficiencia de conversión de energía (η) de la celda solar se define como la razón de la potencia eléctrica máxima que suministra la celda entre la potencia de la radiación solar (P_{in}) que incide sobre ésta multiplicada por el área (A) de la celda como se muestra en la ecuación 2.12. La potencia de entrada de la radiación solar para cálculos de eficiencia se considera como $1 \frac{Kw}{m^2}$ o $100 \frac{mW}{cm^2}$ [13].

$$\eta = \frac{I_{max} V_{max}}{P_{in} A} = \frac{I_{sc} V_{oc}}{P_{in} A} FF \quad (2.12)$$

La resistencia característica R_{ch} de una celda solar es la resistencia de salida en su punto de máxima potencia (MPP). Si la resistencia de carga (R_L) es igual a la R_{ch} de la celda solar, entonces la potencia máxima se transfiere a la carga y la celda solar opera en su MPP. La resistencia característica de una celda solar es la inversa de la pendiente de la línea que se muestra en la Figura 2.12, es un parámetro útil en el análisis de celdas solares, particularmente cuando se examina el impacto de los mecanismos de pérdida parasitaria y se puede obtener por la ley de Ohm dividiendo V_{max} sobre I_{max} para la mayoría de los casos ó también se puede aproximar por V_{oc} dividido por I_{sc} [13]:

$$R_{ch} = \frac{V_{max}}{I_{max}} \approx \frac{V_{oc}}{I_{sc}} \quad (2.13)$$

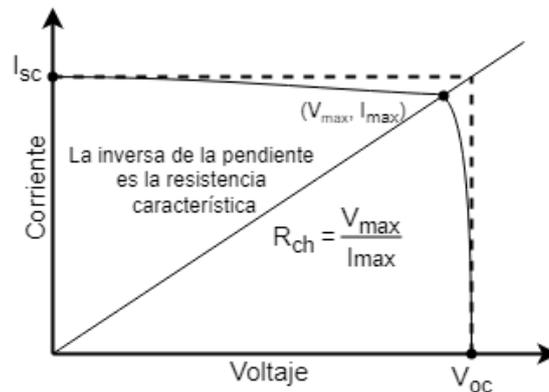


Figura 2.12: Resistencia característica de una celda solar [13].

Modelar un dispositivo fotovoltaico y simular su comportamiento usando herramientas computacionales representa una significativa porción en la investigación actual en el campo de la energía solar, de igual manera, es de interés particular porque permite la simulación conjunta de un dispositivo fotoeléctrico con electrónica periférica. La simulación habilita la optimización del diseño de paneles solares y sistemas de energía solar. El circuito eléctrico correctamente elegido es una parte importante de la metodología para extraer el conjunto óptimo de parámetros de circuito equivalente que caracterizan al dispositivo específico [41, 42].

2.1.7. BIOMECÁNICO

La recolección de energía biomecánica se puede definir como la obtención de energía por medio del esfuerzo físico del ser humano, ya que la considerable cantidad de energía liberada en forma de movimiento y calor abre la posibilidad del desarrollo de tecnologías de recolección de energía para la alimentación de dispositivos. La recolección de energía biomecánica presenta una alternativa prometedora y limpia para suministrar energía eléctrica a dispositivos electrónicos portátiles los cuales están siendo optimizados para el bajo consumo de energía con el fin de que puedan permanecer más tiempo encendidos, debido a que el mantenerlos energizados se ha vuelto un problema común y es aquí donde la recolección de este tipo de energía puede servir de energía base para estos dispositivos [14].

Una de las actividades que producen movimiento con aporte de energía externa al ser humano es el movimiento angular de la rodilla, la cual abre la posibilidad de recolectar energía con un esfuerzo mínimo. Existen 4 factores que se pueden considerar cuando se realiza el diseño de algún dispositivo biomecánico:

1. La cantidad de energía a la salida del dispositivo.
2. La energía recolectada sea obtenida de manera inconsciente durante los movimientos naturales del cuerpo humano.
3. La conveniencia del uso del dispositivo debido al confort y el esfuerzo necesario para generar energía.
4. Las ventajas y desventajas del uso de cualquier otro dispositivo de recolección.

Las investigaciones en este tipo de recolección de energía presentan tres vertientes:

- **Recolección por vibración mecánica:** Los desarrollos para la recolección por vibración biomecánica utilizan la presión que ejerce el cuerpo humano sobre sus pies al caminar y la vibración que se genera con el movimiento del ciclo de marcha.

- **Movimiento lineal:** Con el modelado de los movimientos del cuerpo humano, se han identificado algunos que pueden proporcionar una mayor cantidad de energía en comparación con los dispositivos piezoeléctricos, por ejemplo, el balanceo de brazo, piernas y cadera.
- **Movimiento angular:** Los recolectores de energía de movimiento angular presentan ventajas sobre la recolección de energía con los dispositivos anteriores, debido a la cantidad de energía que puede ser obtenida de forma natural. En la Tabla 2.2 se presenta una comparación de la cantidad de energía generada por el movimiento de diferentes articulaciones [14].

Articulaciones	Trabajo [J]	Energía [W]	Torque Máximo [Nm]	Esfuerzo Negativo [%]	Esfuerzo Negativo [W]
Golpe de talón	1-5	2-10	-	50	1-5
Tobillo	33.4	66.8	140	28.3	19
Rodilla	18.2	36.4	40	92	33.5
Cadera	18.96	38	10-80	19	7.2
Codo	1.07	2.1	1-2	37	0.8
Hombro	1.1	2.2	1-2	61	1.3

Tabla 2.2: Tabla comparativa de generación de energía en diferentes articulaciones [14].

La investigación que se realizó en [14] trata sobre el aprovechamiento del movimiento de la rodilla a partir de la marcha mediante la implementación de un sistema biomecánico, el cual consiste en convertir la energía mecánica en energía eléctrica. Los datos y parámetros del elemento biomecánico que se implementó, así como su modelo comportamental están descritos en esa investigación por lo que en este apartado solo se menciona la información más relevante para poder entender su principio de funcionamiento.

En el estudio del ciclo de la marcha se identifican las fases donde es posible generar energía sin que la persona o individuo realice un esfuerzo mayor. El desarrollo del sistema de sensado el cual está basado en un algoritmo de “Observador no lineal” se utiliza para la estimación y determinación del ángulo de la rodilla durante el proceso de la marcha, lo cual permite seleccionar el ciclo de marcha negativo que permitirá realizar la conexión y desconexión del sistema de recolección de energía.

Los términos que describen la relación entre las diferentes partes del cuerpo humano se basan en la posición anatómica como se muestra en la Figura 2.13, en donde la mayoría de las articulaciones solo se pueden mover en uno o dos de estos planos. Específicamente en la Figura 2.14 se presenta la dirección de movimientos para la cadera y la rodilla.

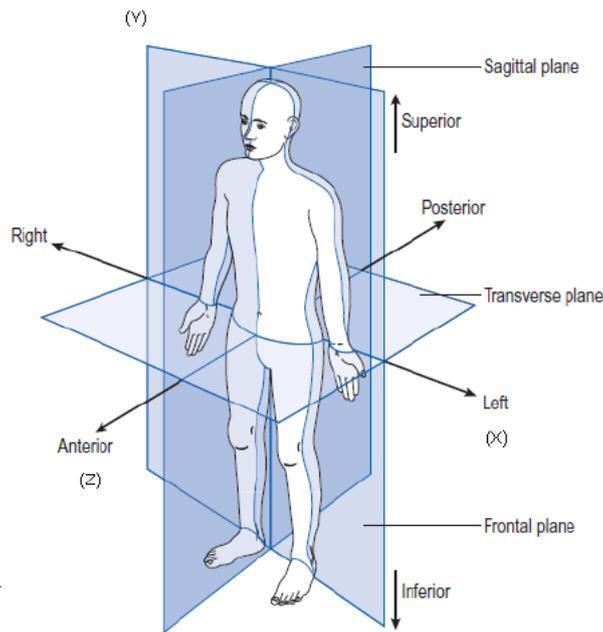


Figura 2.13: Posición anatómica con tres planos de referencia (Sagital, transversal y frontal) y sus direcciones fundamentales [14].

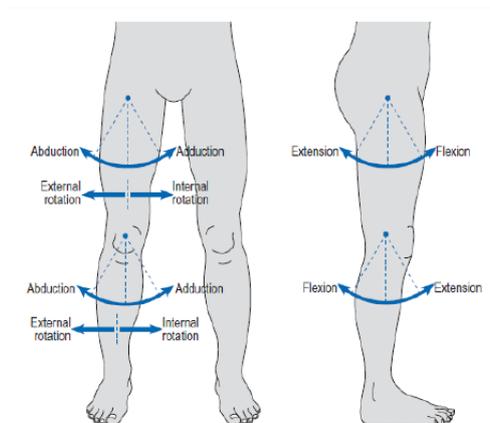


Figura 2.14: Movimientos de la cadera y la rodilla respectivamente [14].

El movimiento mecánico de la marcha es una actividad cíclica la cual consiste en dos fases para cada extremidad: soporte y balance. En el acto de caminar existen dos requisitos básicos que cualquier tipo de marcha bípeda debe cumplir: 1) El soporte de las fuerzas de reacción del piso sobre la extremidad de soporte y 2) el movimiento periódico de cada pierna desde una posición de apoyo a otra en la dirección del movimiento. Las fases del ciclo de la marcha (como se muestra en la Figura 2.15) se representan con el movimiento desde que una pierna inicia el contacto con el piso hasta que vuelve a hacerlo, llamando a este acontecimiento “zancada”.

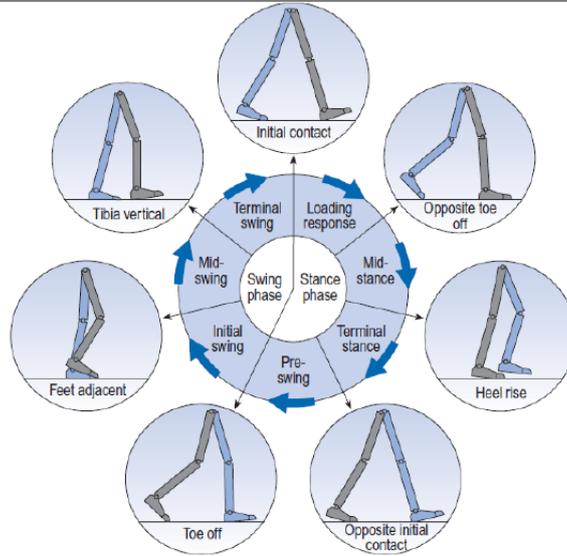


Figura 2.15: Descripción de las fases del ciclo de marcha [14].

La rodilla es la articulación más grande del cuerpo humano porque permite rotaciones tanto internas como externas, soporta grandes cargas y proporciona estabilidad al caminar en diferentes superficies. Durante cada ciclo de marcha la rodilla presenta dos puntos de flexión y extensión; para poder obtener el ángulo de la rodilla en el plano sagital se utiliza el modelo de segmentos como se muestra en la Fig. 2.16, donde se puede observar que la relación del ángulo de la rodilla es la diferencia entre el ángulo del fémur y la tibia como se muestra en la ecuación (2.14).

$$\theta_R = \theta_F - \theta_T \quad (2.14)$$

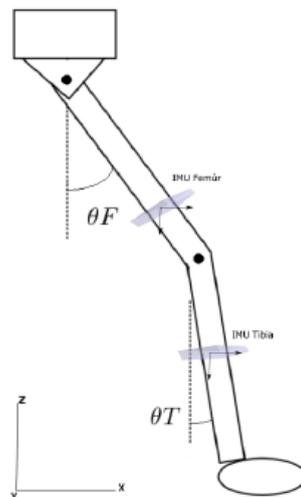


Figura 2.16: Diagrama de los ángulos presentes en la rodilla [14].

La colocación de sensores inerciales en cada segmento interpreta una rotación en el plano $X-Z$ del segmento tibia en referencia al segmento fémur de forma que a través de la posición en el espacio se obtenga la estimación del ángulo de la rodilla. El mecanismo para obtener la información que correlacione el movimiento entre los dos segmentos se muestra en la Figura 2.17 que corresponde al sistema de sensado en donde únicamente se implementan observadores como acelerómetros y girómetros que permiten realizar la estimación del ángulo de la rodilla.

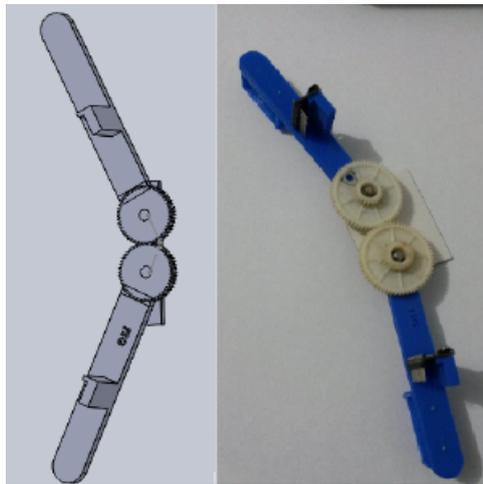


Figura 2.17: a) Diseño del sistema de sensado, b) Implementación del sistema de sensado [14].

Existen diferentes técnicas para lograr que ambos sensores sean útiles en la estimación de la posición de un cuerpo, entre ellas, filtros (complementarios, Kalman) y observadores (observador no lineal) que se utilizan para realizar la comparación de lecturas entre el acelerómetro y el girómetro; y de esta manera sea interpretada de forma correcta la información sobre la posición [14].

La Fig. 2.18 muestra la gráfica obtenida mediante el uso de un filtro complementario en donde se muestra que el ángulo obtenido es el estimado por el estudio del ciclo de marcha. Se percata que existe demasiado ruido y esto se debe a que este tipo de filtro no cuenta claramente con un proceso de estimación del ruido [14].

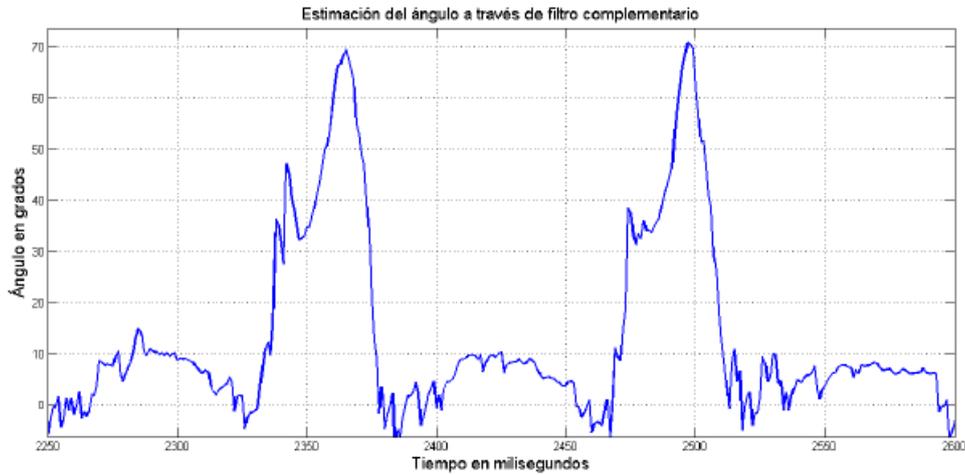


Figura 2.18: Gráfica del ángulo de rodilla por filtro complementario [14].

Una segunda aproximación de la estimación del ángulo se realizó con un filtro de Kalman, el cual es un conjunto de herramientas matemáticas que fusionan información de múltiples fuentes, es decir, realiza una evaluación del estado actual del sistema y corrige la estimación utilizando cualquier medida disponible de los sensores. La Fig. 2.19 muestra el resultado de la medición del ángulo de la rodilla con este tipo de filtro. Se aprecia una mejoría con respecto al filtro complementario, sin embargo sigue existiendo ruido debido al golpe de talón.

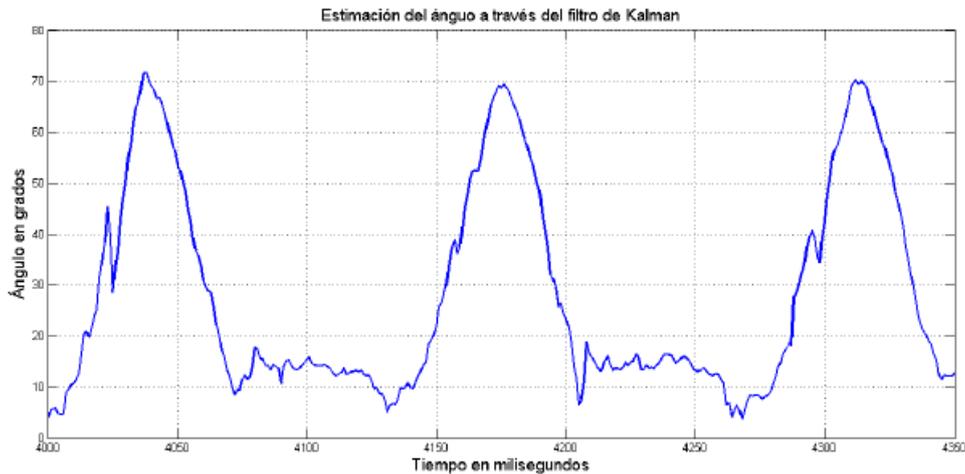


Figura 2.19: Resultados de la implementación del filtro de Kalman [14].

La sintonización del filtro de Kalman aun cuando es una herramienta robusta no permitió obtener una estimación de forma limpia, es por ello que se optó por hacer uso de un observador no lineal el cual está diseñado para obtener la actitud de un cuerpo rígido en el espacio ayudándose de girómetros y acelerómetros para detectar el ángulo de la rodilla en el ciclo de la marcha. En la Fig. 2.20 se presenta la estimación del ángulo a través del

observador no lineal.

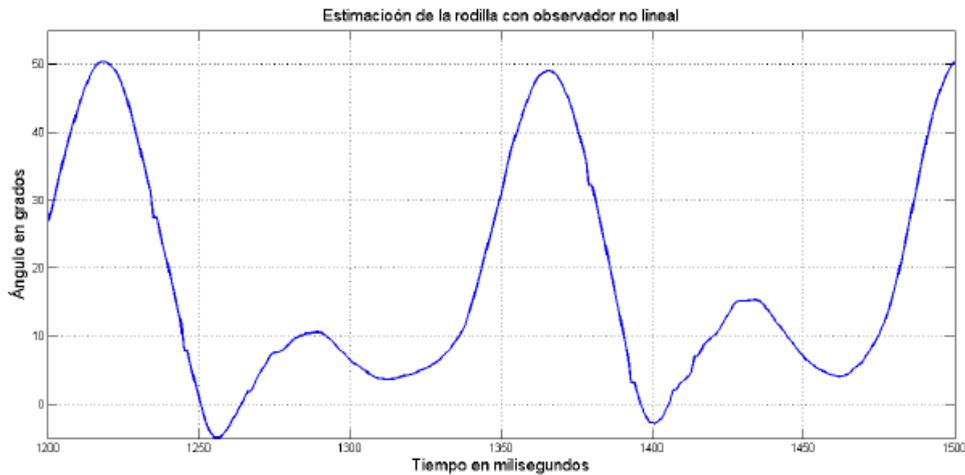


Figura 2.20: Estimación del ángulo con observador no lineal [14].

Como se puede observar, la señal es limpia a comparación de los demás observadores, así también se evitaron errores de deriva debido a que el observador es robusto ante el ruido en las mediciones [14].

Para el desarrollo del sistema de generación de energía eléctrica a partir de la biomecánica posicionada en la rodilla también se identificó el tipo de generador para la generación y recolección de energía, el diseño del sistema de transmisión mecánico y los convertidores C.D.-C.D. para el control y almacenamiento de la energía recolectada.

El ángulo óptimo para la recolección de energía se encuentra entre el 80 % y 100 % del ciclo de marcha y tiene un valor aproximado de 60° . Para que la extensión de la rodilla se pueda aprovechar, se diseñó un sistema mecánico de transmisión que toma el movimiento y lo transfiere a un generador para obtener un voltaje que pueda ser recolectado. El torque que proporciona la rodilla en el ciclo de marcha en su fase de balanceo debe estar dispuesto en el eje del generador para proporcionar energía eléctrica. La elevación de voltaje se realiza a través de un convertidor elevador y posteriormente la energía se almacena en una batería de Ion-Litio para su carga. De igual manera, estos componentes combinados proporcionan energía a un bus de C.D. que provee de energía al sistema de control y a una carga externa del sistema. La Fig. 2.21 presenta el diagrama del sistema biomecánico implementado.

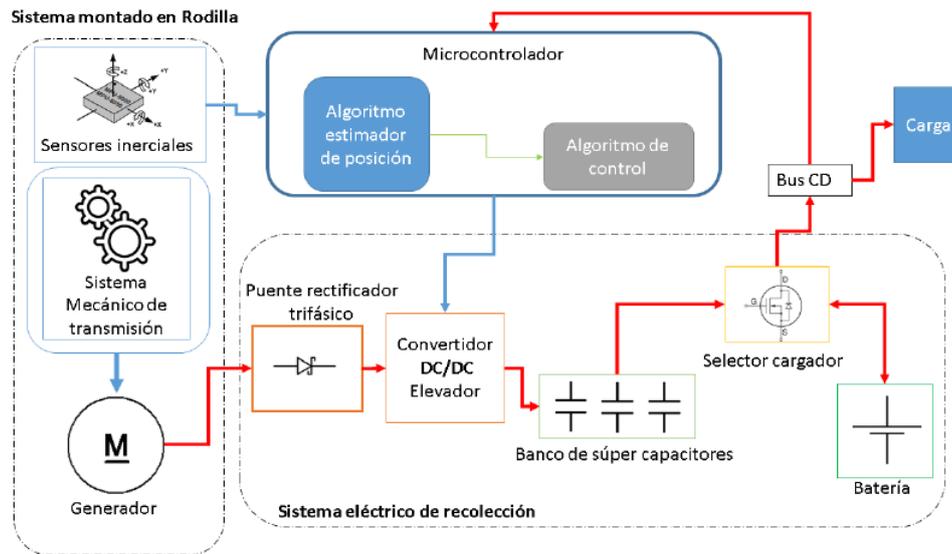


Figura 2.21: Diagrama a bloques del sistema de generación de energía [14].

Para la selección del tipo de generación de energía se realizó el modelado de dos tipos de generadores: 1) máquina C.D. con escobillas y 2) máquina C.A. sin escobillas; siendo esta última seleccionada debido a que una de las principales ventajas se debe a su construcción y a que el torque producido eléctricamente es menor, de esta forma al conectar una carga de menor valor el torque es menor.

La emulación de la rotación de la rodilla se realizó en un servomecanismo para simular el movimiento de rotación de la rodilla. La Fig. 2.22 muestra el resultado gráfico de la posición deseada y la posición sensada por el servosistema.

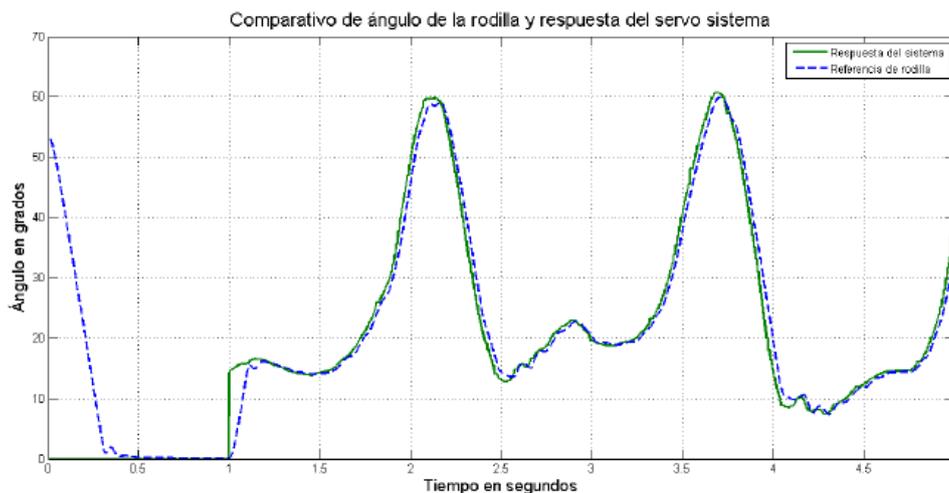


Figura 2.22: Gráfica comparativa de posición deseada en azul y posición sensada por el servomecanismo en verde [14].

La Fig. 2.23 presenta el diseño de los componentes del sistema ensamblados en un solo sistema que convierte el movimiento angular de flexión de la rodilla a movimiento rotatorio del generador. Mediante un circuito eléctrico de control y administración de energía se procesa la señal generada por la marcha humana, obteniendo de esta manera una señal eléctrica.

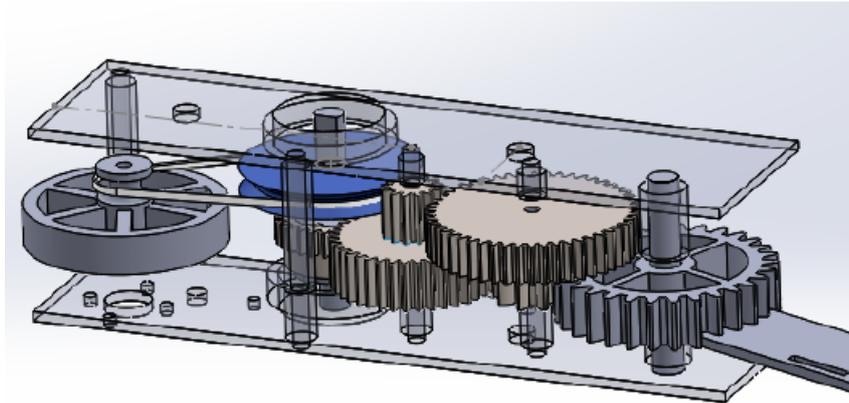


Figura 2.23: Diseño asistido por computadora (CAD) del sistema de transmisión [14].

La implementación del prototipo del sistema biomecánico para la generación y recolección de energía se muestra en la Fig. 2.24 en donde se obtiene un estimado de $4V_{pp}$, 20mA y 80mW a la salida.

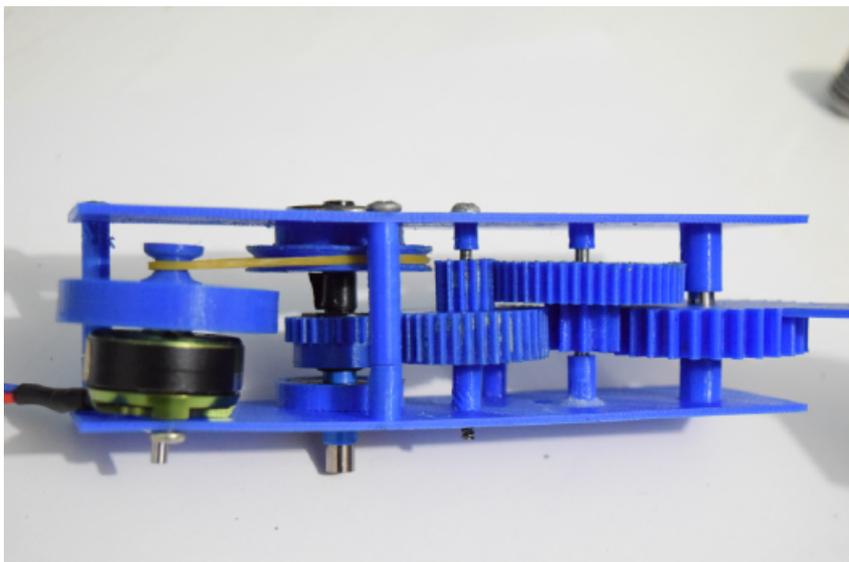


Figura 2.24: Impresión 3D e implementación del sistema de transmisión [14].

2.1.8. BATERÍAS

Una batería en su forma más simple consiste de dos materiales de electrodos diferentes (electrodo positivo y negativo o cátodo y ánodo respectivamente) que están separados por un conductor iónico, el cual puede ser líquido, polímero o de fase sólida. El rendimiento característico de una batería está dictado por el tipo de material de electrodo y electrolito. Las propiedades o características más comunes que se utilizan para la selección de un sistema de batería son la densidad de energía gravimétrica, la capacidad, el voltaje, la temperatura de operación, la vida útil, la vida útil del ciclo (para baterías secundarias), la tasa de auto descarga, la seguridad, la confiabilidad y el costo [24].

Las baterías son la principal solución presente para alimentar sistemas electrónicos portátiles, pero a menos que puedan proporcionar una vida útil sin dominar el tamaño y el costo [43]. Se utilizan en dispositivos implantados en el cuerpo humano como un corazón artificial y un marcapasos o en dispositivos electrónicos que se utilizan día a día. En el caso de un corazón artificial su batería debe ser cargada continuamente por un transformador a través de la piel, la batería de un marcapasos no necesita carga continua por su pequeño consumo de energía, pero si debe ser remplazada periódicamente por una nueva mediante una operación quirúrgica que se debe soportar física, mental y económicamente, mientras que los dispositivos electrónicos de uso común como tabletas electrónicas, celulares, computadoras portátiles, entre otros, necesitan de una carga frecuente debido a su consumo energético [44].

Las baterías se clasifican generalmente como: **1) batería primaria**, la cual limita la autonomía de las unidades porque necesitan ser reemplazadas periódicamente teniendo efectos ambientales negativos [28, 45], se eligen por su mayor densidad de energía, menores tasas de fuga y bajo costo [43]; **2) batería secundaria**, es una mejor opción para sistemas portátiles porque pueden recargarse de diferentes maneras, en muchos casos sin ser extraídas del sistema [45]. Las baterías continúan siendo la principal fuente de energía externa, sin embargo, su tecnología ha evolucionado muy lentamente en comparación con la tecnología electrónica, donde la evolución de dos de sus parámetros fundamentales se representan en función del tiempo: la densidad de energía y la energía específica (energía por unidad de peso) [45].

Los condensadores electroquímicos de doble capa (*EDLCs - Electrochemical double layer capacitors*) también llamados supercondensadores o supercapacitores, han recibido mucha atención en la última década debido a su aplicación como dispositivos de almacenamiento de energía, sin embargo, aunque algunas ventajas pueden obtenerse por tener una mayor densidad de energía, un número de ciclos de vida mucho mayor de carga y des-

carga, y tener un rango más pequeño de auto-descarga en comparación con las baterías, sus densidades de energía permanecen relativamente bajas con límites teóricos alrededor $10 \text{ W} \frac{\text{hr}}{\text{Kg}}$ [46, 47], aún así, los supercapacitores son más eficientes que las baterías.

2.1.9. RECOLECTORES DE ENERGÍA

Los términos *Energy Harvesting*, *Energy Scavenging* ó *Recolectores de Energía* hacen referencia a sistemas encargados de la recuperación y aprovechamiento de los diferentes tipos de energía que se encuentran en el medio ambiente o en el medio que los rodea en energía eléctrica [16, 48]. El principal objetivo de esta tecnología es proveer una fuente de energía eléctrica de fácil acceso siendo almacenada en dispositivos como baterías o supercapacitores para poder utilizarla cuando se requiera, alcanzando un impacto ecológico importante porque ayuda a reducir los residuos químicos cuando se utilizan dispositivos de almacenamiento tradicionales.

Este enfoque ha atraído un gran interés en la comunidad académica y en la industria como una fuente potencial inagotable para dispositivos eléctricos [49]. La recolección de energía será la clave para permitir las ambiciosas proyecciones de la tecnología portátil que se espera crezca en los próximos años. Sin embargo, un enfoque de arriba hacia abajo en lugar del enfoque tradicional de abajo hacia arriba para la administración de energía es el camino a seguir para que el diseño del dispositivo permita que la recolección de energía alcance su potencial [50].

Hay una gran cantidad de miedo, incertidumbre y duda conocido como FUD (*Fear, Uncertainly and Doubt*) pensando que no hay cantidades disponibles de energía para su recolección ó que todavía es un experimento de laboratorio no lo suficientemente maduro [47, 50] debido a que los dispositivos que recolectan la energía también requieren condiciones ambientales específicas, por ejemplo, las celdas solares exigen luz solar y los generadores piezoeléctricos requieren vibraciones mecánicas respectivamente [28].

La Tabla 2.3 muestra algunos ejemplos de las tecnologías clave de liberación y extracción de energía que se han intentado siendo algunos más populares que otros [24]. La extracción o la transducción de la energía liberada en el proceso primario a una forma que cumple con la tarea esperada, también varía ampliamente. Las fuentes disponibles para el cosechamiento de energía son de cuatro formas: 1) *Luz*, 2) *Radiación electromagnética de Radiofrecuencia (RF)*, 3) *Gradientes Térmicos* y 4) *Movimiento*, incluido el flujo de fluidos, recibiendo todas y cada una de estas atenciones en diferentes grados [51, 52]. Como complemento de estas cuatro fuentes también se ha informado sobre la generación

de energía basada en el uso de fluidos corporales humanos.

Liberación de Energía	Extracción de Energía
<p>Electroquímica</p> <ul style="list-style-type: none"> - Baterías recargables. - Supercapacitores. - Celdas de combustible. <p>Termoquímica</p> <ul style="list-style-type: none"> - Stirling. - Motor rotativo. - Turbina. <ul style="list-style-type: none"> - Cámara de combustión de pulso. - Motor alternativo. - Quemador Swiss. - Combustión de película. <p>Bioquímica</p> <ul style="list-style-type: none"> - Motor biomolecular. - Celda de biocombustible. - Motor metabólico. 	<p>Electromecánico</p> <ul style="list-style-type: none"> - Generador compacto. - Músculo artificial. <p>Termomecánica</p> <ul style="list-style-type: none"> - Aleaciones con memoria de forma. - Gas presurizado. <p>Termoeléctrico</p> <ul style="list-style-type: none"> - Nanoalambres. <p>Recolección de Energía</p> <ul style="list-style-type: none"> - solar. - Recepción de microondas. - movimiento. - Vibración. <p>Quimiomecánico</p> <ul style="list-style-type: none"> - Biomúsculo

Tabla 2.3: Liberación de energía y extracción de energía [24].

CLASIFICACIÓN DE LOS RECOLECTORES DE ENERGÍA

Al observar el ambiente que rodea el entorno de cada persona se pueden encontrar diversas formas de energía interactuando, los diferentes tipos de energía vistos desde la perspectiva de los recolectores de energía son latentes fuentes de potencia que por lo general son inutilizadas. La Figura 2.25 muestra la clasificación de los diferentes recolectores de energía de acuerdo al tipo de energía que usan para su funcionamiento y relaciona cada uno con su respectivo transductor, de esta forma es posible visualizar cinco grupos: *mecánicos*, *magnéticos*, *radiantes*, *térmicos* y *bioquímicos*; de igual manera, se representan las partes principales de las que está compuesto un sistema de recolección de energía que son:

1. **Transductor/Fuente:** Realizan la conversión de diferentes tipos de energía ambiental a energía eléctrica usable.

2. **Circuitos de administración de energía o acondicionamiento de señal:** Realizan la conversión de energía que se requiere para la carga de energía.
3. **Almacenamiento:** Almacenan la energía recolectada en baterías recargables ó supercapacitores.

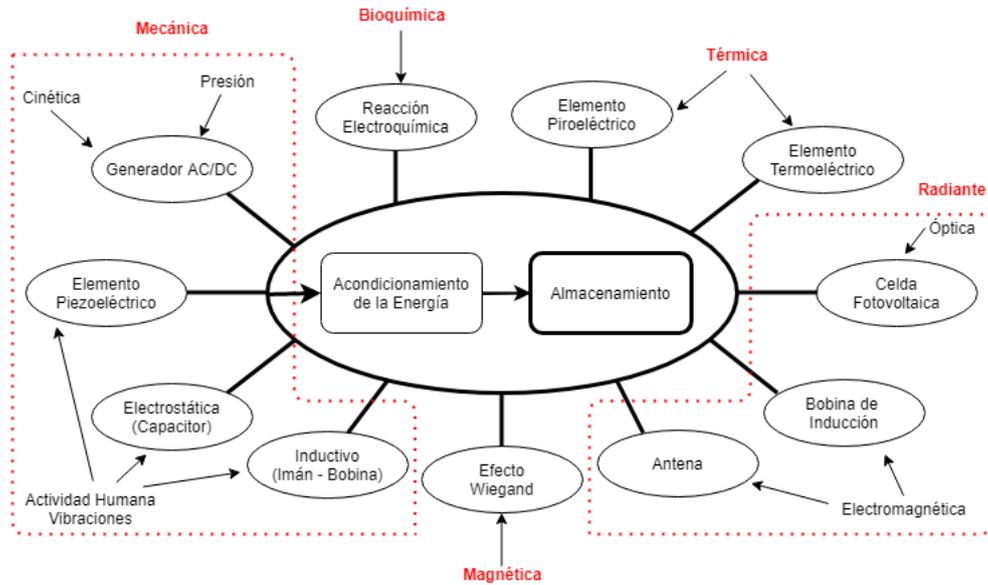


Figura 2.25: Fuentes de energía y sus transductores para la conversión a energía eléctrica [15].

La opinión general de la literatura es que mientras cada aplicación deba ser evaluada individualmente con respecto a encontrar el mejor método de recolección de energía, la energía cinética en forma de movimiento o vibración es generalmente la fuente de energía ambiental más versátil y disponible [5, 49, 53, 54].

2.2. COSECHADORES DE ENERGÍA HÍBRIDO

Un recolector de energía que adopte un método individual es insuficiente para alimentar eficientemente dispositivos microelectrónicos, por lo que para mejorar la eficiencia de conversión de energía e incrementar la densidad de potencia a la salida, el desarrollo de un recolector de energía basado en mecanismos de transducción múltiple ó recolector de energía híbrido (HEH - Hybrid Energy Harvesting), llega a ser significativamente importante [55, 56] porque su densidad de energía es alta y multifuncional [57].

El concepto de HEH se puede enfocar desde dos puntos de vista: recolección de energía a partir del mismo tipo de fuente (energía vibracional) y recolección de energía a partir

de diferentes tipos de fuentes (energía vibracional, solar y termal) [57, 58]. El método más simple para la recolección de energía híbrida es el cosechamiento a partir del mismo tipo de fuente ó de una fuente primaria y luego usar un transductor secundario para encender solo los circuitos auxiliares en la PMU (Power managetmen Unit).

La Tabla 2.4 muestra la comparación en el rendimiento de diferentes circuitos de cosecha de energía tanto individuales como híbridos que involucran fuentes de tipo: Foto-voltaico (FV), Generador Termoeléctrico (TEG), Piezoeléctrico (PE), Electromagnético (EM), Célula de Biocombustible de Glucosa (GBFC) y Radio Frecuencia (RF).

Parámetros	[22]	[4]	[59]	[60]	[61]	[62]
Tecnología	0.35 μm	0.18 μm	0.18 μm	0.35 μm	0.35 μm	0.35 μm (TEG) 0.18 μm (RF)
Fuentes de Recolección	PV TEG PE	PE EM TEG	GBFC TEG	PE	PE	TEG RF
Frecuencia de Excitación	PV: DC TEG: DC PE: NA	PE: 282Hz EM: 2-3Hz TEG: DC	GBFC: DC TEG: DC	200Hz	NA	TEG: DC RF:NA
Energía Mínima de Entrada	PV: 150 μW TEG: 90 μW PZT : 45 μW	PE: 4.2 μW EM: 1 μW TEG: NA	GBFC: 0.5 μW TEG: 0.5 μW	$\approx 20 \mu\text{W}$	33 μW	TEG: 70 μW RF: NA
Voltaje de Salida	1.9 V	0.8-1.25 V	1.9 V	1.8-6.6 V	1-8 V	1.75-4.3 V
Eficiencia de Conversion Máxima	NA	29% at 68 μW	85.5% at 56.4 μW	NA	80 % at 5 mW	78 % NA

Tabla 2.4: Comparación entre diferentes sistemas de cosecha de energía encontrados en el estado del arte [2].

En [16] se presenta un prototipo de recolección de energía que combina tres fuentes diferentes; un transductor piezoeléctrico para recolectar las vibraciones ambientales, una celda solar para recolectar la irradiancia lumínica y una antena para recolectar energía de radiofrecuencia. El prototipo es capaz de generar una potencia de DC máxima de alrededor 241.3 mW cuando todas las fuentes están conectadas entre sí. Este circuito de recolección híbrido es muy atractivo para aplicaciones electrónicas de bajo consumo de potencia.

Para lograr un sistema auto-alimentado, la salida del panel solar se utiliza para polarizar un amplificador operacional (OA) debido a que es la fuente que entrega la mayor cantidad de energía. El OA se conecta a un circuito sumador de voltaje basado en una

configuración no inversora que se muestra en la Fig.2.26. El sumador se implementa para combinar múltiples entradas de las diferentes fuentes a utilizar en un solo voltaje de salida que se conecta a una etapa de almacenamiento en donde se utilizaron baterías recargables utilizando el IC LTC4071 de Linear Technology's como módulo de carga.

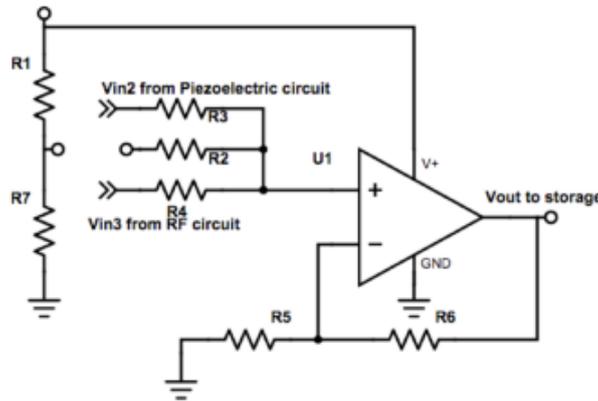


Figura 2.26: Circuito sumador para conectar múltiples fuentes [16].

El sistema completo se probó en términos de voltaje de salida en donde para la fuente piezoeléctrica el voltaje de salida fue de alrededor de $9.1V_{rms}$ que proporcionó una potencia igual a 0.4 mW a una frecuencia de resonancia alrededor de 200 Hz , para la fuente fotovoltaica el V_{oc} fue de 5V , I_{sc} de 210 mA y el MPP de 0.65W y para la fuente RF que transmite a una potencia de -40 dBm a 2.4 GHz el voltaje de salida de DC máximo fue de 71 mV utilizando una resistencia de $10\text{K}\Omega$ obteniendo una potencia de salida de $5.0\text{ }\mu\text{W}$.

El desempeño del sistema completo resultó con una potencia superior y se debe a que el panel solar entrega la mayor potencia de las tres fuentes teniendo en cuenta que su funcionamiento será en condiciones ideales de la irradiancia espectral. Con esto se demostró un prototipo de HEH con acondicionamiento y conversión de señal que administra adecuadamente la energía. El prototipo puede alimentar dispositivos electrónicos con un consumo de energía de hasta 241 mW , es decir, aplicaciones de bajo consumo de potencia.

En [17] se presenta un HEH utilizando un módulo fotovoltaico y uno piezoeléctrico, así como su esquema de control de acuerdo a las condiciones de entrada y salida el cual se adapta a una pequeña batería para mejorar el suministro de energía constante. En este sistema la energía principal se suministra por el panel fotovoltaico y la energía auxiliar se agrega mediante la energía recolectada del módulo piezoeléctrico, además, cada uno de los módulos se conectan en paralelo a la batería utilizando el convertidor dc-dc buck-boost diseñado para controlar la potencia de entrada y la potencia de carga y descarga de la batería. De acuerdo con el “Estado de Carga” (SOC) de la batería, el convertidor diseñado puede operar en 1) modo de corriente continuo, 2) modo de voltaje continuo y en 3) modo

MPPT para satisfacer la estabilidad del sistema, para proteger la batería y mejorar la utilización de la energía. La Fig. 2.27 muestra el sistema propuesto.

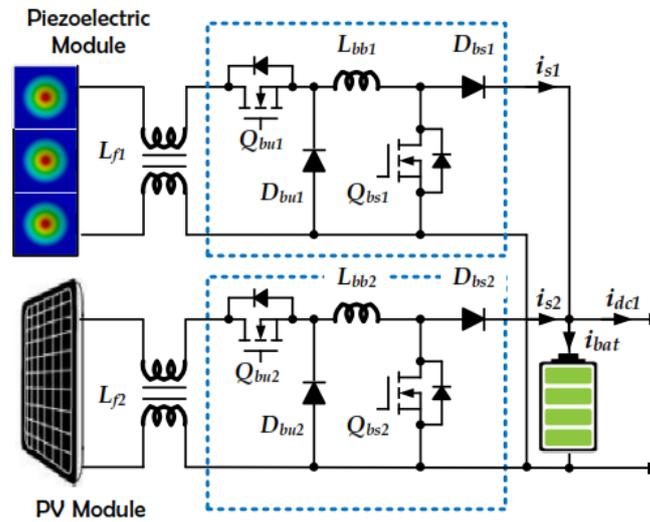


Figura 2.27: Sistema híbrido de recolección de energía propuesto en [17].

Una forma simple y efectiva de recolectar la energía proveniente de múltiples fuentes es a través de una topología “Power Oring”. Esta arquitectura ofrece un enfoque modular capaz de soportar un número arbitrario de subsistemas de recolección conectados en paralelo a través de diodos. Otra de sus ventajas es que cada subsistema puede realizar MPPT de forma independiente en su propio transductor, lo que ayuda a aumentar la eficiencia de seguimiento para cada fuente de recolección. El uso de diodos también asegura una operación auto-sincronizada reduciendo la complejidad de la PMU. Si es necesario, un convertidor DC-DC puede procesar y regular aún más el voltaje de salida de acuerdo con los requisitos de la carga. La topología Power ORing se muestra en la Figura 2.28.

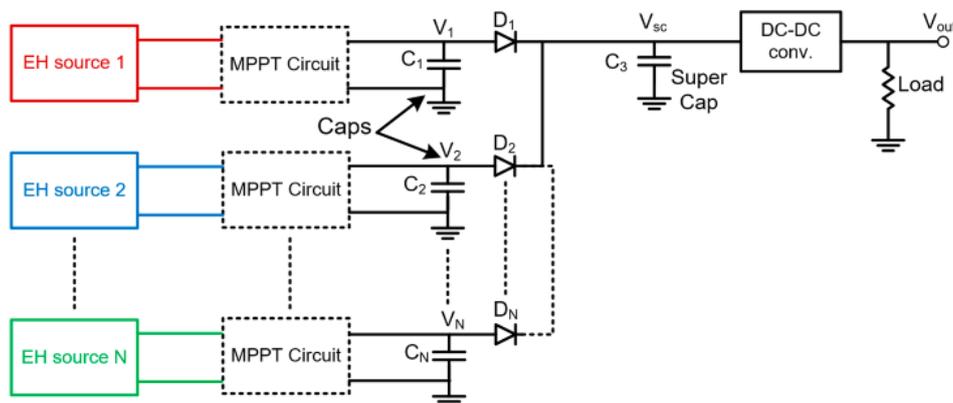


Figura 2.28: Arquitectura Power ORing para la recolección de energía a partir de múltiples entradas [18].

La principal desventaja de esta arquitectura es que hay pérdidas de energía no deseadas causadas por la caída de tensión de polarización directa en los diodos, además, tener un circuito MPPT para cada fuente aumenta significativamente el tamaño y el costo de la aplicación que conlleva a una sobrecarga significativa en su consumo de energía. Esto se puede resolver: 1) reemplazando los diodos por interruptores controlados por voltaje que harán que se reduzcan las pérdidas de energía; los interruptores se podrían sincronizar de acuerdo con diferentes estrategias y 2) eliminando los bloques MPPT individuales y controlando el convertidor DC-DC de tal manera que la tensión en el condensador de almacenamiento (V_{sc}) garantice la máxima transferencia de potencia a partir de la conexión en paralelo de las cosechadoras [18].

Finalmente, es importante observar que en el sistema de la Figura 2.28 la energía que proviene de todas las cosechadoras no se suman realmente, ya que solo se selecciona y envía a la salida el voltaje de entrada más grande. Esta estrategia funciona bien para recolectores complementarios como transductores solares y eólicos en donde no se espera que entreguen simultáneamente una cantidad significativa de energía, sin embargo, podría ofrecer un desempeño deficiente en escenarios donde múltiples recolectores heterogéneos están entregando al mismo tiempo niveles de energía diferentes pero comparables [18].

Los convertidores buck-boost se usan comúnmente en la recolección de energía para crear un esquema de adaptación de impedancia para propósitos de MPPT, ya que la impedancia de entrada del convertidor se puede sintonizar fácilmente a través del control de frecuencia de conmutación para crear la resistencia de entrada promedio requerida.

Cuando se están considerando múltiples entradas, se puede usar un esquema de “*inductor compartido*” en el convertidor buck-boost para reducir el número de componentes externos que se necesitan. La Figura 2.29 muestra este tipo de arquitectura donde se asignan 5 canales de interfaz a las entradas de AC (piezoeléctrica) y 4 a las entradas de DC (solar o térmica). El controlador en esta topología debe permitir que todas las entradas tengan acceso al inductor, mientras que al mismo tiempo se asegura que se obtenga la máxima transferencia de potencia para cada una de ellas [18].

La principal desventaja de la arquitectura de inductor compartido es que a medida que aumenta el número de fuentes de entrada la operación se desvía de una recolección de energía verdaderamente concurrente, ya que todos los transductores excepto uno se deja desconectado.

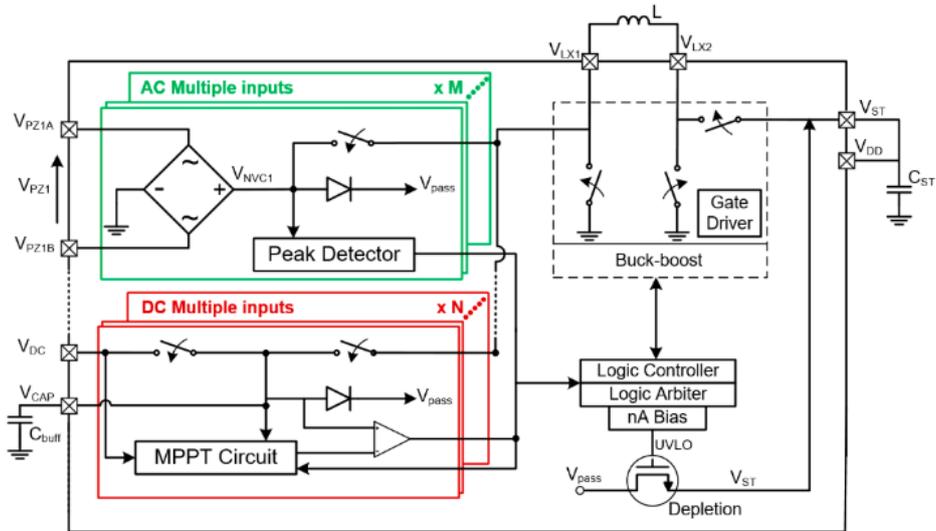


Figura 2.29: Combinador de energía basado en buck-boost con esquema de inductor compartido [18].

La técnica de los circuitos de “Condensadores Conmutados” (SC – Switched Capacitor) consiste en convertir una entrada de DC en una forma de AC y luego superponerla a otra entrada de DC que al rectificar la forma de onda resultante se pueda obtener un voltaje de salida de DC, además, esta técnica se puede usar para agregar voltajes. Como se muestra en la Figura 2.30, este proceso se puede conectar en cascada de forma modular para combinar un número arbitrario de entradas [18].

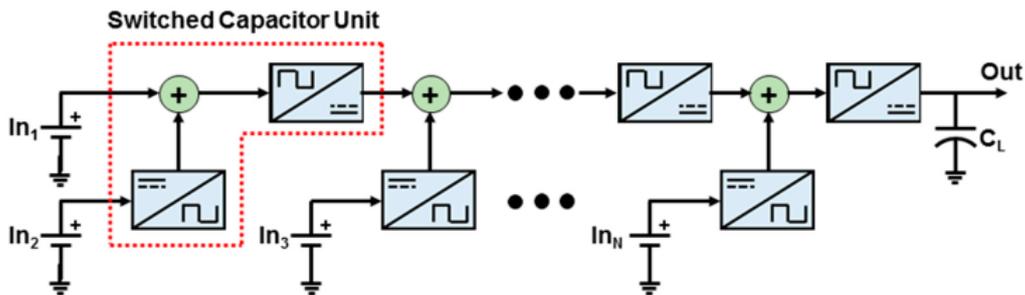


Figura 2.30: Concepto básico de un combinador de potencia de DC basado en condensadores conmutados para la recolección de energía. [18].

El cosechador de energía basado en SC tiene varias ventajas, por ejemplo: puede integrarse completamente reduciendo el tamaño y el costo de implementación, la recolección de energía de múltiples fuentes ocurre de manera concurrente y no existe una multiplicación de entradas impuesta por la necesidad de compartir un recurso común (como la topología de inductor compartido [18]).

Los convertidores DC-DC de múltiples entradas (MIC's – Multiple Input DC-DC Converters) están desempeñando un papel importante en la interconexión y diversificación de diferentes fuentes de energía. Este tipo de convertidores ofrece un diseño simple y más compacto reduciendo el costo y la complejidad del sistema.

En [19] se presenta una topología MIC que se adecua para la diversificación energética de fuentes de energía renovables y de almacenamiento de manera individual o simultánea. Se puede operar en modo Buck, Boost y Buck-Boost con la capacidad de flujo de energía bidireccional para lograr el nivel de voltaje deseado en cualquier lado. El principio de funcionamiento y operación de la topología MIC que se propone en [19], se basa en el convertidor DC-DC básico que es cargar los elementos pasivos del convertidor durante un periodo de tiempo determinado y luego descargar la energía almacenada de los elementos pasivos a través de la carga durante el periodo de tiempo restante en un solo ciclo de conmutación.

En los circuitos MIC, el inductor se puede cargar mediante múltiples fuentes de voltaje, adoptando un patrón de conmutación adecuado que conecta o desconecta las fuentes con el inductor de forma individual o simultánea. La estructura de esta topología se muestra en la Fig. 2.31 donde hay "N" celdas de fuente de voltaje pulsante (PVSC's) conectados en serie para alimentar la carga mostrada en el rectángulo delgado punteado.

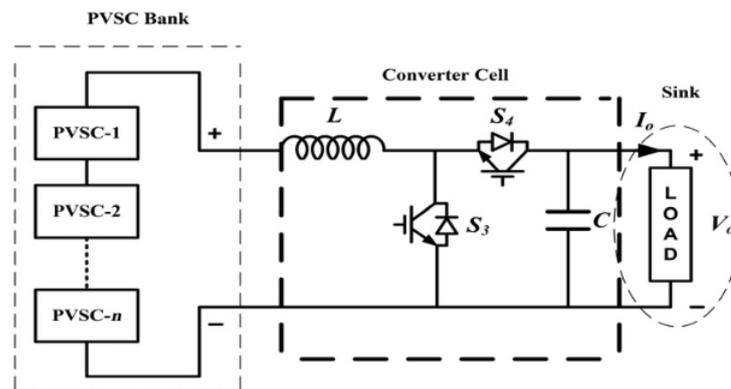


Fig. 2 Topological structure of the proposed MIC

Figura 2.31: Estructura topológica del MIC propuesto en [19]

La Tabla 2.5 se presenta una comparación entre las diferentes topologías utilizadas en un sistema de recolección híbrido mencionando las ventajas y desventajas que éstos presentan para su implementación.

Topología	Ventajas	Desventajas
Power ORing	<p>Número arbitrario de subsistemas conectados en paralelo.</p> <p>Cada subsistema puede realizar MPPT de manera independiente.</p> <p>El uso de diodos asegura una operación auto-sincronizada.</p> <p>Protege el bus de carga bloqueando las unidades de conversión de potencia.</p>	<p>Pérdidas de energía causadas por la caída de voltaje en los diodos.</p> <p>Tener un módulo MPPT independiente en cada subsistema aumenta el tamaño y el costo de la aplicación.</p> <p>No se suma la energía proveniente de las cosechadoras, ya que solo selecciona y envía a la salida el voltaje de entrada más grande.</p>
Inductor Compartido	<p>Se utiliza cuando se consideran múltiples entradas en un convertidor reductor-elevador.</p> <p>Permite que todas las entradas tengan acceso al inductor único, para asegurar que se tenga la máxima transferencia de potencia.</p> <p>La energía generada por cada cosechador en el sistema de entradas múltiples inicialmente se almacena en su propio condensador de amortiguación.</p> <p>Esta técnica se utiliza para extraer energía de cada fuente en secuencia.</p>	<p>A medida que aumenta el número de fuentes de entrada, la operación se desvía de una recolección de energía concurrente.</p>
Sumador de Voltaje	<p>Suma la potencia de las fuentes a utilizar.</p> <p>Comprende un circuito de interfaz individual para cada cosechador de energía y la adición de señales de voltajes de salida generadas para impulsar una sola carga.</p>	<p>No se tiene control sobre las fuentes a utilizar.</p> <p>Reduce la eficiencia en general de los sistemas híbridos.</p>
Regulador Lineal	<p>Se utiliza un único dispositivo de almacenamiento.</p> <p>El mecanismo de arranque ocurre a través de un circuito Power-On-Reset.</p> <p>Permite almacenar las cargas recolectadas de cada entrada en más de un capacitor de salida.</p> <p>Proporcionan rieles de voltaje de salida diferentes con regulación independiente.</p> <p>Recolecta energía simultáneamente de múltiples fuentes.</p> <p>Requiere un algoritmo de control simple.</p>	<p>No utiliza ningún mecanismo de carga de batería.</p> <p>Requiere un LDO (Regulador de Baja Caída) para cada fuente de energía.</p> <p>El uso práctico es bastante limitado.</p>
Convertidor Elevador	<p>La energía se extrae de cada fuente de entrada y se utiliza para cargar el condensador de la siguiente etapa.</p> <p>El control del ciclo de trabajo se puede utilizar para la regulación del voltaje de salida.</p>	<p>Requiere múltiples inductores, convirtiéndola en una solución voluminosa y costosa.</p> <p>No se puede configurar una relación de impulso de forma independiente para cada fuente de entrada.</p>
Circuitos de Condensadores Conmutados	<p>Se utiliza para agregar voltajes.</p> <p>La recolección de energía de múltiples fuentes ocurre de manera concurrente.</p> <p>Se puede conectar en cascada de forma modular para combinar un número arbitrario de entradas.</p>	<p>No existe una multiplexación de entradas porque implica una compensación entre la precisión del seguimiento y la eficiencia de la recolección que se intensifica con mayor número de entradas.</p>
MIC (Multiple Input DC-DC Converter)	<p>Combina varias fuentes de energía en serie o paralelo.</p> <p>Se puede operar en modo Buck, Boost y Buck-Boost con capacidad de flujo de energía bidireccional.</p>	<p>Limitaciones en paralelo:</p> <ul style="list-style-type: none"> - El voltaje de entrada debe ser asimétrico - Solo una fuente de entrada puede suministrar energía a la carga a la vez.

Tabla 2.5: Comparación de diferentes topologías en un sistema de recolección híbrido.

2.3. Seguidores Del Máximo Punto De Potencia (MPPT)

El punto de máxima potencia (MPP - Maximum Power Point) es el producto del voltaje en el punto máximo (V_{MPP}) y corriente en el punto máximo (I_{MPP}) para los cuales la potencia extraída en un circuito es máxima (P_{MPP}), la relación típica del MPP para circuitos lineales es del 0.5 (50 %), por ejemplo, generadores termoeléctricos (TEG) o generadores piezoeléctricos (PE).

Las celdas fotovoltaicas tienen curvas características I-V que definen su comportamiento ante diferentes condiciones de operación por lo que se consideran como circuitos NO lineales. La relación de potencia que éstas pueden entregar están alrededor del 0.7 al 0.8, es decir del 70 % al 80 %. El punto de máxima potencia varía continuamente, pues depende de factores como la temperatura de la celda solar y de las condiciones de irradiancia [63].

Los algoritmos de Seguimiento del Punto de Máxima Potencia (MPPT) se utilizan frecuentemente en sistemas fotovoltaicos para maximizar la energía entregada por los mismos. Existen gran variedad de algoritmos MPPT, por ejemplo: perturbar y observar, basados en lógica difusa, basados en redes neuronales artificiales, RCC (Ripple Correlation Control), conductancia incremental (INC) entre otros [63].

La implementación de estos algoritmos puede ser analógica o digital dependiendo de cuál se quiera utilizar. La implementación digital ofrece flexibilidad al momento de realizar variaciones en los parámetros de funcionamiento sin modificación del hardware [63, 64].

2.4. APLICACIONES PARA LA COSECHA DE ENERGÍA BASADA EN EL MOVIMIENTO

2.4.1. REDES DE SENSORES INALÁMBRICOS (WSN).

Es especialmente importante eliminar el mantenimiento de dispositivos implantables en el cual se debe evitar en lo particular el reemplazo de la fuente de energía, ya que a partir de ésta se depende y se determina el tiempo de vida de los dispositivos [65].

Idealmente, todos los dispositivos médicos implantables tienen un tiempo de vida útil, esta visión del cuidado de la salud utilizando dispositivos inalámbricos portátiles e implantados es el foco principal de una nueva área de investigación multidisciplinaria denominada *Red de Sensores Inalámbricos (BSN - Body Sensor Network)* [66, 67] debido a que mientras algunos sensores implantados pueden ser totalmente pasivos y otros activos,

muchos requieren una fuente continua de energía eléctrica [49] haciendo los desarrollos más relevantes desde el punto de vista en la tecnología de la batería [65].

El concepto general de WSN es el de desplegar muchos nodos de sensores pequeños, discretos y autónomos, siendo ésta la tecnología clave para alimentar a dispositivos pequeños de bajo consumo [66]. Además de aplicaciones médicas, el uso para los WSN's incluye el monitoreo estructural de edificios, monitoreo de estados de maquinaria, sistemas de seguimiento y recuperación personal, seguimiento militar, seguridad, computación usable, y monitoreo de motores de aeronaves [49]. Muchas áreas de aplicación serán atractivas en el uso de WSN's si estos pueden ser alimentados por una fuente de energía inagotable como lo es la recolección de energía a partir del medio ambiente.

2.4.2. OTRAS APLICACIONES

Las aplicaciones específicas para la recolección de energía están limitadas principalmente por la viabilidad del cosechamiento en cada caso. Esta viabilidad depende principalmente de cuatro factores:

1. El consumo de energía típico del dispositivo.
2. El patrón de uso.
3. El tamaño del dispositivo.
4. El movimiento al que el dispositivo está sujeto.

Por ejemplo, las computadoras laptop son malos candidatos debido a que tienen un consumo alto de energía (10W – 40W) y sus patrones de uso típico comprenden largos periodos de uso continuo [49]. Los teléfonos celulares son de alguna manera un objetivo más atractivo ya que tienden a ser transportados en el cuerpo por mucho más tiempo, experimentando así un movimiento regular mientras se usan durante periodos relativamente cortos, por lo que una alternativa atractiva es utilizar la energía proveniente del movimiento del cuerpo humano [65].

Para otros dispositivos portátiles como los reproductores MP3 y organizadores personales las consideraciones son similares a las de los teléfonos pero con algunas diferencias en requerimientos de alimentación y patrones de uso [49].

Capítulo 3

MODELADO DE CADA UNO DE LOS ELEMENTOS

3.1. Celda Solar

La metodología se dividió en tres fases. Primero, la recolección de datos de potencia de una celda solar utilizando un instrumento de medición y la implementación de un algoritmo en Matlab para la generación de gráficas experimentales; Segundo, el tratamiento que se hizo a los datos obtenidos para ser empleados en la simulación en LTSpice; Tercero, la comparación y el análisis de resultados de los datos experimentales y simulados.

3.1.1. Recolección De Datos

Para iniciar el análisis, se conectó la celda solar de dimensiones 5.6cm por 6cm con el instrumento de medición Model 2450 Source Meter de Keithley como se muestra en la Figura 3.1 para realizar las mediciones necesarias a diferentes horas del día y obtener así los parámetros bajo iluminación. Con los datos que se recaban para obtener las curvas I-V y P-V respectivamente, con ayuda de la Figura 2.11 se identifican los cinco parámetros principales como: V_{oc} , I_{sc} , V_{max} , I_{max} y P_{max} . Para calcular y determinar los parámetros de FF, η , I_{ph} , R_s , y R_{sh} se implementa un algoritmo en Matlab el cual se muestra en la Figura 3.2.

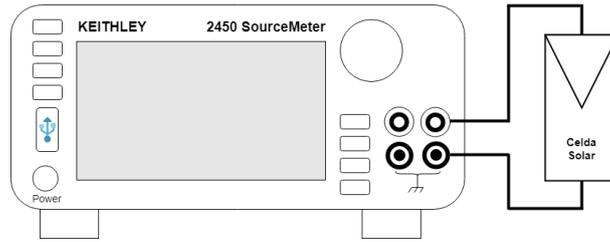


Figura 3.1: conexión de una celda solar al instrumento de medición [20].

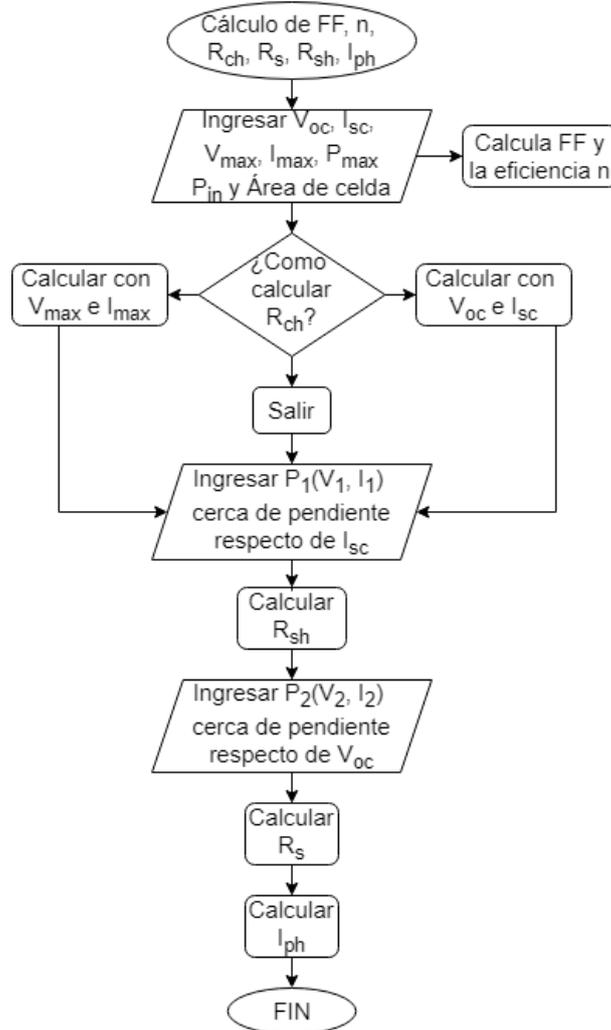


Figura 3.2: Diagrama de flujo del algoritmo que se implementó en Matlab.

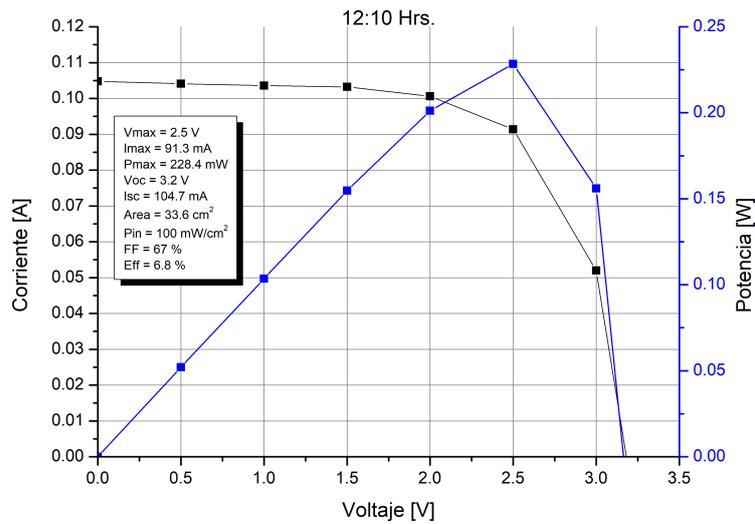
La Tabla 3.1 muestra las características eléctricas de la celda solar que se obtuvieron a partir de la caracterización realizada de manera experimental para obtener los valores de V_{oc} , I_{sc} , V_{max} , I_{max} , P_{max} , FF, η , I_{ph} , R_s , y R_{sh} ; datos que se requieren y necesitan al momento de simular el comportamiento de la celda solar utilizando el circuito equivalente single-diode de la Figura 2.9.

Celda	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Hora	11:40	12:10	12:11	12:12	12:35	12:50	13:15	13:40	14:00
V_{max} [V]	2.5	2.5	2.0	2.0	2.5	2.4	2.4	2.6	2.4
I_{max} [mA]	63.1	91.3	18.0	15.2	21.6	21.1	22.5	92.3	20.1
P_{max} [mW]	157.7	228.4	36.1	30.5	54.0	50.8	53.9	239.9	48.4
V_{oc} [V]	3.2	3.2	2.8	2.8	3	3.1	3.2	3.4	3.1
I_{sc} [mA]	72.9	104.7	19.8	16.8	28.2	24.6	25.4	101.8	23.4
Area [cm ²]	33.6	33.6	33.6	33.6	33.6	33.6	33.6	33.6	33.6
P_{in} [mW/cm ²]	100	100	100	100	100	100	100	100	100
FF [%]	67.5	68.1	64.9	64.6	63.7	66.5	66.2	69.3	66.7
Eficiencia [%]	4.7	6.8	1	0.9	1.6	1.5	1.6	7.1	1.4
R_s [Ω]	6.7	3.8	23.0	27.3	15.0	15.0	19.2	4.5	14.3
R_{sh} [Ω]	2343.8	968.0	2752.5	3126.9	1341.0	1624.4	1925.2	1160.1	1678.2
I_{ph} [mA]	73.7	105.1	20.0	17.0	28.6	24.8	25.7	102.2	23.6

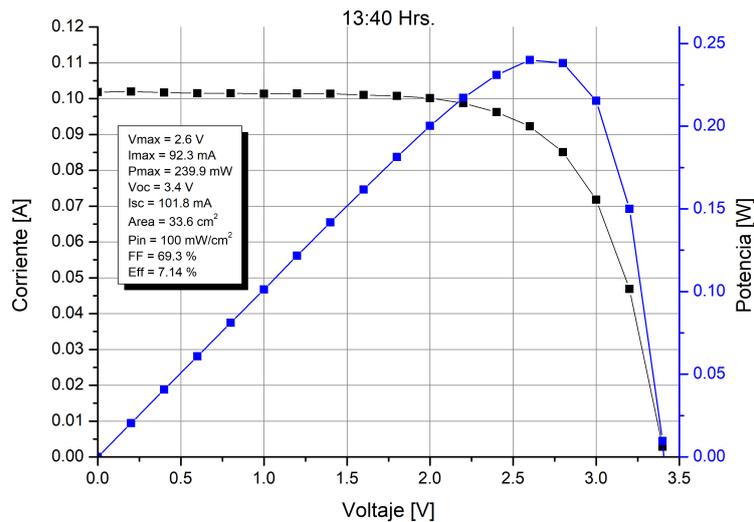
Tabla 3.1: Parámetros obtenidos de la caracterización de una celda solar comercial.

3.1.2. Tratamiento De Datos

El tratamiento de la información implicó tomar mediciones en diferentes horarios de 11:00 a.m. a 2:00 p.m., donde cabe mencionar que entre ese intervalo del día se encuentra la radiación solar más alta en la ciudad de Puebla, México. Con ayuda de la herramienta computacional OriginPro se graficaron las curvas características I-V y P-V de las mediciones que se realizaron para identificar los cinco parámetros del circuito equivalente de la celda solar que se muestra en la Figura 2.9 y posteriormente calcular con ayuda del algoritmo implementado en Matlab los valores que se desconocen de las variables R_s , R_{sh} e I_{ph} , basándose en la Figura 2.10 y la ecuación (2.11) respectivamente. Este procedimiento se realizó debido a que el instrumento de medición Source Meter de keithley proporciona los datos en crudo y no las gráficas de las mediciones que se tomaron. Las mediciones que mostraron tener una mayor eficiencia corresponden a las 12:10 HRS. y 13:40 HRS, sus curvas características correspondientes se muestran en la Figura 3.3 respectivamente.



(a) 12:10 HRS.



(b) 13:40 HRS.

Figura 3.3: Curvas características I-V y P-V experimentales.

En la Figura 3.3(a) se puede observar que la curva característica I-V (color negro) tiene un $V_{oc}=3.2V$ y una $I_{sc}=104.7mA$ y en la curva característica P-V (color azul) tiene una $P_{max}=228.4mW$ de donde se obtiene un $V_{max}=2.5V$ y una $I_{max}=91.3mA$ mostrando tener una eficiencia del 6.8 %. De igual manera en la Figura 3.3(b) se puede observar que la curva característica I-V (color negro) tiene un $V_{oc}=3.4V$ y una $I_{sc}=101.8mA$ y en la curva característica P-V (color azul) tiene una $P_{max}=239.9mW$ de donde se obtiene un $V_{max}=2.6V$ y una $I_{max}=92.3mA$ mostrando tener una eficiencia del 7.1 %.

3.1.3. Simulación y Análisis de Celda Solar

Utilizando el software LTSpice, se consiguió simular el comportamiento de la celda solar utilizando el diagrama eléctrico de la Figura 2.9 el cual consta del modelo matemático ideal con un diodo clásico de unión P-N que por medio del efecto fotoeléctrico convierte la radiación solar en energía eléctrica junto con componentes electrónicos como fuentes y elementos resistivos que emulan las pérdidas que se presentan en un entorno real. La Figura 3.4 muestra el modelo eléctrico que se utilizó para obtener el comportamiento de la celda solar, se utiliza una fuente de voltaje dependiente de voltaje ($E1$) puesto que la celda solar es un arreglo de varias celdas y de esta manera poder alcanzar los valores que se obtuvieron en la caracterización experimental y en la Figura 3.5 se muestran las curvas características simuladas que mostraron tener un mejor desempeño y una mejor eficiencia. Un punto importante es que para todas las mediciones realizadas en diferentes horarios se asume la misma potencia de entrada de radiación solar (P_{in}), por lo que para obtener las curvas I-V y P-V se asume lo mismo realizando un barrido en DC.

Como se observa en la Figura 3.5(a) el $V_{oc}=4.6V$, $I_{sc}=105mA$, $P_{max}=208.6mW$, $V_{max}=2.5V$, e $I_{max}=84mA$. De igual manera, en la Figura 3.5(b) se observa que el $V_{oc}=4.6V$, $I_{sc}=102mA$, $P_{max}=181.11mW$, $V_{max}=2.43V$, $I_{max}=75mA$. Estos datos se pueden comparar en la Tabla 3.1 en las mediciones de las 12:10 HRS. y 13:40 HRS.

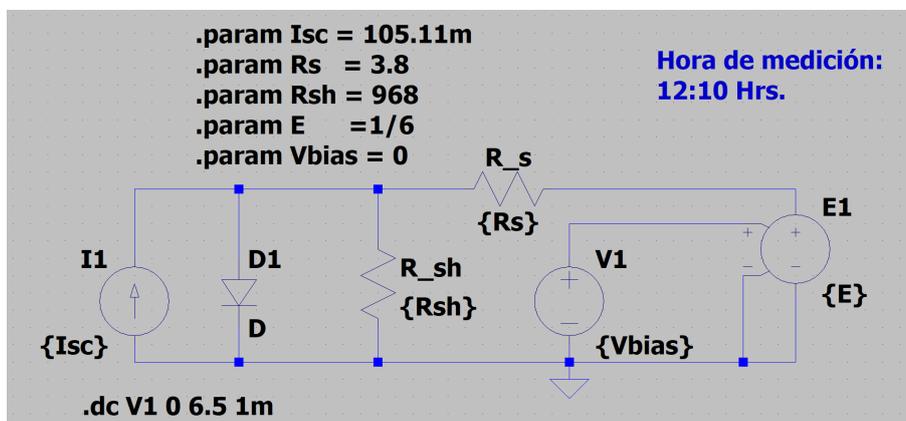
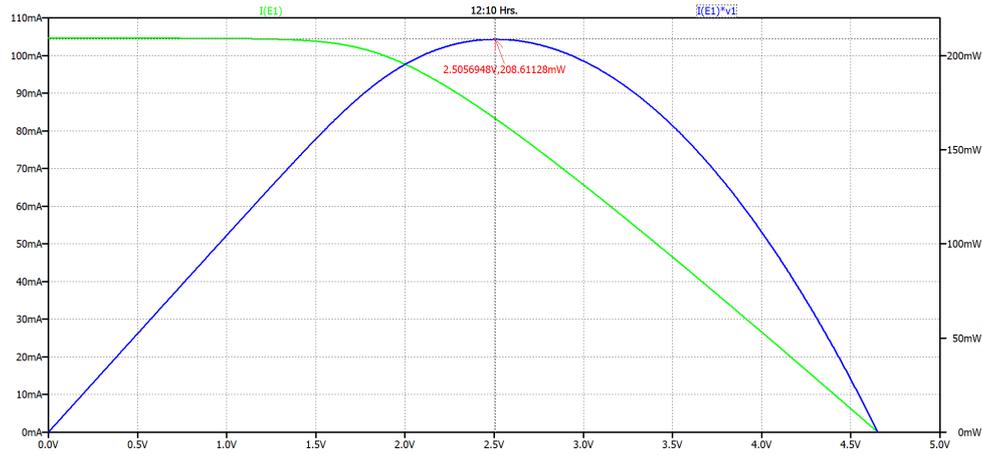
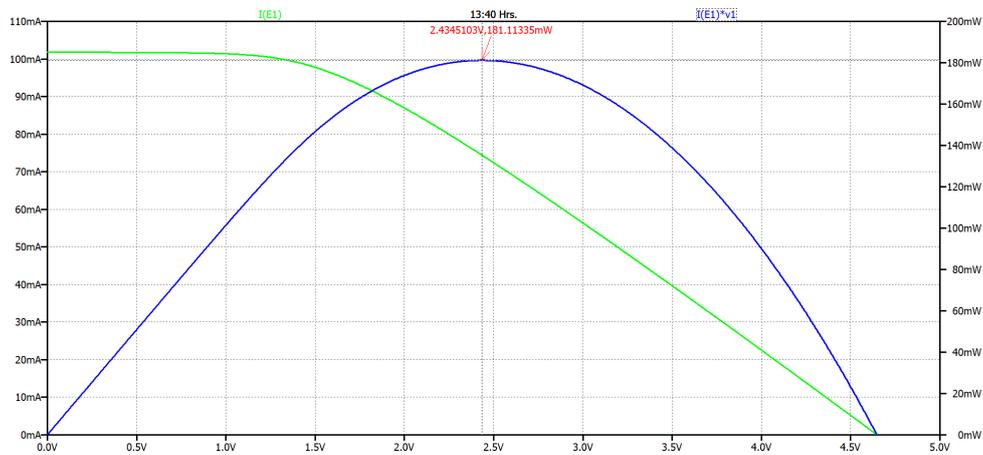


Figura 3.4: Modelo eléctrico Single-Diode de una celda solar en LTSpice.



(a) 12:10 HRS.



(b) 13:40 HRS.

Figura 3.5: Curvas características I-V y P-V Simuladas.

Las gráficas I-V y P-V que se obtuvieron en las simulaciones y comparándolas con respecto a las mediciones que se realizaron de manera práctica no fueron en su totalidad iguales, pero si parecidas porque se obtuvieron valores aproximados de V_{oc} , I_{sc} , V_{max} , I_{max} y P_{max} . El margen de error que se obtiene de las mediciones que mostraron tener una mejor eficiencia corresponde a un mínimo del 8.6 % y a un máximo del 24.5 % con respecto a la potencia que entrega la celda solar de las mediciones de las 12:10HRS. y 13:40HRS. respectivamente. Inclusive, se obtuvo mediante una prueba de escritorio el V_{max} para ambas mediciones con un factor del 70 % y 80 % del V_{oc} obteniendo aun así resultados tolerables, este último cálculo se realizó partiendo de las gráficas que se obtuvieron de manera experimental para ambas mediciones. Este margen de errores o desvíos se pueden producir debido a la resistencia parásita que se genera de las conexiones con los instrumentos de medición que se utilizan, ya que se considera que la resistencia R_s calculada resulta ser grande a pesar de ser relativamente en el rango de Ohms, de lo contrario, esta pudo haberse obtenido en un rango menor.

3.2. Elemento Piezoeléctrico

3.2.1. Modelado

Se utilizó el elemento piezoeléctrico matrícula S128-H5FR-1107YB para realizar su modelado, el cual tiene las características dimensionales que se muestran en la Figura 3.6, las especificaciones generales que se muestran en la Tabla 3.2 y las especificaciones para la recolección de energía sin masa de prueba que se muestran en la Tabla 3.3.

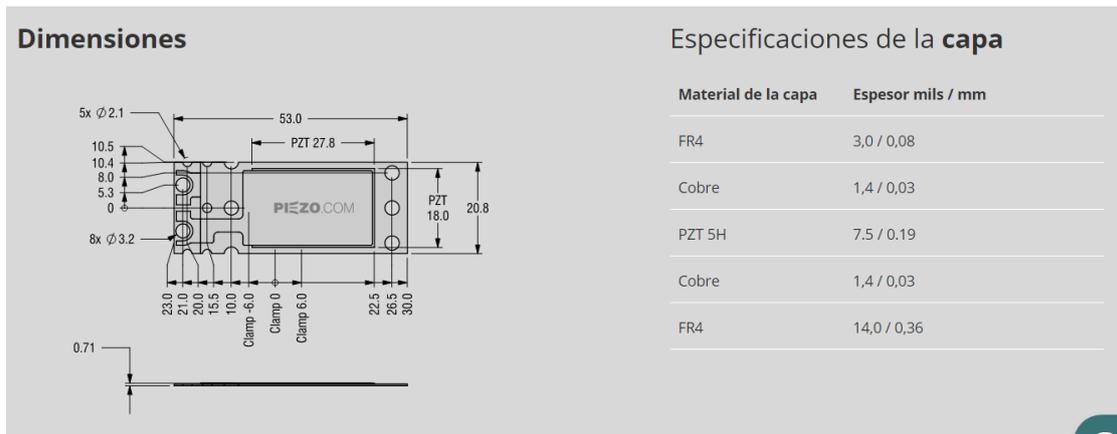


Figura 3.6: Dimensiones y especificaciones de la capa del piezoeléctrico [21].

Parámetros	Especificaciones
Longitud [mm]	55.4
Ancho [mm]	23.4
Espesor [mm]	0.71
Rango de temperatura	-60°C a 120°C
Masa [g]	2.0
Capacitancia [nF]	40
Voltaje de unidad nominal (+/- V) fuera de resonancia	150
Desvío libre [+/- mm]	0.19
Fuerza de bloqueo [N]	0.09
Const. de resorte [N/mm]	0.474
[N/m]	474
Frecuencia de resonancia [Hz]	384
Max Drive Volts @ Resonance [V]	10.0

Tabla 3.2: Tabla de especificaciones generales [21].

Parámetro	Sin masa de prueba
Frecuencia de resonancia EH [Hz]	384
Salida de circuito abierto [+/- V/G]	3
Carga de resistencia [Ω]	11100
Potencia @ nominal G [mW]	0.4
Calificación G [+/- G's]	8

Tabla 3.3: Tabla de especificaciones sin masa de prueba [21].

Con los parámetros proporcionados por el fabricante, se procedió a comprobar la frecuencia resonante de operación del elemento piezoeléctrico utilizando la ecuación (2.2) descrita en [36] en donde la frecuencia obtenida es igual a 367.1801Hz, De igual manera, se calculó la resistencia de carga óptima con la ecuación (2.4) descrita en [6] la cual arroja un valor de 10.361K Ω . Una vez obtenidos estos parámetros y con ayuda de la hoja característica, se procedió a obtener el comportamiento del elemento piezoeléctrico utilizando el software MATLAB, en donde se obtuvieron las gráficas:

- Masa de prueba (Δm) vs. Frecuencia

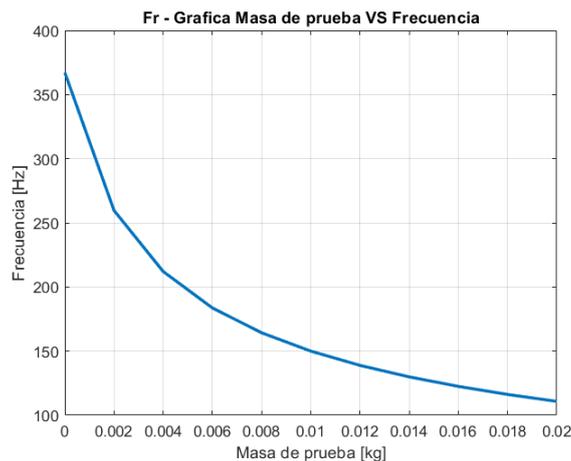


Figura 3.7: Gráfica Masa de Prueba vs. Frecuencia

La gráfica de la Figura 3.7 se obtiene utilizando la ecuación (2.3) descrita en [36], en donde el valor de (Δm) se varia de 0 a 20g. Como se puede observar cuando Δm incrementa, la frecuencia de resonancia disminuye.

- **Potencia vs. Frecuencia**

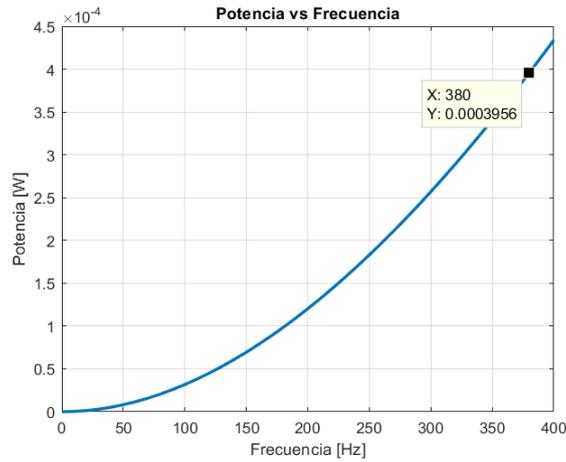


Figura 3.8: Potencia vs. Frecuencia

La gráfica de la Figura 3.8 se obtuvo utilizando la ecuación (2.7) descrita en [38]. Variando el valor de la frecuencia se observa que a un valor de 380HZ se obtiene una potencia de 0.4mW como lo especifica la hoja de datos del fabricante (consultar Tabla 3.3).

- **Potencia vs. R_L .**

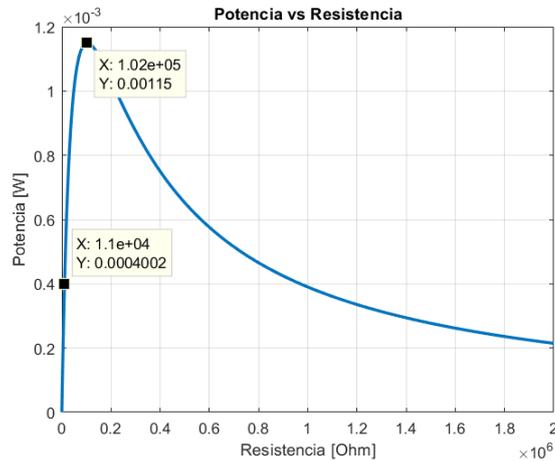


Figura 3.9: Potencia vs. R_L

Para obtener la gráfica de la Figura 3.9, del mismo modo se utilizó la ecuación (2.7) con una frecuencia de 384Hz y variando R_L de 1Ω a 2MΩ. Se puede observar que efectivamente la potencia que entrega este elemento piezoeléctrico es cuando se tiene una R_L de 11KΩ. En teoría si se coloca una resistencia mayor de aproximadamente 102KΩ se entrega una potencia de 1.15mW.

3.2.2. Simulación De Elemento Piezoeléctrico

Con base en la información recabada y obtenida, se procede a realizar la simulación del elemento piezoeléctrico utilizando una interfaz estándar como se muestra en la Figura 3.10.

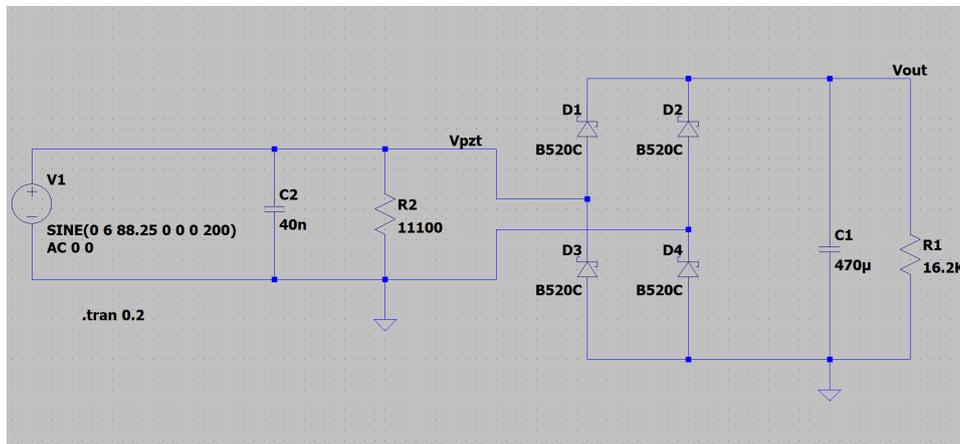


Figura 3.10: Diagrama de interfaz estándar en LTSpice para simulación de elemento piezoeléctrico.

Para simular el elemento piezoeléctrico se utilizó una fuente de voltaje de A.C. con una amplitud de 6V y una frecuencia de 384Hz, datos que fueron calculados previamente, el capacitor (C_p) y la resistencia (R_p) se ajustaron a 40nF y 11100Ω respectivamente. Para el puente rectificador se utiliza el diodo shockly B520C debido a su baja caída de tensión umbral, lo cual permite obtener un mejor voltaje a la salida. R_L se calcula con la fórmula 2.4 obteniendo un valor de 16.2KΩ; el capacitor C1 se fija a un valor de 470μF de tal manera que disminuyera un factor de rizado en la señal de salida y cumpliendo que $C_1 \gg C_p$.

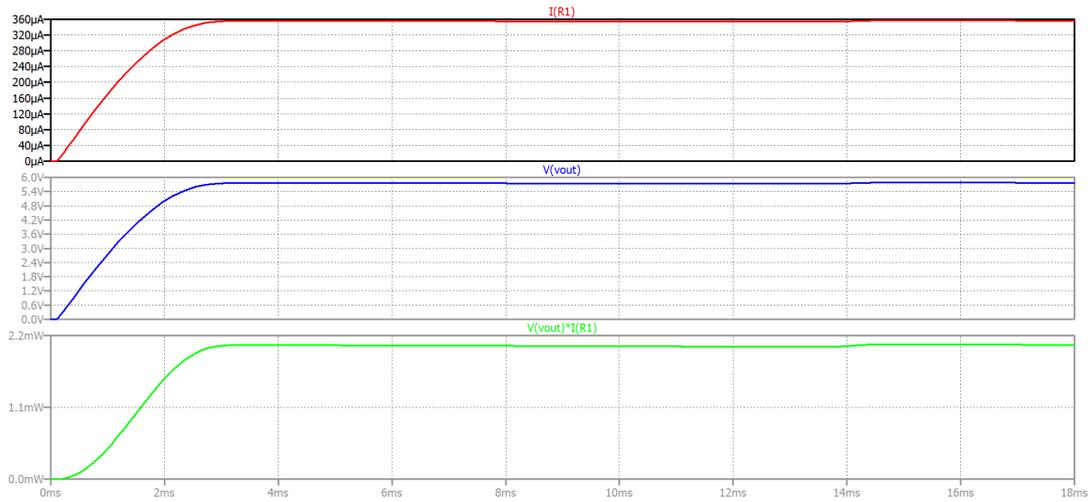


Figura 3.11: Gráfica con los valores de corriente, voltaje y potencia de salida del elemento piezoeléctrico.

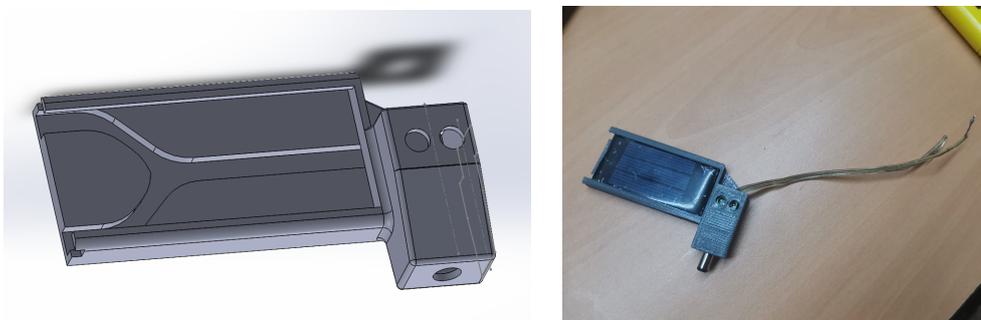
En las gráficas de la Figura 3.11 se observa que los valores simulados obtenidos de I_{out} , V_{out} y P_{out} son $360 \mu A$, 6V y 2.2mW respectivamente, y que se estabilizan a partir de los 3 mS.

Capítulo 4

DISEÑO DEL SISTEMA DE RECOLECCIÓN DE ENERGÍA HÍBRIDO A PARTIR DE 3 FUENTES

4.1. Celda Solar

La celda solar a utilizar en este trabajo de investigación proporciona parámetros de salida de $V_{oc}=1.5V$ e $I_{sc}=100mA$. Para poder realizar diferentes mediciones, se procedió a realizar el modelo CAD del chasis en donde se coloca la celda solar como se muestra en la Figura 4.1(a), esto para determinar la zona del cuerpo en donde va colocada y así obtener un mejor aprovechamiento en la recolección de la energía solar. La celda solar montada físicamente se muestra en la Figura 4.1(b) en donde se puede observar que se le coloca un conector clema-macho que permite conectar y desconectar fácilmente la fuente de recolección para poder realizar las pruebas necesarias de manera práctica y eficaz.



(a) Modelo CAD para el montaje de celda solar. (b) Celda solar montada en elemento CAD.

Figura 4.1: Elemento CAD para celda solar.

4.2. Elemento Piezoeléctrico

El elemento piezoeléctrico que se utilizó es el modelo “S118-J1SS-1808YB” que se muestra en la Figura 4.2 debido a que no está montado sobre un sustrato rígido FR4 y pareciendo ser una opción más adecuada y viable ya que este elemento se muestra ser más flexible debido al material por el que está compuesto evitando así que se fracture. Las características dimensionales que tiene se muestran en la Figura 4.3, sus especificaciones generales se muestran en la Tabla 4.1 y las especificaciones para la recolección de energía sin masa de prueba se muestran en la Tabla 4.2.



Figura 4.2: Elemento piezoeléctrico modelo S118-J1SS-1808YB.

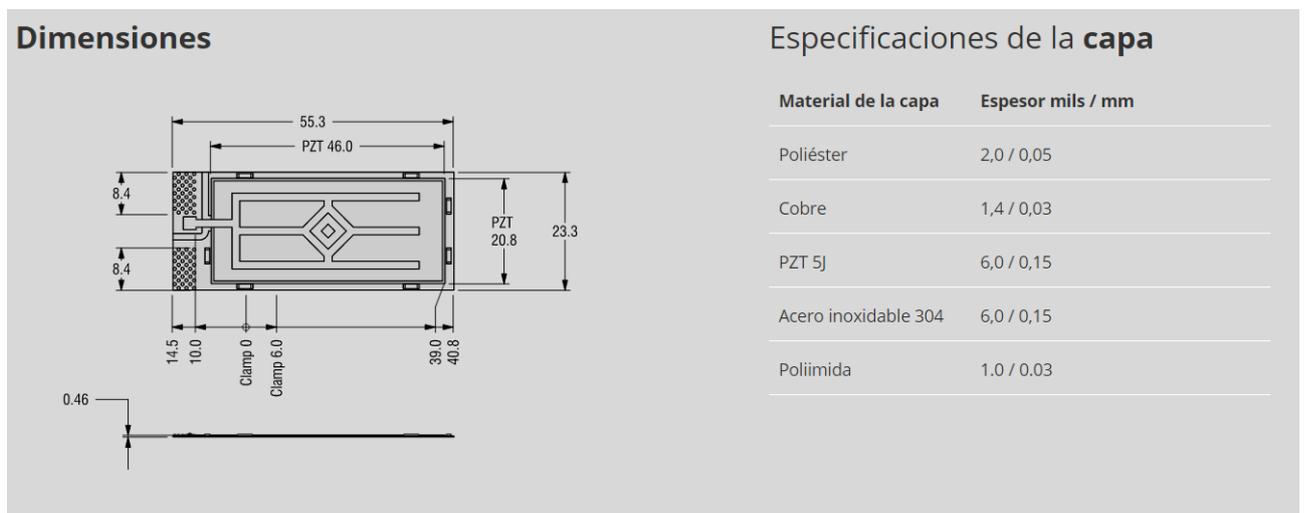


Figura 4.3: Características dimensionales de elemento piezoeléctrico.

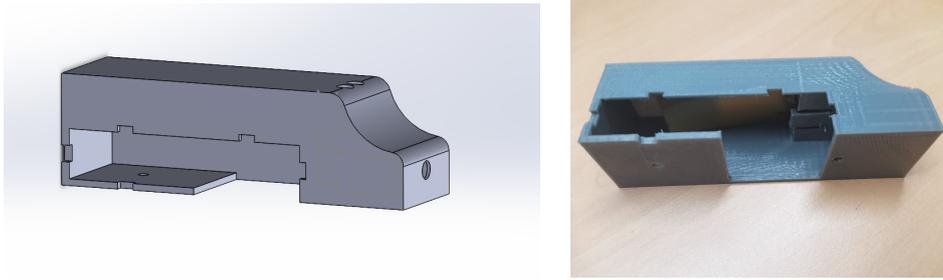
<i>Parámetros</i>	<i>Especificaciones</i>
Longitud (mm)	55.4
Ancho (mm)	23.4
Espesor (mm)	0.46
Rango Temperatura	-60°C a 120°C
Masa (grs)	2.8
Capacitancia (nF)	100
Voltaje de unidad nominal (+/- V) fuerza de resonancia	120
Desvío libre (+/- mm)	0.80
Fuerza bloqueada (N)	0.20
Const. de resorte (N/mm)	0.25
Amplitud máxima (mm)	2.0
Frecuencia de resonancia (Hz)	130
Max Drive Volts @ Resonance (V)	10.00

Tabla 4.1: Especificaciones generales de elemento piezoeléctrico.

<i>Parámetros</i>	<i>Especificaciones sin masa de prueba</i>
Frecuencia de resonancia EH (Hz)	130
Salida de circuito abierto (+/- Voltios/G)	6
Resistencia de carga (Ohms)	15700
Potencia nominal (mW)	0.7

Tabla 4.2: Especificaciones sin masa de prueba de elemento piezoeléctrico.

Para definir la posición del elemento piezoeléctrico y la zona de mayor aprovechamiento para la recolección de energía vibratoria, se procedió a realizar el modelo CAD del chasis en donde va colocado, éste a su vez protege al elemento piezoeléctrico de factores externos evitando que se dañe o se vea afectado su tiempo de vida útil. El elemento CAD está diseñado para colocarse a la altura de la cintura en el cinturón, junto o sobre a la caja de control del sistema biomecánico o colocado en el mismo elemento biomecánico. La Figura 4.4(a) muestra el modelo CAD para el montaje del elemento piezoeléctrico y la Figura 4.4(b) muestra al elemento piezoeléctrico montado físicamente en el elemento CAD. Al igual que en el modelo CAD para la celda solar, se utiliza un conector clema-macho para realizar las pruebas necesarias de manera práctica y eficaz.



(a) Modelo CAD para elemento piezoeléctrico. (b) Elemento piezoeléctrico montado en elemento CAD.

Figura 4.4: Elemento CAD para elemento piezoeléctrico.

Para conocer los parámetros de salida que proporciona el elemento piezoeléctrico a la frecuencia que puede generar el ciclo de la marcha en las posiciones mencionadas se procede a realizar su caracterización, pero debido a que el ciclo de la marcha no proporciona una señal periódica constante se implementó un banco de pruebas para simular el impacto de la pisada y con el cual se pueda obtener esta señal de manera periódica y constante. Se menciona que en el cuerpo humano se considera una cadencia de paso de 3 m/s (cada paso dura 1 segundo a 3 Km/h aproximadamente) [14]. Por otro lado, se considera que en un segundo se dan en promedio dos pasos, con lo que la frecuencia del piezoeléctrico puede ser en este caso aproximadamente de 2 Hz .

En la Figura 4.5 se muestra el banco de pruebas, el cual se implementó con un variador de frecuencias en un motor (dimer) con el cual se puede emular el control de la velocidad e intensidad que puede generar el impacto de una pisada.



Figura 4.5: Sistema para emular el impacto de una pisada en el ciclo de la marcha.

La Figura 4.6 muestra que la señal obtenida del elemento piezoeléctrico “sin masa de prueba” no tiene una forma de onda senoidal definida, la cual tiene un $V_{PP} =$ de 93.60V.

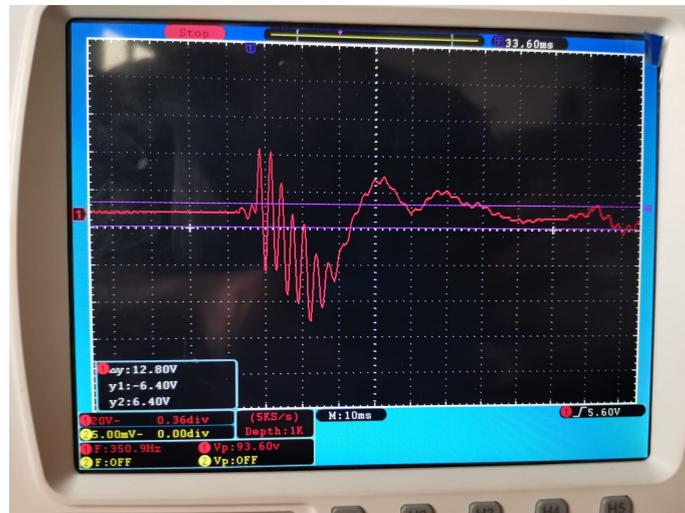


Figura 4.6: Señal de salida sin masa de prueba de elemento piezoeléctrico.

Para lograr reducir la frecuencia de resonancia del elemento piezoeléctrico cuando no se logra alcanzar la frecuencia para el que está diseñado y también para obtener una señal periódica y definida se colocó una masa de prueba de 3 grs. en el extremo libre como se muestra en la Figura 4.5.

En la Figura 4.7 se puede observar que la señal de salida del elemento piezoeléctrico es de tipo amortiguado, esto se debe a que la masa de prueba colocada en el extremo libre beneficia en la señal de salida mostrando tener una forma de onda senoidal más definida, periódica y prolongada.

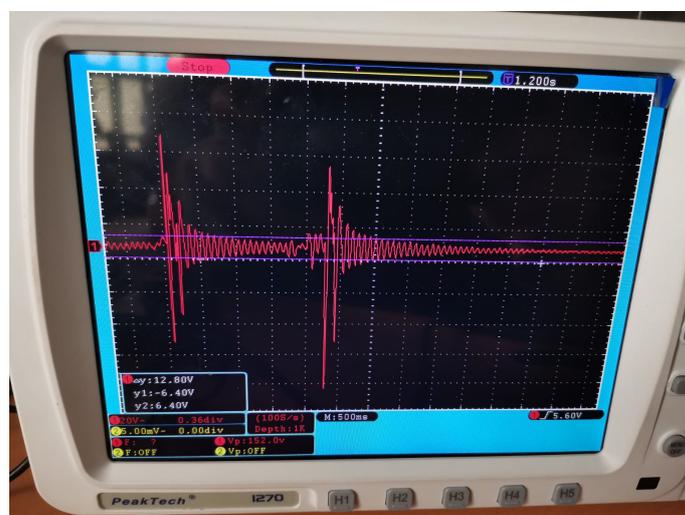


Figura 4.7: Señal de salida de elemento piezoeléctrico con masa de prueba de 3 gramos.

Esta señal tiene un $V_{PP} = 152V$ y un tiempo (t) de 500ms por división, en donde se genera un ciclo cada 100ms, con estos datos se obtiene una frecuencia de 10Hz la cual se considera dentro del rango de frecuencias que el cuerpo humano puede generar. También se menciona que el elemento piezoeléctrico a pesar de proporcionar una energía muy pequeña, se obtiene una señal bastante alta y que si se hace de manera constante se puede generar bastante energía. Una forma de optimizar la captación de este tipo de energía es utilizar los elementos piezoeléctricos en un entorno de vibración adecuado.

La manera más conveniente de utilizar el elemento piezoeléctrico es generar electricidad a partir de las vibraciones que en este caso genera el cuerpo humano. La configuración que se utiliza es la de “viga en voladizo” como se muestra en la Figura 2.1, en donde uno de los extremos se fija y el otro extremo queda expuesto libremente a movimientos que pueden generar vibraciones. La señal que se obtiene ante las vibraciones generadas es de tipo A.C., para obtener una señal D.C. se necesita acondicionar a ésta como se muestra en la Figura 2.7 pasando por un proceso de rectificación y conectando un capacitor para almacenar la energía y mantenerla constante.

Una vez conocida la configuración “viga en voladizo” se procedió a conectar el elemento piezoeléctrico como se muestra en la Figura 4.8. La primera prueba que se realizó para obtener la señal que este elemento puede proporcionar, es flexionarlo con el dedo en el extremo libre y soltarlo de manera repentina. La Figura 4.9 muestra que la señal que proporciona el elemento piezoeléctrico tiene una forma de onda senoidal (Señal rojo) la cual alcanzó un voltaje pico-pico de 2.5V con una frecuencia de alrededor de 20Hz. Con base en la Figura 2.7, al elemento piezoeléctrico se conectó un puente de diodos y un capacitor de $4.7\mu F$ para procesar la señal y así obtener una señal continua. Para tener un menor consumo de energía durante el proceso de rectificación, se utilizó el puente de diodos Shockley matrícula GBL06 D2G, el cual su voltaje de polarización directa es a partir de 1V, del mismo modo, en la Figura 4.9 se puede observar que la señal rectificada (Señal amarillo) alcanzó un valor máximo de $1.2V_{dc}$.

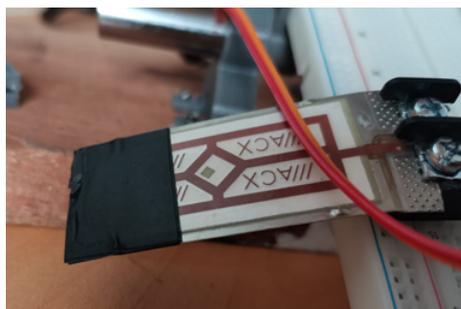


Figura 4.8: Elemento piezoeléctrico conectado en viga en voladizo.

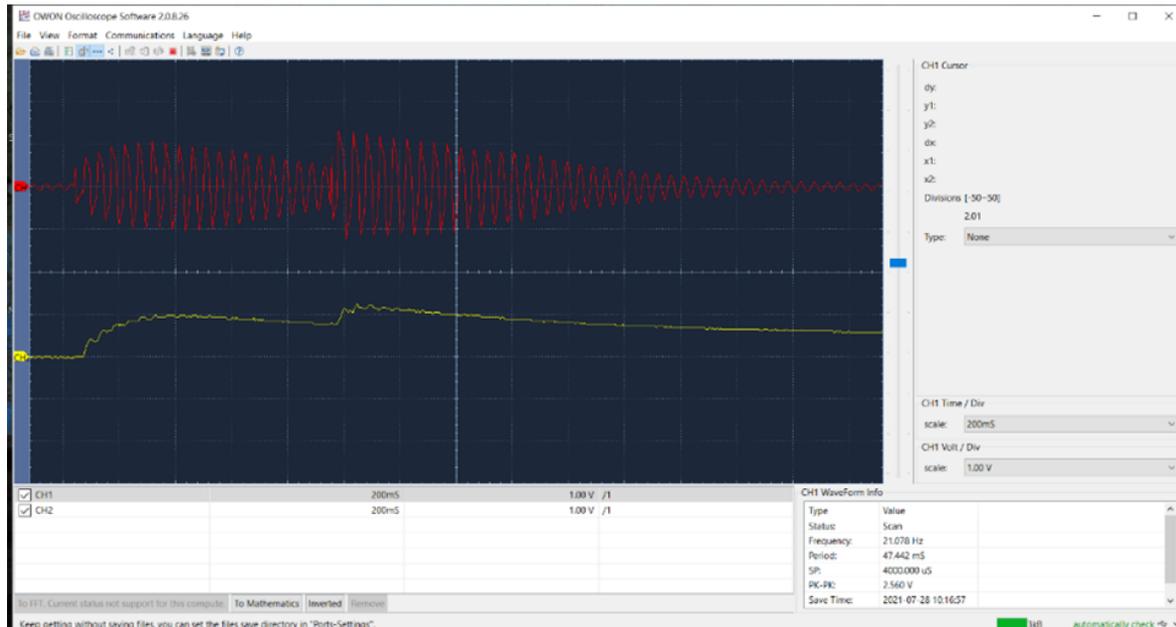


Figura 4.9: Señal A.C. (rojo) y señal D.C. (amarilla) de elemento piezoeléctrico.

4.3. Elemento Biomecánico

Debido a que el sistema biomecánico original implementado, al momento de realizar las primeras pruebas necesarias para la realización de este tema de investigación, se presentaron algunos inconvenientes para su uso, por ejemplo, el material en el que se encontraba fabricado no presentaba la rigidez adecuada, ya que durante algunas pruebas se flexionaba fácilmente pudiendo provocar algún tipo de fractura en el sistema, algunas piezas se encontraban dañadas, por ejemplo, ciertos postes que sujetaban las paredes del sistema se encontraban fracturados y algunos engranes ya no contaban con todos los dientes que los componían lo cual provocaba que el motor no girara adecuadamente, por mencionar algunos. Debido a lo indicado anteriormente, se tomó la decisión de re-manufacturar todo el sistema, en donde se cambian las paredes de plástico por paredes de aluminio para reforzarlo y de esta manera poder someterlo a pruebas necesarias sin ningún tipo de inconveniente, se utilizaron tornillos en los postes para tener mayor rigidez, se re-manufacturaron los engranes totalmente, se implementaron separadores para alinear los engranes, se utilizaron bujes para mejorar la rigidez de los ejes que presentaban un rodamiento mayor, principalmente el eje del engrane que va a la altura de la rodilla, se cambiaron los valeros ya que los originales presentaban un desgaste y por consecuencia una fricción al momento de girar, de igual manera, la polea que va montada sobre el motor se colocó con un contrapunto fijado en una de las caras de aluminio para evitar que el motor se inclinara al momento de girar y tomara otro eje de rotación, en la misma polea se agregó un contrapeso el cual permite una mayor conservación de energía a partir

del más mínimo esfuerzo. Se menciona que el contrapeso no hace girar más rápido o más lento al motor, sino que mantiene por más tiempo el momento de inercia y con el cual se amortigua (suaviza) la caída en la curva de energía generada, porque de cierta manera, el individuo sigue inyectando la misma cantidad de energía en el ciclo de la marcha. El nuevo sistema biomecánico reconstruido se puede observar en la Figura 4.10.

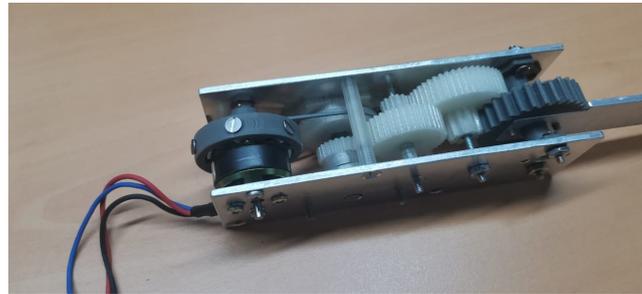


Figura 4.10: Reconstrucción del sistema biomecánico.

Con la re-manufactura del elemento biomecánico se realizó el acoplamiento para ser utilizado, en donde su funcionamiento tiene un mejor desempeño debido a que puede soportar diferentes condiciones a las que sea sometido cuando se realicen las pruebas de caracterización necesarias. Antes de conectar el nuevo elemento biomecánico con su centro de control, se procedió a analizar la señal en crudo que proporciona el generador (máquina C.A. sin escobillas). La Figura 4.11 muestra la forma de onda generada la cual tiene una periodicidad constante. Los parámetros obtenidos son $47V_{PP}$ con un tiempo (t) de 500 ms por división. De igual manera, se puede deducir que en el elemento biomecánico es posible que se obtenga una corriente mucho mayor que en el elemento piezoeléctrico porque tiene un voltaje casi constante en cuanto a su periodicidad. Comparando la señal del elemento biomecánico con la del piezoeléctrico, se obtuvo una banda de comparación muy diferente.

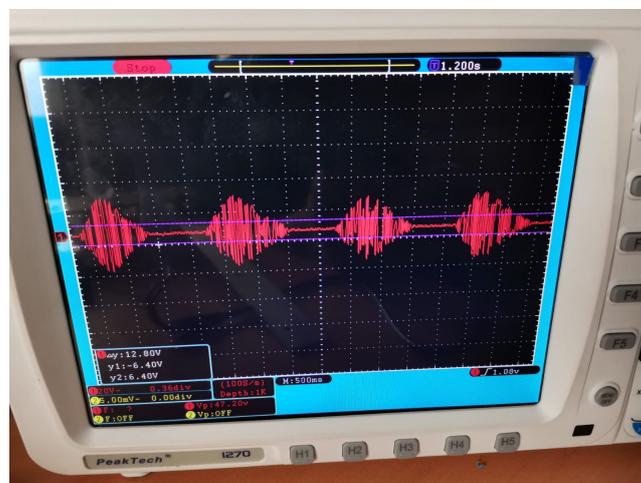


Figura 4.11: Señal de elemento biomecánico sin conectar a su centro de control.

4.4. Diseño E Implementación

4.4.1. Generador Solar

Una vez identificado el factor MPP (Punto de Máxima Potencia) que una celda solar puede ofrecer está alrededor del 70 % al 80 % dependiendo de las condiciones climáticas que se presenten, para que esta energía se pueda aprovechar es necesario utilizar alguna técnica de cosecha de energía.

Para ello, se utiliza el chip de recolección de energía ADP5090, el cual se encarga de procesar la energía recolectada mediante un módulo de arranque en frío (Cold-Start), un módulo MPPT (Maximum Power Point Tracking) que se encarga del seguimiento del máximo punto de potencia, y convertidores elevadores (Boost-converter) los cuales proporcionarán un voltaje mucho mayor al que se está recolectando y de esta manera poder almacenarlo en un supercapacitor o pila recargable. El circuito típico de aplicación del chip ADP5090 se muestra en la Figura 4.12

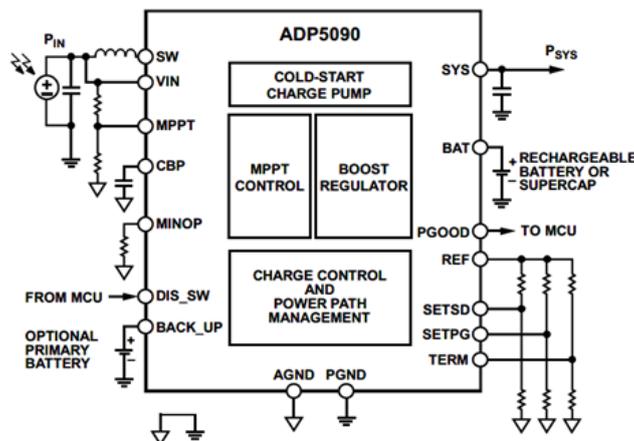


Figura 4.12: Circuito típico de aplicación de ADP5090.

Lo primero que se realizó es una placa de evaluación para cada una de las fuentes de recolección de energía a utilizar como se muestra en la Figura 4.13, en donde se pueden conectar diferentes valores de capacitores para tener una mejor eficiencia en la recolección de energía, se colocó un diodo Zener para regular el voltaje a 3V y evitar sobre-picos de tensión en el chip ADP5090, se colocó una resistencia de 50Ω para limitar la corriente de entrada al chip ADP5090 y evitar una potencia de entrada (P_{in}) no mayor a 200mW. Esto se realizó para precaver que se averíe el chip de harvesting, también se colocó un transistor MOSFET canal N para controlar la energía que se recolecta y poder procesarla con ayuda del microcontrolador. Las tarjetas de evaluación para cada una de las fuentes se describen en la Figura 4.14 y el cálculo de la resistencia se presenta a continuación:

$$P=VI \rightarrow 0.2W=(3V)(I)$$

$$I=0.2W/3V=0.06A$$

$$V=RI \rightarrow 3V=R(0.06)$$

$$R=3V/0.06A=50 \Omega$$

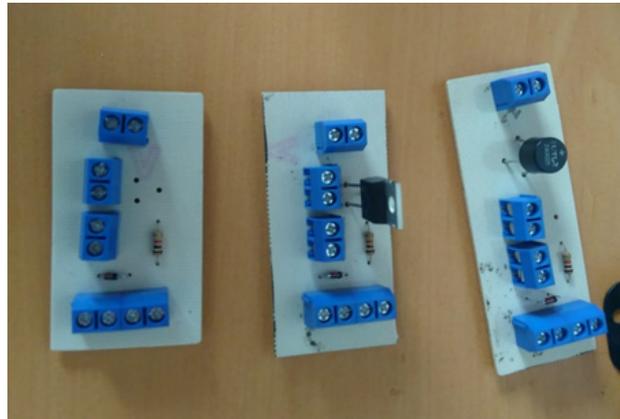


Figura 4.13: Placa de evaluación para cada una de las fuentes a utilizar.

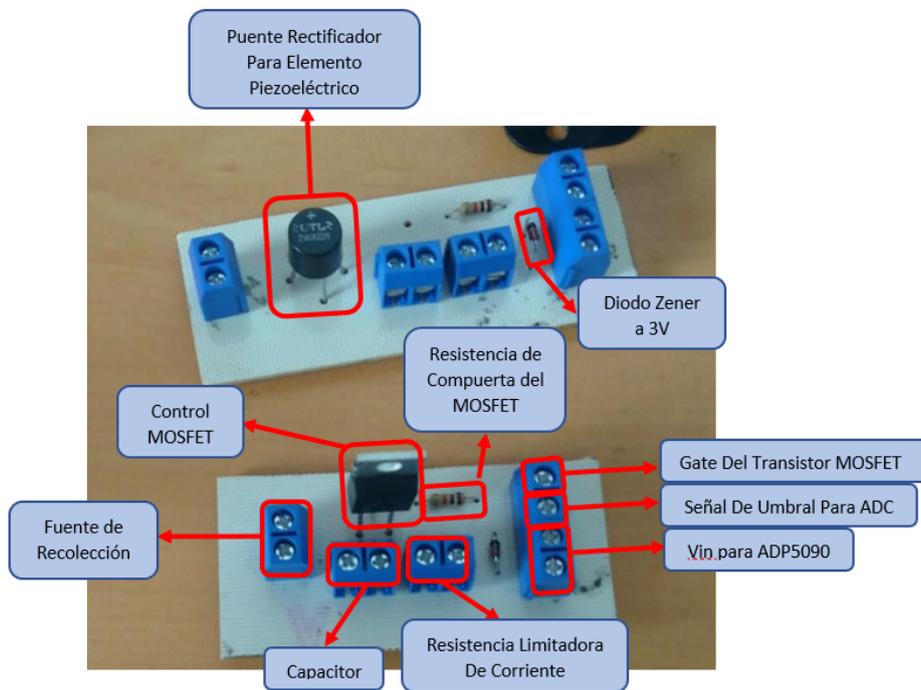


Figura 4.14: Descripción de las placas de evaluación para las fuentes a utilizar.

Las placas de evaluación para las fuentes a utilizar se basan en el diagrama de conexión de la Figura 4.15, en donde se tiene un nodo para el voltaje que ofrece la fuente, un nodo para la lectura analógica y un nodo para controlar el transistor N-MOS.

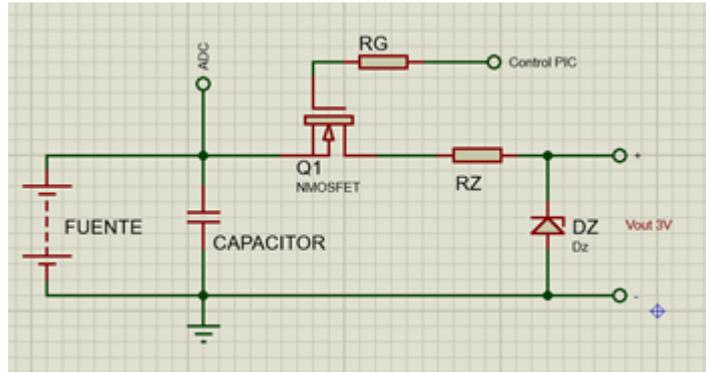


Figura 4.15: Diagrama de conexión de placas de almacén de energía.

La primera prueba que se realizó es conectar la celda solar a su respectiva placa de evaluación, conectando un capacitor de $4.7\mu\text{F}$ como lo sugiere la hoja de datos del chip ADP5090 para almacenar la energía solar. Se menciona que en esta prueba se mide el voltaje que se proporciona a la salida conectando y desconectando una carga LED (ver Figura 4.16) para verificar que la placa de evaluación de energía no rebasa los 3V (limitado por el diodo Zener).

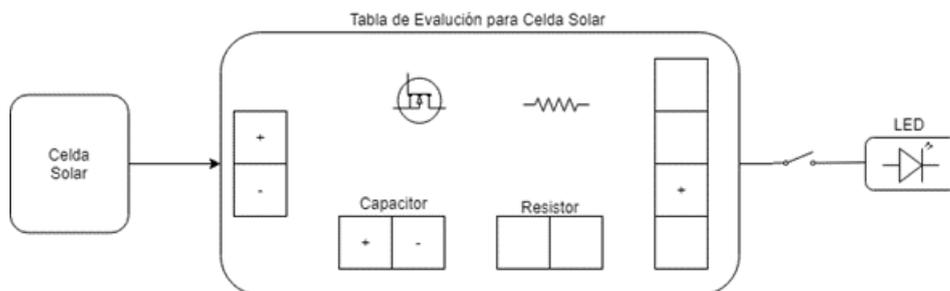


Figura 4.16: Esquema de conexión de celda solar conectando y desconectando una carga.

La celda solar en condiciones ambientales (exposición a la radiación solar) proporciona un $V_{oc}=1.5\text{V}$ y una $I_{sc}=100\text{mA}$. Para fines prácticos las pruebas que se realizaron son en condiciones de laboratorio en donde la irradiación solar se emula con una bombilla de luz incandescente; las mediciones que se obtienen se pueden observar en las Figuras 4.17 y 4.18.

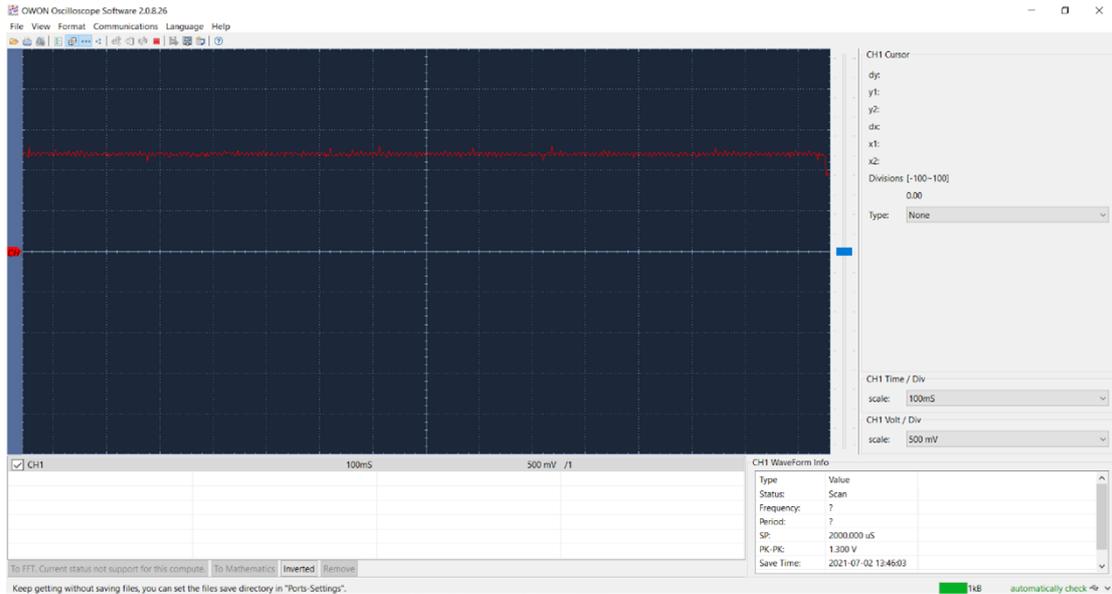


Figura 4.17: Medición de voltaje en celda solar sin carga ($V_{out}=1.2V$).

En la Figura 4.17, se observa que la celda solar proporciona un voltaje de 1.2V, medición en la que la carga no está conectada, es decir, el capacitor adquiere una máxima energía la cual posteriormente puede entregar a la carga o a al chip de recolección ADP5090 cuando se conecte.

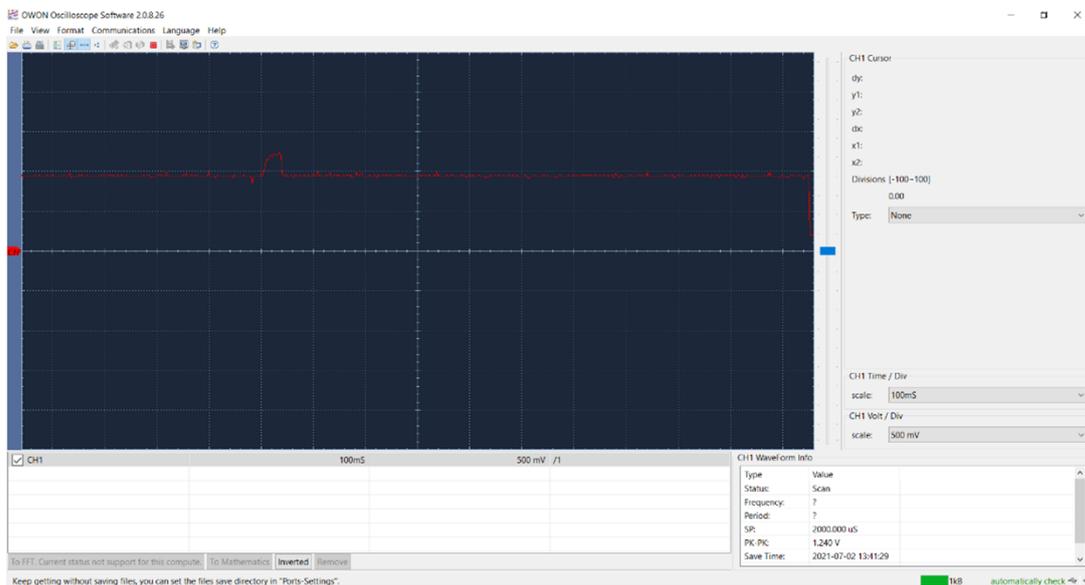


Figura 4.18: Medición de voltaje en celda solar con carga ($V_{out}=900mV$).

La Figura 4.18 muestra que una vez conectada la carga, el voltaje que proporciona la celda solar disminuye a 900mV, de igual manera se puede observar que hay picos de incremento de voltaje a 1.2V. Estos son periódicos e indican que el capacitor puede almacenar y proporcionar la energía almacenada en un tiempo promedio de 40ms a la carga.

Una vez verificados los voltajes de salida que puede proporcionar la placa de evaluación de la celda solar, se procedió a conectar el chip de harvesting ADP5090 en el pin V_{in} como se muestra en la Figura 4.19, esto para verificar su correcto funcionamiento. Antes de conectar una pila recargable o un supercapacitor, se corroboró tener una señal a la salida en el pin V_{bat} conectando y desconectando una carga (LED). Se hace mención que la placa de evaluación ADP5090 ya viene con un voltaje de salida preconfigurado en el pin V_{sys} y V_{bat} el cual corresponde a 3.5V.

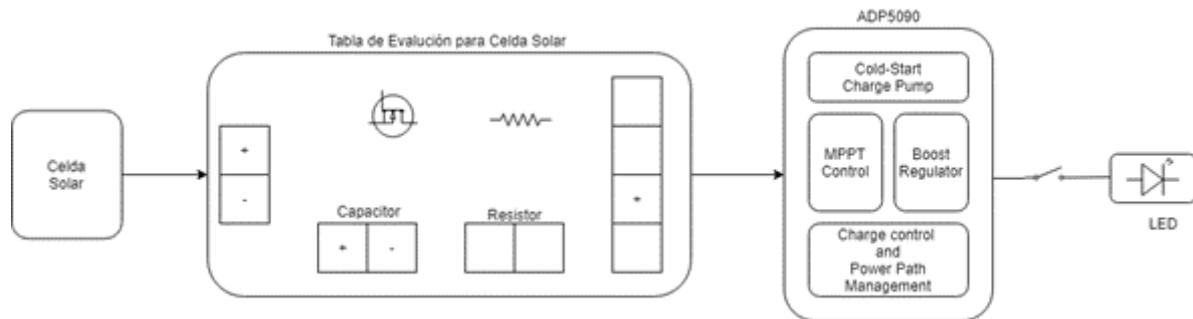


Figura 4.19: Esquema de conexión de celda solar a placa de evaluación y chip de harvesting.

En la Figura 4.20 se observa la implementación física del diagrama de la Figura 4.19. El voltaje que se obtiene a la salida en el pin V_{bat} de la placa de evaluación ADP5090 es de 3V (sin carga) y 1.6V (con carga) como se muestra en la Figura 4.21 y 4.22 respectivamente, de igual manera se menciona que la corriente de salida en este pin debe ser menor a 800mA para evitar que se averíe la tarjeta de recolección de energía.



Figura 4.20: Recolección de energía solar utilizando un chip de harvesting..

La Figura 4.21 muestra que el voltaje que proporcionó la celda solar se mantiene en 1.2V (Señal en rojo) y el voltaje de salida en el pin V_{bat} del ADP5090 es de 3V (Señal en amarillo), esto se debe a que aún no se conecta una carga en el pin V_{bat} .

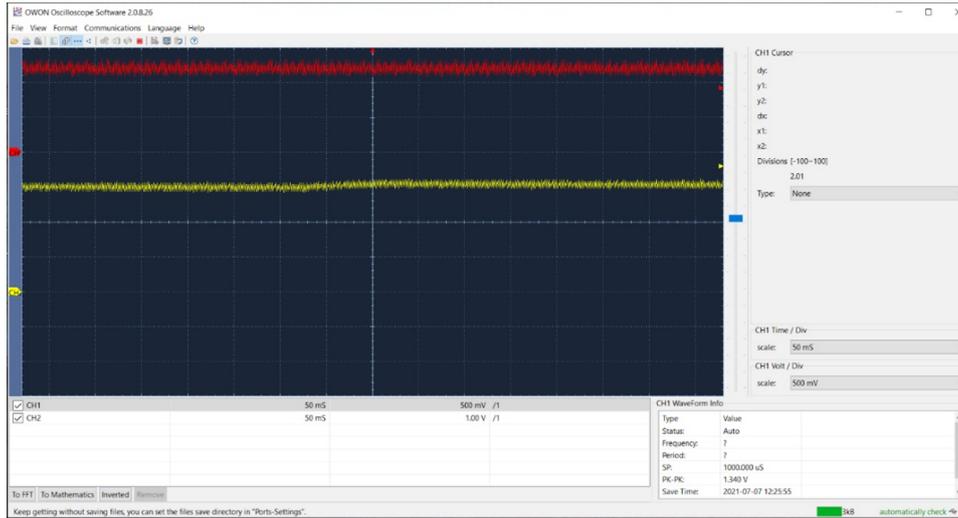


Figura 4.21: Voltaje de salida de 3V (sin carga) de ADP5090.

En la Figura 4.22 se observa que al conectar una carga en el pin V_{bat} , el voltaje que proporciona la celda solar baja de 1.2V a 900mV (señal en rojo). Se menciona que siempre que se conecta la carga (LED), se presenta el incremento y decremento mencionado. Esto se debe a que el capacitor se está cargando y descargando proporcionando la energía que se está recolectando a partir de la celda solar. El voltaje que se obtiene a la salida en el pin V_{bat} del chip de harvesting fue de 1.6V (señal en amarillo).

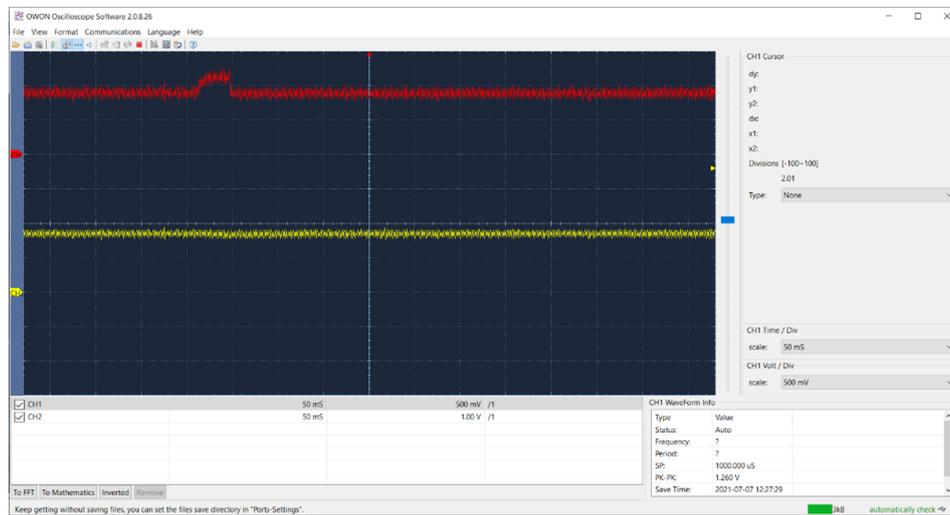


Figura 4.22: Voltaje de salida de 1.6V (con carga) de ADP5090.

La siguiente prueba que se realizó es controlar un transistor MOSFET para activar y seleccionar el MPPT correspondiente a la fuente que se está utilizando, para ello se utiliza el transistor MOSFET IRLZ44 de nivel lógico, la tarjeta miuva (μVa) que contiene el pic 18F4550 y de la cual se utilizan los recursos de los convertidores analógico-digital (DAC).

Por el momento, como fuente de alimentación la cual va conectada al pin DRAIN del transistor se utilizan los 5V que proporciona el pic y para controlar el transistor el pin GATE se conectó al puerto D0 del microcontrolador, de igual manera, para fines visuales se conectó un led para poder identificar cuando se selecciona el transistor que activa el MPPT como se muestra en la Figura 4.23.

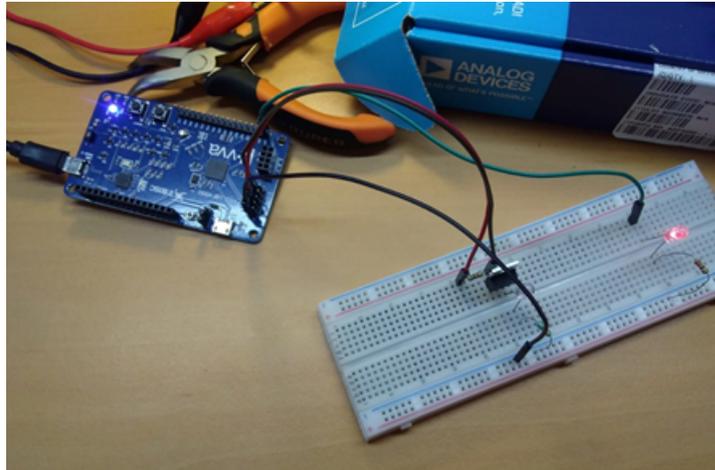


Figura 4.23: Activación de transistor MOSFET para selección de MPPT.

Como se muestra en la Figura 4.24, se pueden observar la señal que almacena el capacitor (señal roja) y la señal que activa el transistor MOSFET (señal amarilla). En la señal amarilla se observa que el tiempo de conmutación que se mantiene activo el transistor es en un intervalo de 50ms ya que el pico de incremento que presenta el capacitor de la celda solar es de alrededor de 40ms. Se menciona que cada que se presenta un incremento de energía (señal roja) se activa el transistor para seleccionar el MPPT.

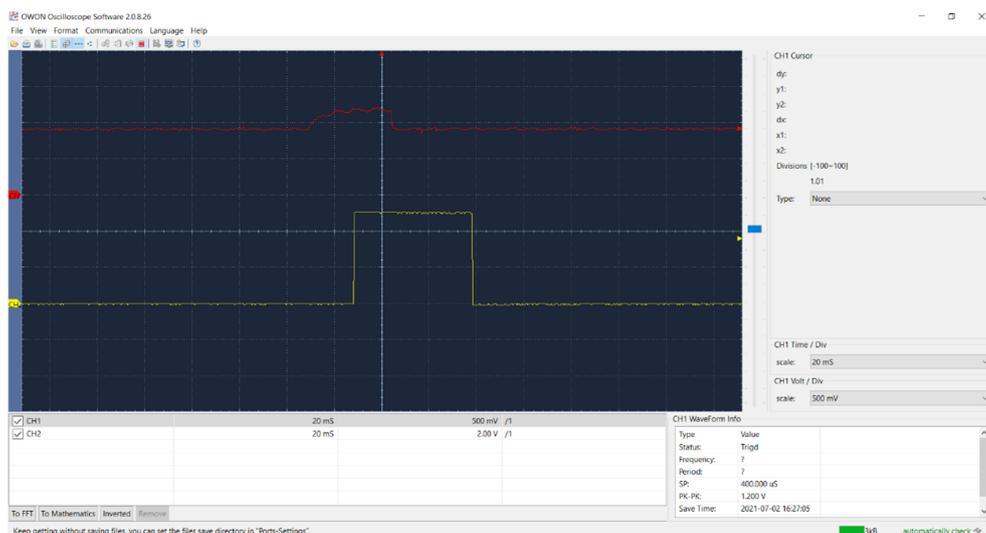


Figura 4.24: Señal de activación de transistor MOSFET IRLZ44 para ajuste de MPPT de celda solar.

Esta prueba se realizó ejecutando un código en lenguaje C utilizando CSS Compiler para poder recolectar la energía a partir de una sola fuente que corresponde a la celda solar. El código que se implementó se puede consultar en el apéndice A.1. El funcionamiento de este programa se da de la siguiente manera: El voltaje que se almacena en el capacitor de la celda solar se va a estar leyendo con ayuda del DAC de 10bits que proporciona el pic 18F4550, debido a que el voltaje máximo para activar el transistor MOSFET es de 5V (voltaje que proporciona el pic) tiene una resolución de 1024, por lo que se establece que a partir de 1V en el capacitor de la celda solar se pueda recolectar asignando un valor de resolución de 210 y es así, que cada que se detecta un voltaje mayor en el capacitor (señal en rojo) se activa el transistor para seleccionar el MPPT que en este caso corresponde a un factor del 78 %.

4.4.2. Generador Biomecánico

El siguiente paso fue conectar el elemento biomecánico a su placa de acondicionamiento y almacenamiento de energía como se muestra en la Figura 4.25 conectando un capacitor de $4.7\mu\text{F}$ y una resistencia limitadora de corriente de 50Ω para evitar algún daño en el chip ADP5090 debido a que la potencia máxima de entrada (P_{in}) debe ser menor a 200mW. Se menciona que en esta prueba se mide el voltaje a la salida conectando y desconectando una carga (LED) para verificar que no rebasa los 3V que están limitados por el diodo Zener, ya que el elemento biomecánico proporciona un voltaje de 4V y una corriente de 80mA. Las señales que se obtuvieron de esta medición se pueden observar en las Figuras 4.26 y 4.27 respectivamente.

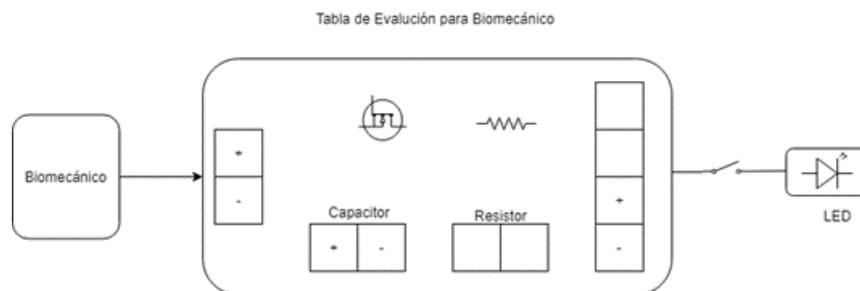


Figura 4.25: Esquema de conexión de elemento biomecánico conectando y desconectando una carga.

La Figura 4.26 muestra que al conectar el elemento biomecánico a la placa de acondicionamiento de energía sin conectar una carga (LED) se obtiene una señal de entrada de 3V (señal en rojo), esto es porque la pila no se encontraba cargada a su máximo voltaje y una señal de salida de 3V (señal en amarillo) – voltaje limitado por el diodo Zener.

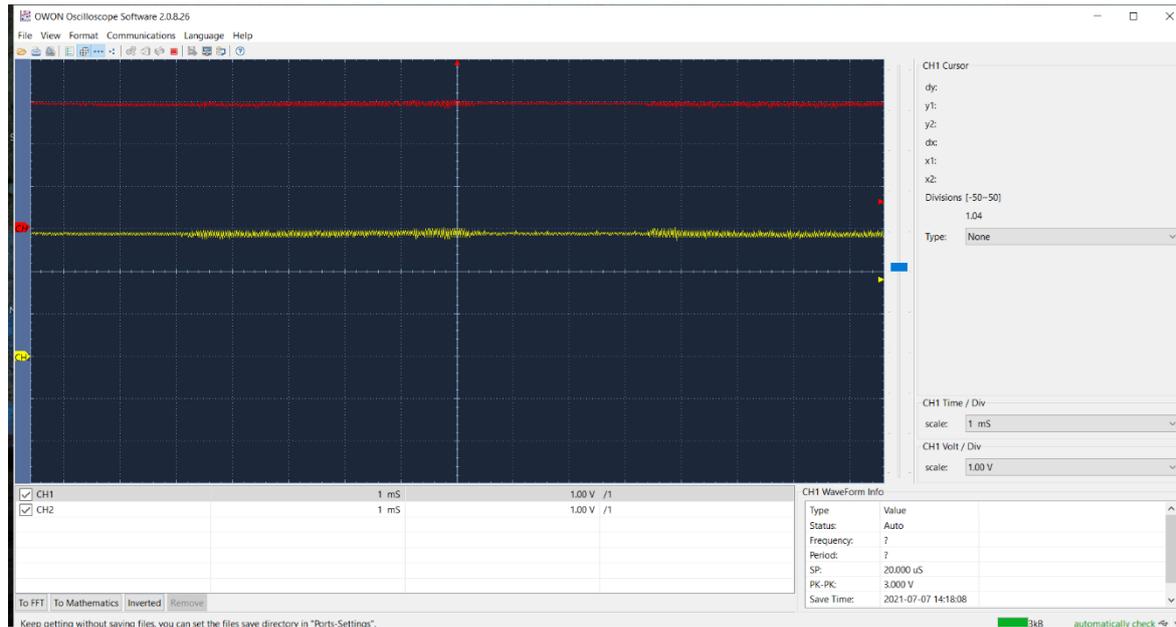


Figura 4.26: Medición de voltaje en elemento biomecánico sin carga ($V_{out} = 3V$).

Con las mismas condiciones de la pila, en la Figura 4.27 se muestra que al conectar una carga (LED) se obtuvo la misma señal de entrada de 3V (señal en rojo) y una señal de salida de 2.6V (señal en amarillo).

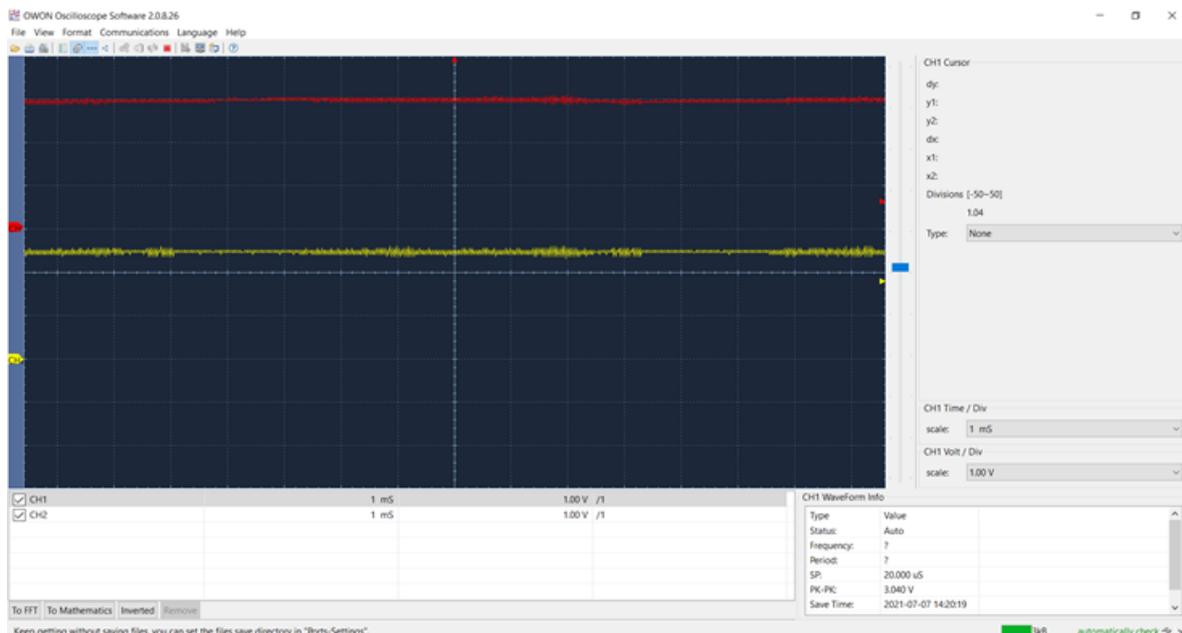


Figura 4.27: Medición de voltaje en elemento biomecánico con carga ($V_{out} = 2.6V$).

Una vez verificado y comprobado los parámetros de entrada y salida de la tarjeta de acondicionamiento de energía del elemento biomecánico, se procedió a conectar con la tarjeta de evaluación ADP5090 en el pin V_{in} como se muestra en la Figura 4.28, en

donde a la salida (pin V_{bat}) se obtuvo un voltaje de 3.14V (sin carga) y 2.91V (con carga) respectivamente.

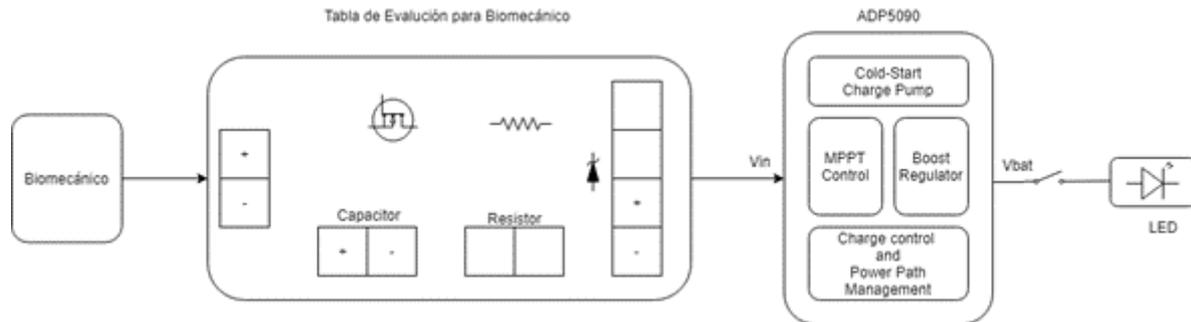


Figura 4.28: Esquema de conexión de elemento biomecánico a placa de acondicionamiento de energía y chip de harvesting.

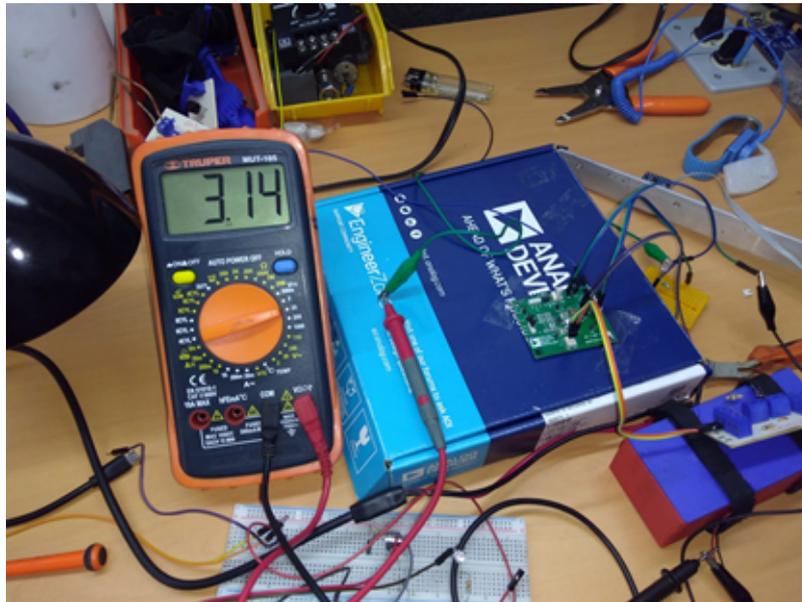


Figura 4.29: Conexión de elemento biomecánico a placa de acondicionamiento de energía y ADP5090 sin carga.

La Figura 4.29 muestra la implementación física del diagrama de la Figura 4.28 con la carga desconectada, en donde el Pin V_{bat} proporciona un voltaje de 3.14V.

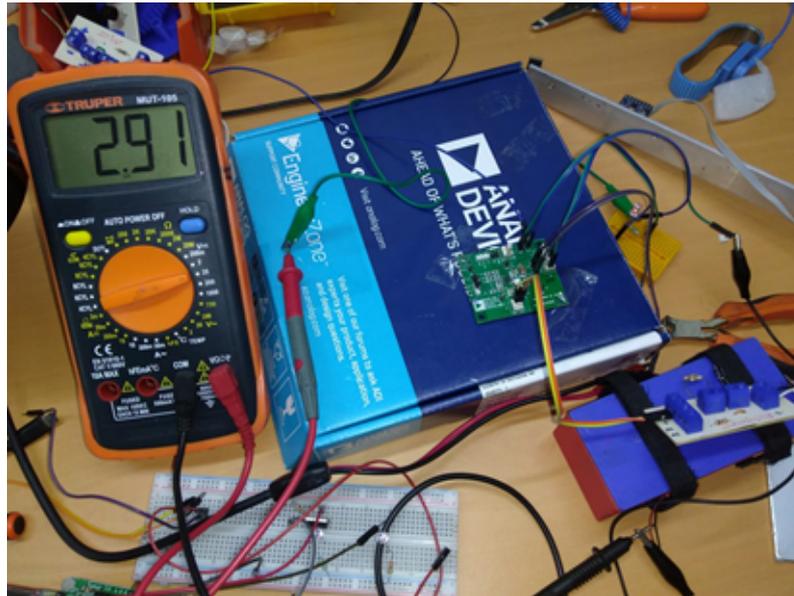


Figura 4.30: Conexión de elemento biomecánico a placa de acondicionamiento de energía y ADP5090 con carga.

La Figura 4.30 también muestra la implementación física del diagrama de la Figura 4.28 pero conectando una carga (LED), en donde el pin V_{bat} proporciona un voltaje de 2.91V.

Hasta este punto como ya se tiene la caracterización de la celda solar y del elemento biomecánico, el siguiente paso es implementar un sistema en el que se pueda recolectar energía a partir de dos fuentes. Por el momento, el procedimiento que se realizó fue obtener energía directamente del elemento biomecánico (como fuente principal) ya que es el que nos proporciona energía de manera constante y mediante una lectura del convertidor ADC del microcontrolador darle prioridad a la celda solar cuando su capacitor ya pueda proveer de la energía recolectada y almacenada. El diagrama de conexión que se implementó se muestra en la Figura 4.31, se hace mención que el objetivo principal de esta prueba es recolectar energía a partir de dos fuentes utilizando el microcontrolador pic 18F4550. El control del MPPT que se utilizó por el momento es el que tiene pre-configurado la placa de evaluación ADP5090 que es para una celda solar. La Figura 4.32 muestra la implementación física del sistema que recolecta energía a partir de dos fuentes.

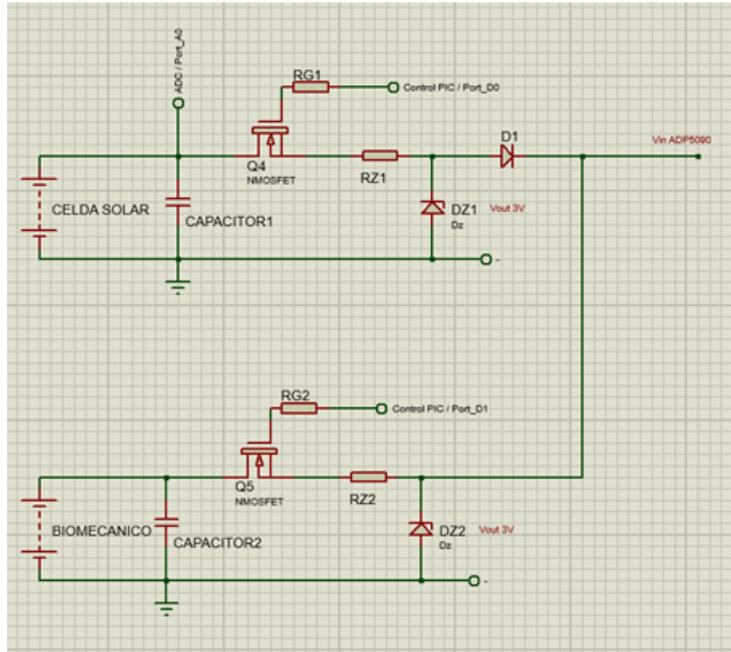


Figura 4.31: Diagrama de conexión para recolección de energía a partir de dos fuentes.

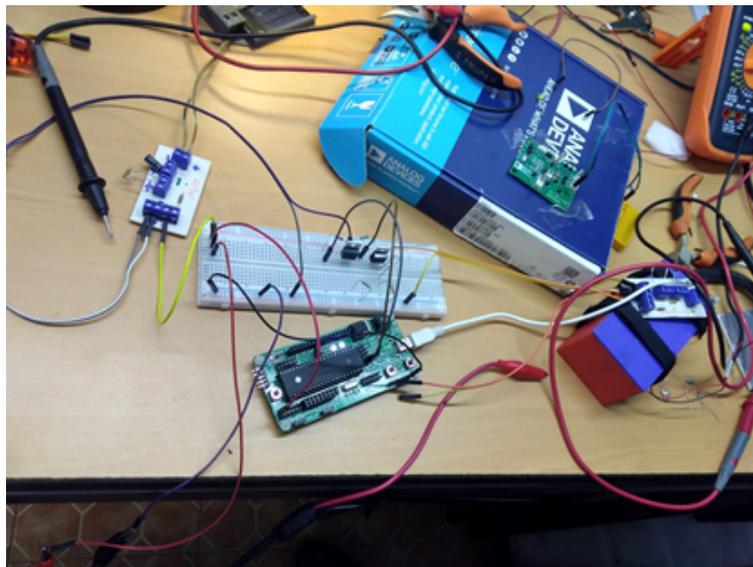


Figura 4.32: Implementación física para la recolección a partir de dos fuentes.

Como se puede observar en la Figura 4.33, mientras no se recolecte energía de la celda solar, se recolecta energía del elemento biomecánico obteniendo un voltaje en el pin V_{bat} del ADP5090 de 3.14V (con carga), mientras que en la Figura 4.34 si se recolecta energía a partir de la celda solar se desactiva el interruptor del biomecánico para darle prioridad y procesar la energía que ésta ofrece la cual es un voltaje de 1.4V (con carga) en el pin V_{bat} . Se menciona que la recolección de energía que las fuentes proporcionan es a partir de condiciones de laboratorio.



Figura 4.33: Recolección de energía a partir del elemento biomecánico.

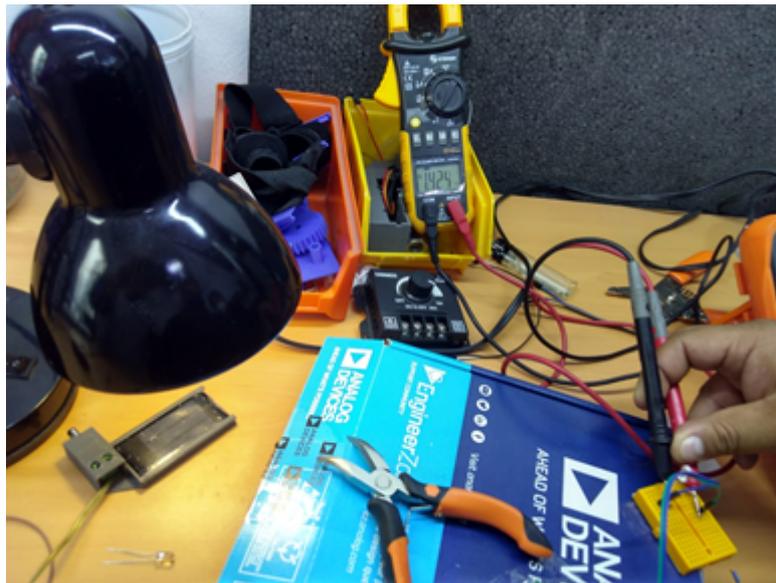


Figura 4.34: Recolección de energía a partir de la celda solar.

Para lograr esto, se implementó un código el cual se puede consultar en el apéndice A.2 y el cual funciona de la siguiente manera: El voltaje que se almacena en el capacitor de la celda solar se va a estar leyendo con ayuda del DAC de 10 bits que proporciona el pic 18F4550, debido a que el voltaje máximo para activar el transistor MOSFET es de 5V (voltaje que proporciona el pic) tiene una resolución de 1024, por lo que se establece que a partir de 1V en el capacitor de la celda solar se pueda recolectar asignando un valor de resolución de 210 y es así que cada que se detecta una tensión de umbral determinada en el capacitor de la celda solar se activa el transistor para proporcionar la energía al chip

de harvesting. El elemento biomecánico conectado en el pin D1 del microcontrolador va a estar proporcionando energía mientras no se encuentre otra fuente en función, mientras que la celda solar conectada en el pin D0 del microcontrolador va a proporcionar la energía almacenada en su capacitor cuando se lea una señal con ayuda del DAC del microcontrolador conectado en el pin analógico A0.

Con esto podemos comprobar que el circuito de la Figura 4.31 y el código en el apéndice A.2 sirven para dar prioridad a las fuentes que estén recolectando energía, eligiendo solo una a la vez ya que el chip de recolección de energía ADP5090 puede recolectar de una sola fuente y no de varias al mismo tiempo. Se menciona que mientras una fuente no esté proporcionando energía o se desactive temporalmente su interruptor, esta energía no se pierde ya que se va almacenando en un capacitor para poder ser proporcionada y procesada cuando se disponga de ella.

4.4.3. Recolección de Energía a Partir de Dos Fuentes Ajustando el MPPT

Como ya se logró la recolección de energía a partir de 2 fuentes (elemento biomecánico y celda solar) pero sin tener un control en el ajuste del MPPT de acuerdo con la fuente que esté en función, lo que se realizó en este apartado es recolectar energía pero ajustando el MPPT de acuerdo a la fuente que esté en uso y esto se puede lograr partiendo de los siguientes niveles:

1. **Selección de la fuente:** Esta selección se hace con base a la fuente que este proporcionando energía y del voltaje de la energía almacenada en su capacitor. Este proceso se hace acondicionando la señal previamente con las placas que se diseñaron.
2. **Selección del MPPT:** Se realiza seleccionando un arreglo de resistencias externas en el orden de MegaOhms ($M\Omega$) que ajustan el 50 % u 80 % del voltaje de circuito abierto (V_{oc}) en función de la fuente que esté proporcionando energía, este arreglo de resistencias evitará un consumo excesivo de corriente respectivamente.
3. **Recolección de energía:** Este proceso se lleva a cabo utilizando el chip de harvesting ADP5090 el cual contiene módulos de arranque en frío (Cold-Start) a partir de 380mV, convertidores elevadores (Boost-converter) con un rango de entrada a partir de 0.8V a 3.3v, un módulo MPPT que ajusta la frecuencia de los convertidores de acuerdo con la energía que se esté proporcionando y un módulo de administración de energía el cual proporciona de 2V a 5V a la salida.

Para realizar la selección del arreglo de resistencias que ajusta el MPPT, se propuso un circuito como el que se muestra en la Figura 4.35, en donde los valores de las resistencias se ajustan de tal manera que nos proporcionen el 50 % del V_{oc} para fuentes lineales (elemento piezoeléctrico, termoeléctrico) y el 80 % para fuentes no lineales (celda solar). Se menciona que para fines prácticos el elemento biomecánico se consideró como un elemento lineal.

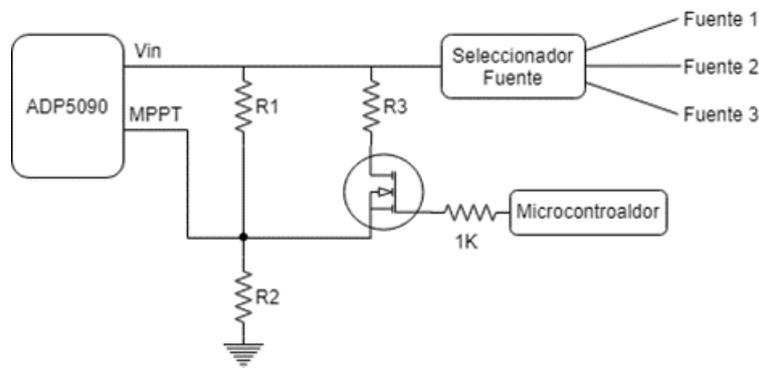


Figura 4.35: Arreglo de resistencias externas que configuran el MPPT.

La prueba se realizó con valores de resistencias de $3.9M\Omega$ para R3 y $10M\Omega$ para R1 y R2. El funcionamiento del circuito de la Figura 4.35 es: cuando el transistor MOSFET funciona como interruptor abierto, se configura R1 y R2 como divisor de tensión para obtener el 50 % del V_{oc} del elemento biomecánico o elemento piezoeléctrico y cuando el transistor funciona como interruptor cerrado, R3 entra en función haciendo una resistencia equivalente en paralelo con R1 que se configura con R2 haciendo un nuevo divisor de tensión con el que se obtiene el 78 % del V_{oc} de la celda solar. Se menciona que hasta el momento, todas las pruebas se realizaron en condiciones de laboratorio.

La Figura 4.36 muestra la implementación en físico del diagrama de la Figura 4.35, en donde el pin “Gate” del transistor mosfet IRLZ44 se conectó al puerto D en el pin 2 del microcontrolador.

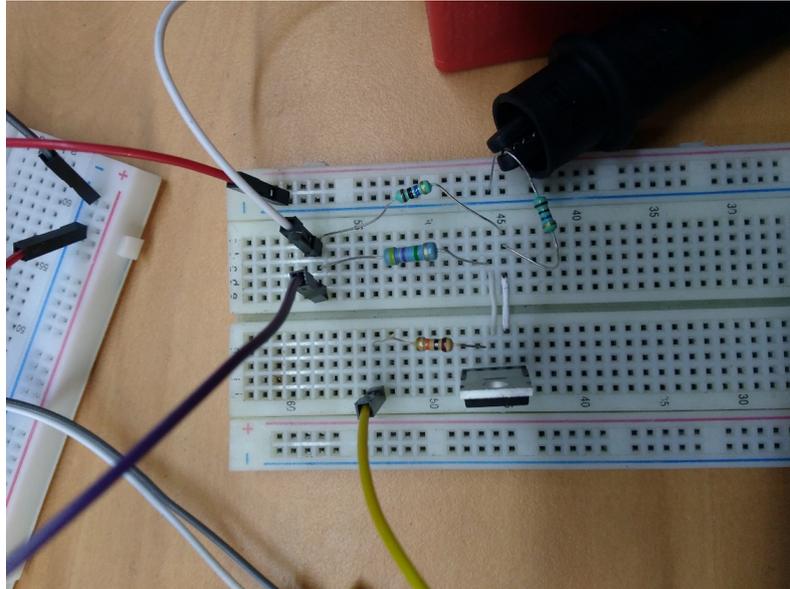


Figura 4.36: Implementación de arreglo de resistencias para ajustar el MPPT para fuentes lineales y no lineales

Una vez implementado el arreglo de resistencias que ajusta el MPPT se procedió a verificar su correcto funcionamiento utilizando dos fuentes (celda solar y elemento biomecánico).

El problema que se presentó fue el no poder medir el voltaje del MPPT, esto pudo haberse provocado debido a que en el multímetro utilizado su resistencia interna que mide el voltaje pudo haber sido alcanzada o rebasada por las resistencias de MegaOhms ($M\Omega$) que se están utilizando para el MPPT, de igual manera, no se pudo observar el voltaje del MPPT con el osciloscopio.

Se menciona que a pesar de no poder medir correctamente el voltaje del MPPT, se comprobó el correcto funcionamiento con ayuda de leds que se encuentran integrados en la tarjeta del PIC, en donde el transistor del elemento biomecánico, de la celda solar y del control MPPT se conectaron al puerto "D" en el pin 0, 1 y 2 respectivamente. Cuando el elemento biomecánico está proporcionando energía (D0), el transistor de la celda solar y del MPPT (D1 y D2) están desactivados, y viceversa, cuando la celda solar (D1) proporciona energía, el transistor MPPT (D2) se activa y el transistor del elemento biomecánico (D0) se desactiva. Dicho funcionamiento se corroboró midiendo el voltaje de activación (5V) de cada uno de los transistores de acuerdo con la descripción dada. La Tabla 4.3 muestra el criterio de activación descrito previamente para el control de los transistores MOSFET a partir del uso de 2 fuentes y control MPPT.

Fuentes		Control
BIO (D0)	PV (D1)	MPPT (D2)
1	0	0
0	1	1

Tabla 4.3: Criterio de selección de MPPT.

El código implementado con ayuda de la Tabla 4.3 es el mismo que se utilizó en el apartado anterior pero agregando un tercer transistor el cual hace el ajuste del MPPT, éste se puede consultar en el apartado de apéndice en la sección A.3. Para visualizar el correcto funcionamiento del código implementado, se realizó una simulación como se muestra en la Figura 4.37, en donde con ayuda de diodos led se nombró a cada una de las fuentes a utilizar (celda solar y biomecánico) y del control MPPT. Con ayuda de un divisor de voltaje conectado en la batería B1 se simula la energía almacenada en el capacitor de la celda solar, cuando esta energía es menor a 1V se le da prioridad al elemento biomecánico y el control MPPT se ajusta para obtener el 50 % del V_{oc} , es decir, el transistor MOSFET actúa como interruptor abierto (ver Figura 4.35). Cuando el voltaje es mayor a 1V se le da prioridad a la celda solar (Ver Figura 4.38) y el control MPPT se ajusta para obtener el 78 % del V_{oc} , es decir, el transistor MOSFET se activa y actúa como interruptor cerrado (ver Figura 4.35).

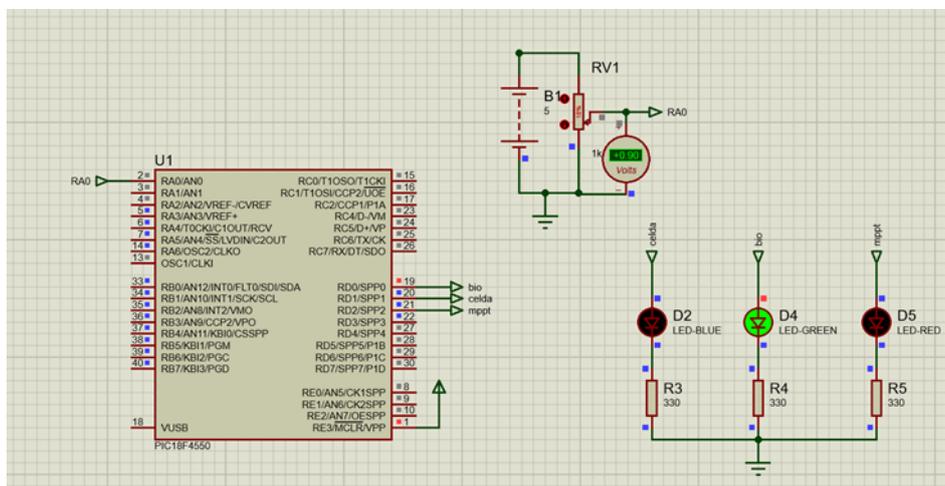


Figura 4.37: Recolección de energía de elemento biomecánico.

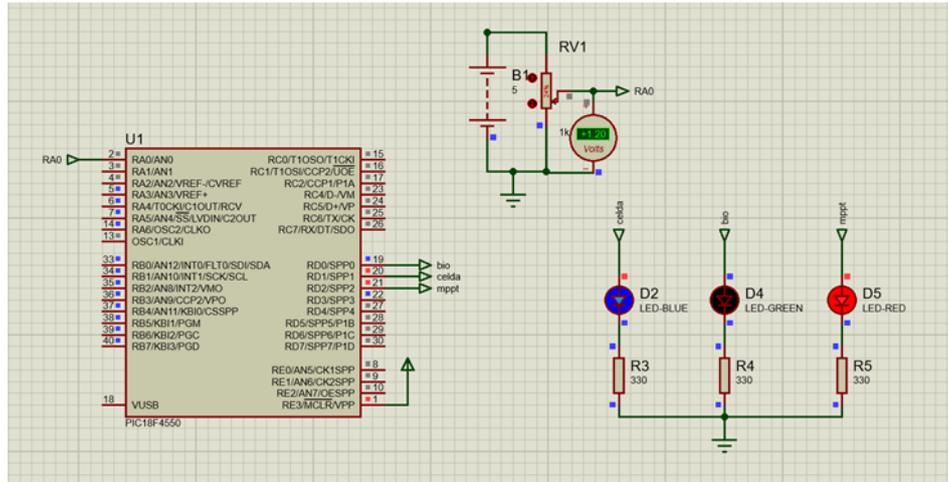


Figura 4.38: Recolección de energía de celda solar y ajuste de control MPPT.

4.4.4. Caracterización de elemento Piezoeléctrico.

Para obtener los parámetros del elemento piezoeléctrico también se utilizaron los mismos elementos de la placa de acondicionamiento de señal que se implementaron para el elemento biomecánico y la celda solar como se muestra en la Figura 4.39 , la cual limita al voltaje de salida a 3V por medio del diodo Zener y la corriente de salida a 200mA con ayuda de R_z igual a 50Ω .

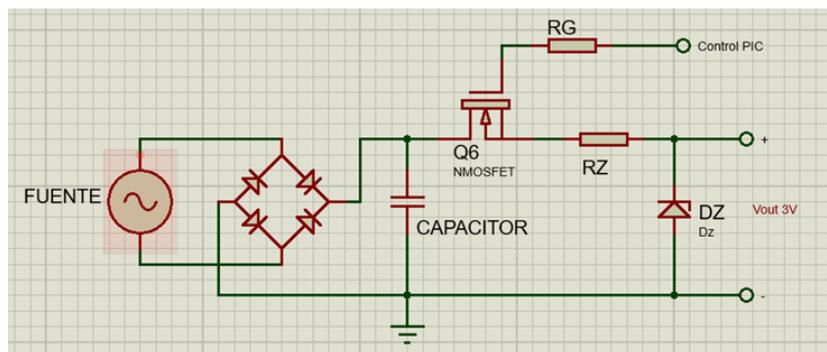


Figura 4.39: Diagrama de conexión de placa de almacén de energía para elemento piezoeléctrico.

El siguiente paso fue montar el elemento piezoeléctrico en su elemento CAD (sin utilizar ninguna masa de prueba en el extremo libre) como se muestra en la Figura 4.40 para poder posicionarlo en la parte del cuerpo para la que fue diseñada respectivamente como se muestra en la Figura 4.41.

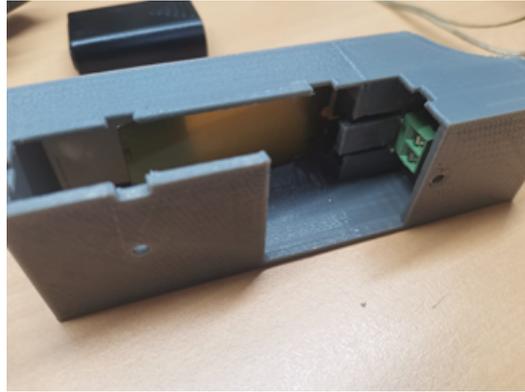


Figura 4.40: Elemento piezoeléctrico montado en elemento CAD.



Figura 4.41: Elemento piezoeléctrico posicionado a la altura de la cintura.

Las pruebas que se realizaron fueron en 3 etapas: **generando una pisada, saltando y trotando**. Los resultados que se obtuvieron fueron los siguientes:

- **Generando una pisada.**

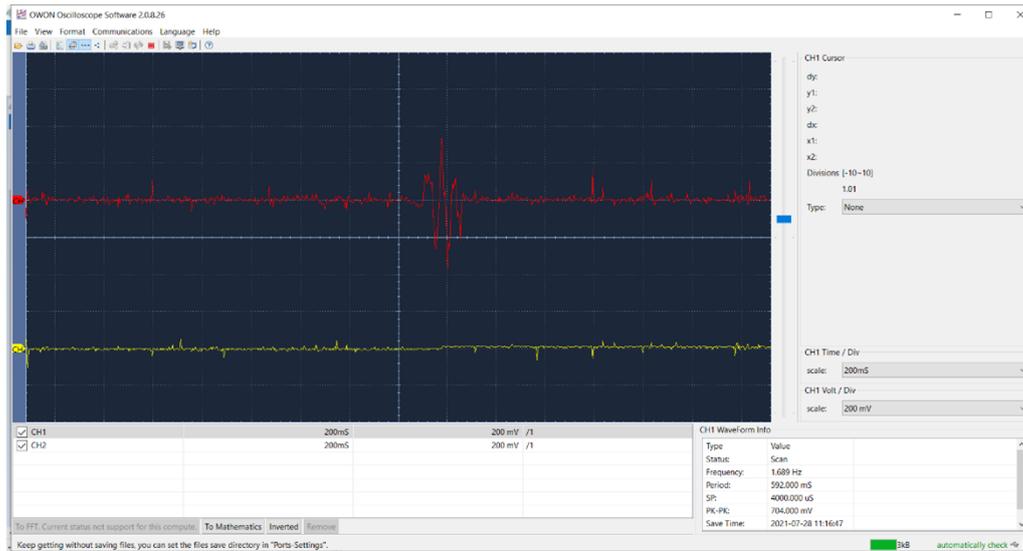


Figura 4.42: Señal generando una pisada.

La Figura 4.42 muestra que la señal obtenida a partir de una pisada es de una escala muy pequeña en el rango de miliVolts ($704mV_{ac}$) en la que prácticamente no se puede recolectar energía de acuerdo con las características del elemento piezoeléctrico en uso.

■ Saltando

- *Saltando una vez*

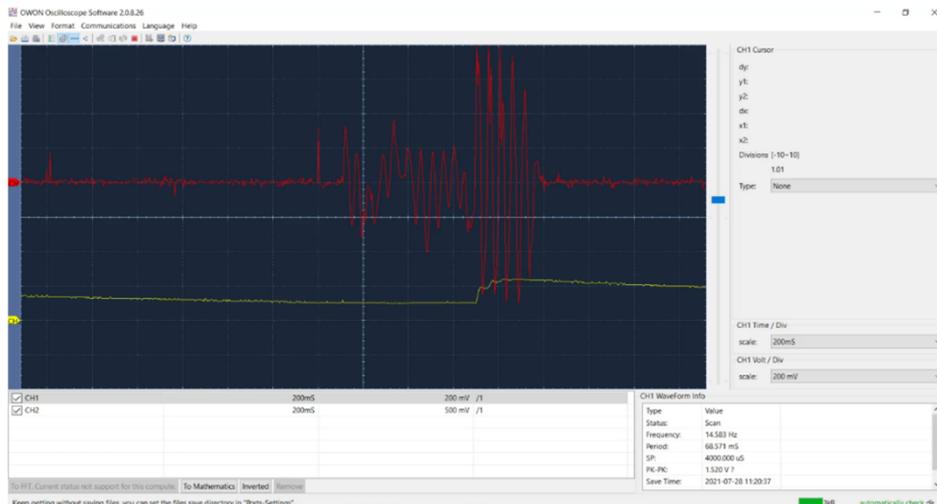


Figura 4.43: Señal generada a partir de un brinco.

La Figura 4.43 muestra la señal que generó el elemento piezoeléctrico a partir de un brinco la cual tiene un voltaje pico a pico aproximado de $1.5V_{ac}$ (Señal en rojo) y una vez rectificado y almacenado corresponde a 600 mV aproximadamente (Señal en amarillo).

- *Saltando continuamente*

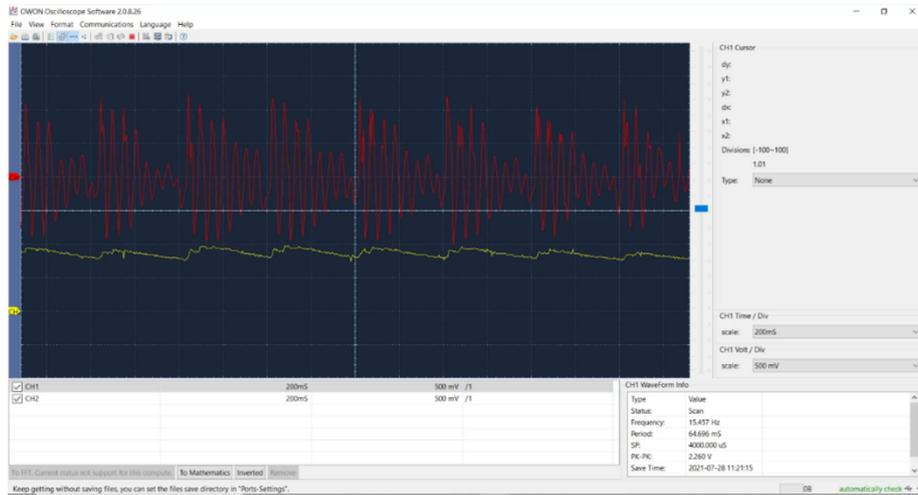


Figura 4.44: Señal generada a partir de brincos continuos.

La Figura 4.44 muestra que a partir de saltos continuos, el elemento piezoeléctrico proporciona un voltaje pico a pico de $2.2V_{ac}$ con una frecuencia de alrededor de 17Hz (Señal en rojo), una vez rectificada y almacenada esta señal, se obtiene un voltaje de alrededor 900mV, esto se debe a que gracias a los saltos continuos, el elemento piezoeléctrico se mantiene en vibración constante con la cual puede proporcionar una señal mucho mayor con respecto a la señal que se genera a partir de una pisada o de un solo salto.

■ Trotando

La Figura 4.45 presenta la señal que se obtuvo cuando la persona se encuentra trotando, el voltaje que produce aproximadamente el elemento piezoeléctrico fue de $2.4V_{ac}$ (Señal roja), la señal rectificada corresponde a un valor de 900mV respectivamente. Al igual que la Figura 4.44, esto se debe a que el elemento piezoeléctrico se encuentra en constante vibración proporcionando una energía mucho mayor.

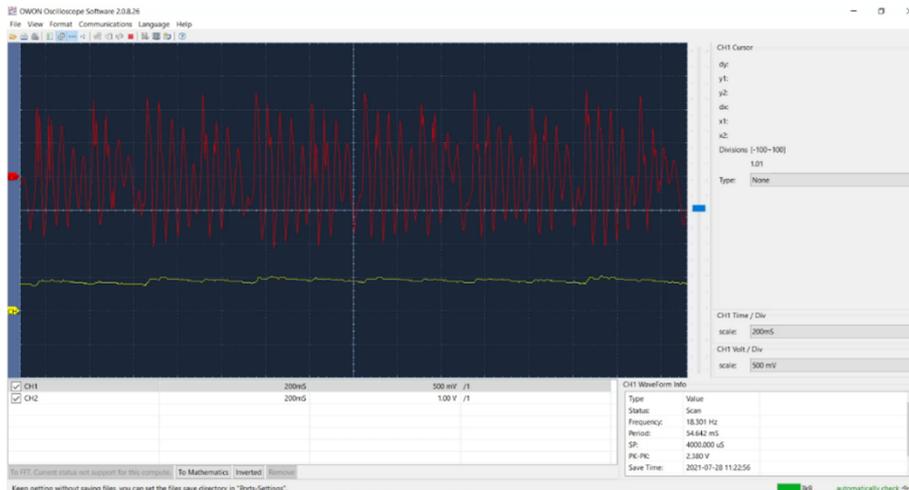


Figura 4.45: Señal generada cuando se trota o corre.

■ **Voltaje MPPT de elemento piezoeléctrico.**

Debido al problema presentado en el apartado anterior de no poder medir el voltaje MPPT para la celda solar y el elemento biomecánico utilizando un arreglo de resistencias como divisor de tensión con valores en el orden de megaOhms ($M\Omega$); para el elemento piezoeléctrico se procedió a realizar una serie de mediciones utilizando diferentes valores de resistores. El diagrama que se utilizó para conectar este arreglo de resistencias que calcula el MPPT se puede observar en la Figura 4.46.

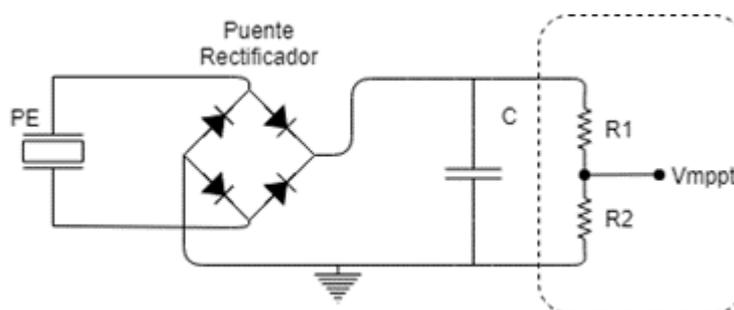


Figura 4.46: Arreglo de resistencias para obtener el 50 % del V_{oc} del elemento piezoeléctrico.

La primera medición que se realizó fue utilizando $R1$ y $R2$ de $10M\Omega$. La Figura 4.47 muestra que el voltaje del elemento piezoeléctrico corresponde a $1.2V_{oc}$ (Señal roja) y la Figura 4.48 muestra que el voltaje correspondiente al MPPT (señal en amarillo) es alrededor de $100mV$, lo cual no corresponde al 50 % del V_{oc} que se espera.



Figura 4.47: Voltaje rectificado de elemento piezoeléctrico de 1.2V (señal roja) utilizando R1 y R2 de 10MΩ. Datos del canal CH1.

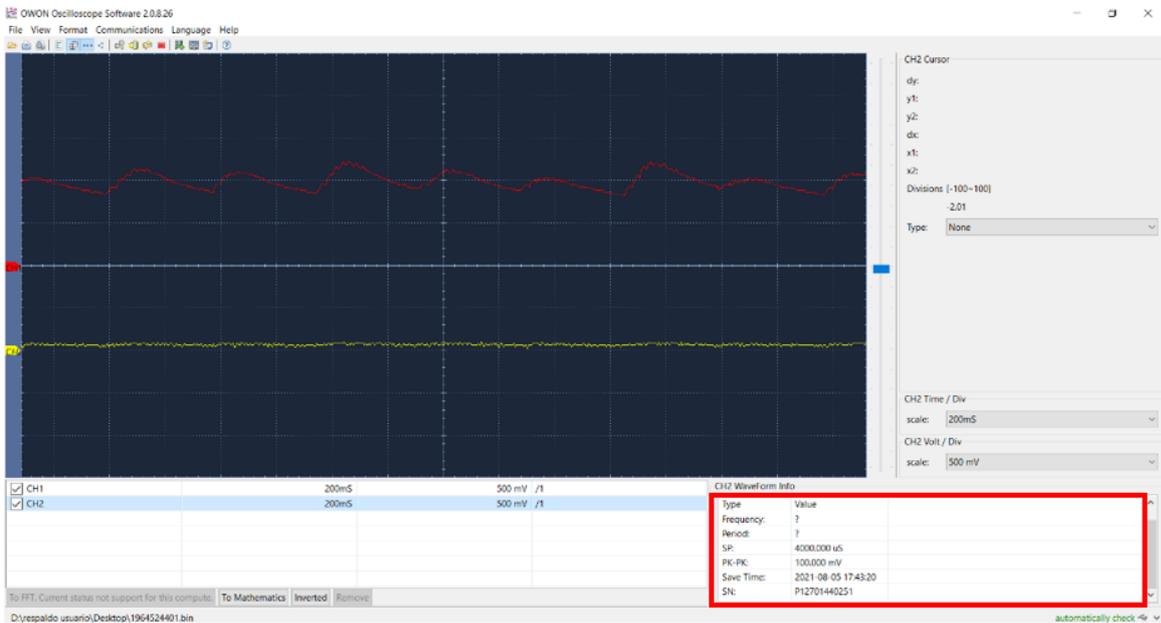


Figura 4.48: Voltaje MPPT de 100mV (Señal amarilla) utilizando R1 y R2 de 10MΩ. Datos del canal CH2.

Se considera que debido al tamaño relativamente grande de las resistencias utilizadas para el ajuste del MPPT, no nos permite hacer una lectura adecuada y correcta utilizando el osciloscopio o el multímetro, ya que la resistencia interna del multímetro que mide el voltaje o la resistencia de las puntas del osciloscopio son alcanzadas por estas resistencias externas, repercutiendo en la medición del voltaje MPPT.

La siguiente prueba es reemplazar las resistencias de $10\text{M}\Omega$ por resistencias de $10\text{K}\Omega$. Los resultados que se obtuvieron se muestran en la Figura 4.49 y 4.50, en donde se observa que el voltaje rectificado del elemento piezoeléctrico correspondió alrededor de 400mV (señal roja) y el voltaje MPPT corresponde alrededor de 200mV (señal amarilla) respectivamente, lo cual tiene una correlación del 50% del V_{oc} esperado. Esta reducción de energía se debe a que las resistencias en el orden de Kilo-Ohms ($\text{K}\Omega$) tienen un consumo de energía, es decir, tienen un voltaje y una corriente determinada, por lo que el divisor de tensión es visto como una carga que demanda una determinada potencia.

Una vez verificado y comprobado los parámetros de salida que el elemento piezoeléctrico proporciona, se optó por utilizar el arreglo de resistencias de $10\text{M}\Omega$ ya que son valores sugeridos por la hoja de datos del chip de *energy harvesting*, procediendo a conectar el elemento piezoeléctrico con la tarjeta de acondicionamiento de energía y el chip ADP5090 en el pin V_{in} y el arreglo de resistencias en el pin MPPT como se muestra en la Figura 4.51.

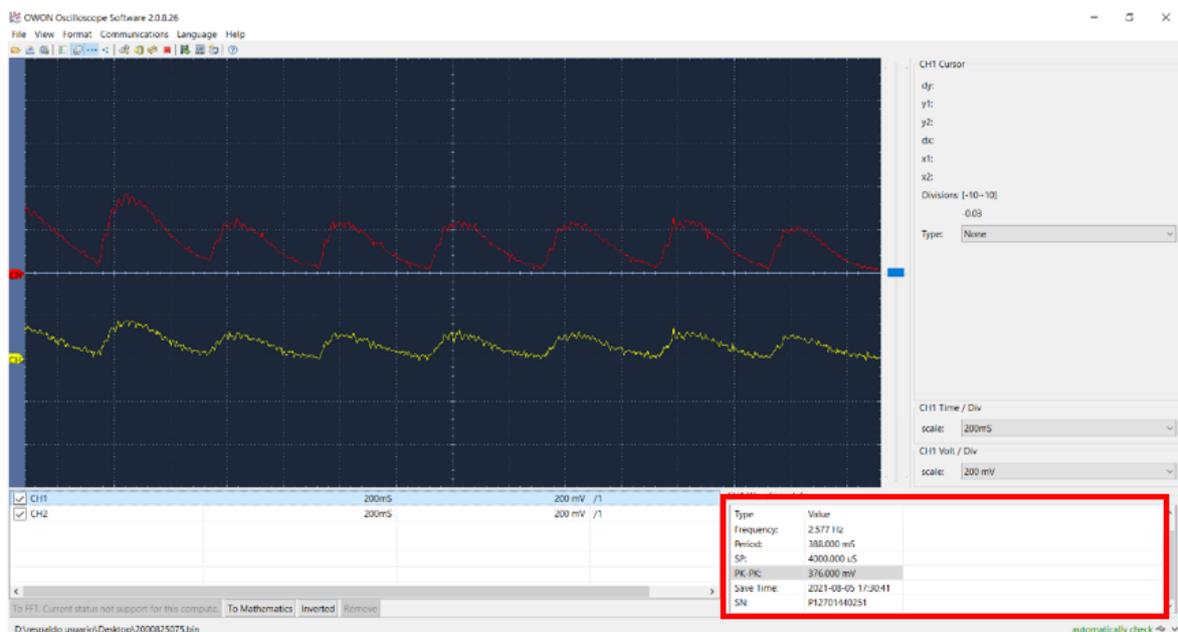


Figura 4.49: Voltaje rectificado de elemento piezoeléctrico de 376mV (Señal roja) utilizando $R1$ y $R2$ de $10\text{K}\Omega$. Datos del canal CH1.



Figura 4.50: Voltaje MPPT de 184mV (Señal amarilla) utilizando R1 y R2 de 10K Ω . Datos del canal CH2

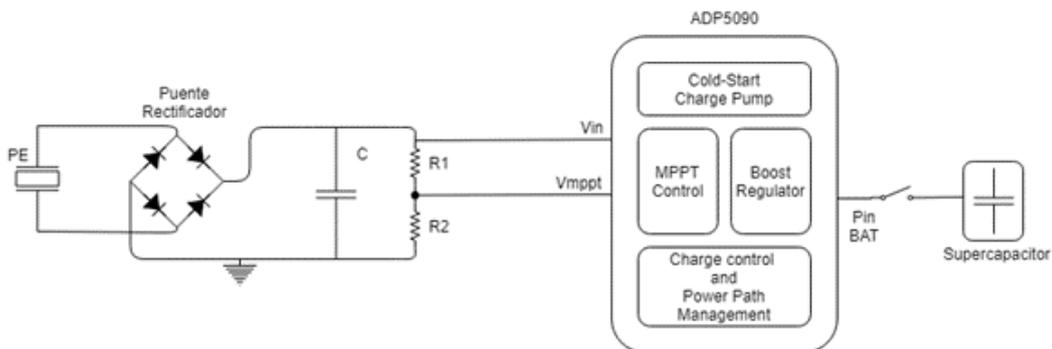


Figura 4.51: Conexión de elemento piezoeléctrico y resistencias MPPT a chip de recolección ADP5090.

Las mediciones que se tomaron en el pin BAT cuando se conectó el dispositivo de almacenamiento (supercapacitor) fueron en el rango de miliVolts (mV) con valores de 270mV, 430mV, 500mV y 700mV. Se menciona que la recolección de energía proveniente del elemento piezoeléctrico fue en un tiempo bastante prolongado.

■ Ajuste De Control MPPT Para Celda Solar Y Elemento Biomecánico Con Variación De Resistencias

Una vez caracterizado el elemento piezoeléctrico y realizar diferentes pruebas para el ajuste de control MPPT con resistencias de diferente valor, también se procedió a verificar

el correcto funcionamiento en el ajuste del MPPT para la recolección de energía a partir de dos fuentes utilizando el diagrama que se muestra en la Figura 4.52. Al realizar las conexiones, no se obtuvo un resultado favorable, ya que cuando el elemento biomecánico proporciona energía ésta se dirige también hacia la celda solar, por lo que se procedió a conectar un diodo en ésta, como se muestra en la Figura 4.53, para evitar un flujo de corriente inversa cuando el elemento biomecánico proporcione energía.

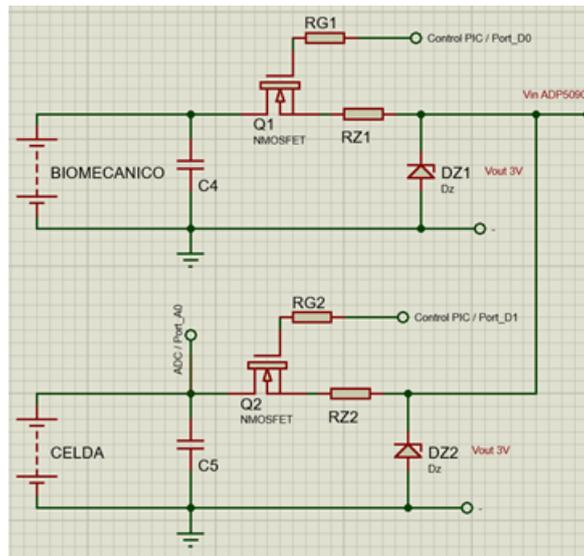


Figura 4.52: Diagrama de conexión para dos fuentes.

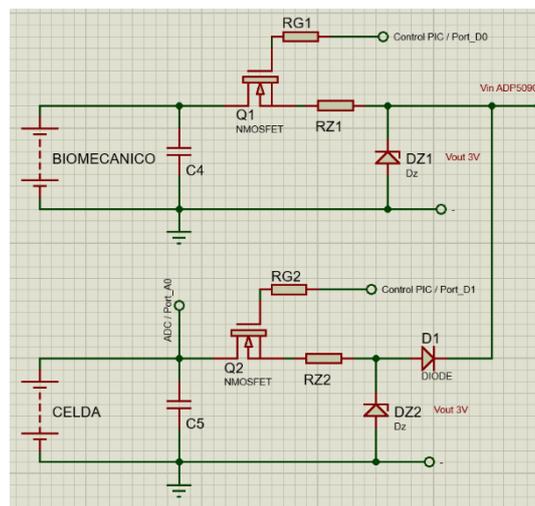


Figura 4.53: Adición de diodo rectificador en celda solar para evitar un flujo de corriente inversa.

- Control MPPT con $R1=R2=10M\Omega$ y $R3=3.9M\Omega$
- Elemento biomecánico.

Como se muestra en la Figura 4.54, en el inciso a) se aprecia la conexión en físico del arreglo de las resistencias que ajustan el control MPPT al 50 % del V_{oc} , en el inciso b) con ayuda de los led integrados en la tarjeta de entrenamiento se observa cuando el μC da prioridad al elemento biomecánico y en el inciso c) y d) se observa la lectura tanto del voltaje V_{in} como del V_{MPPT} .

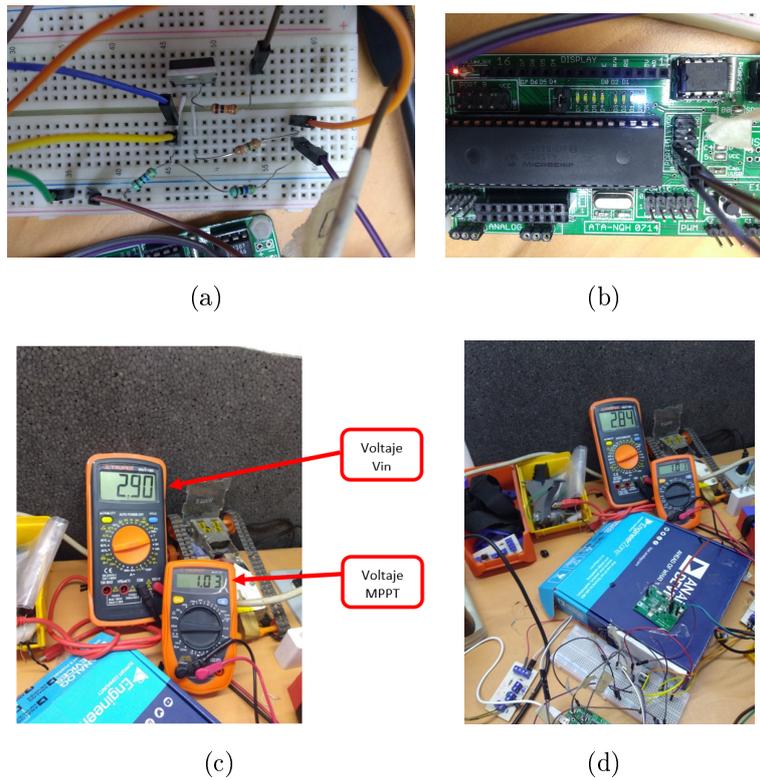


Figura 4.54: Control MPPT con resistencias en el orden de $M\Omega$ para elemento biomecánico.

- **Celda solar**

En la Figura 4.55, en el inciso a) se aprecia con ayuda de los led integrados en la tarjeta de entrenamiento del μC cuando la celda solar proporciona su energía activándose por consecuencia el control MPPT que ajusta el 78 % del V_{oc} y en el inciso b) y c) se observa la lectura del voltaje V_{in} y el V_{MPPT} .

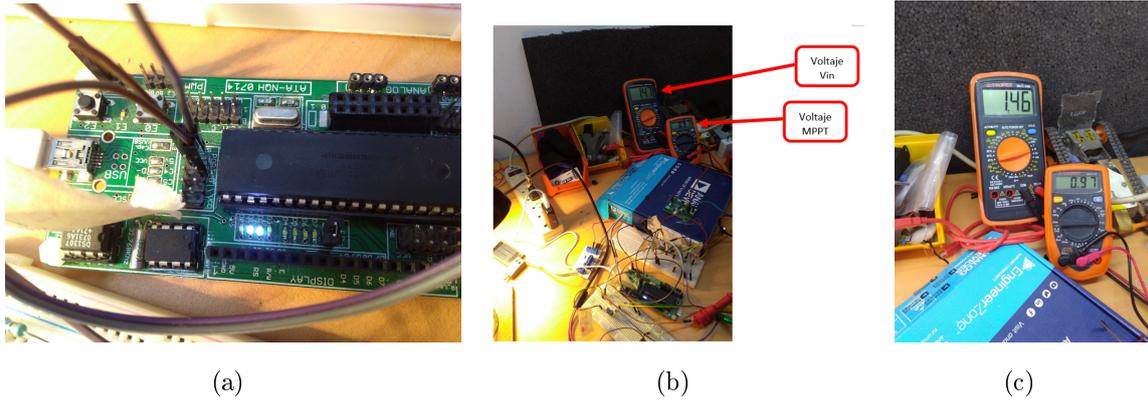


Figura 4.55: Control MPPT con resistencias en el orden de $M\Omega$ para celda solar.

■ Control MPPT con $R_1=R_2=10K\Omega$ y $R_3=3.9k\Omega$

● Elemento biomecánico.

Realizando la misma prueba con resistencias en el orden de $k\Omega$, se observa nuevamente en el inciso a) de la Figura 4.56 que el μC da prioridad al elemento biomecánico y en el inciso b) y c) se obtiene la lectura del voltaje V_{in} y el V_{MPPT} que se ajusta al 50 % del V_{oc} .

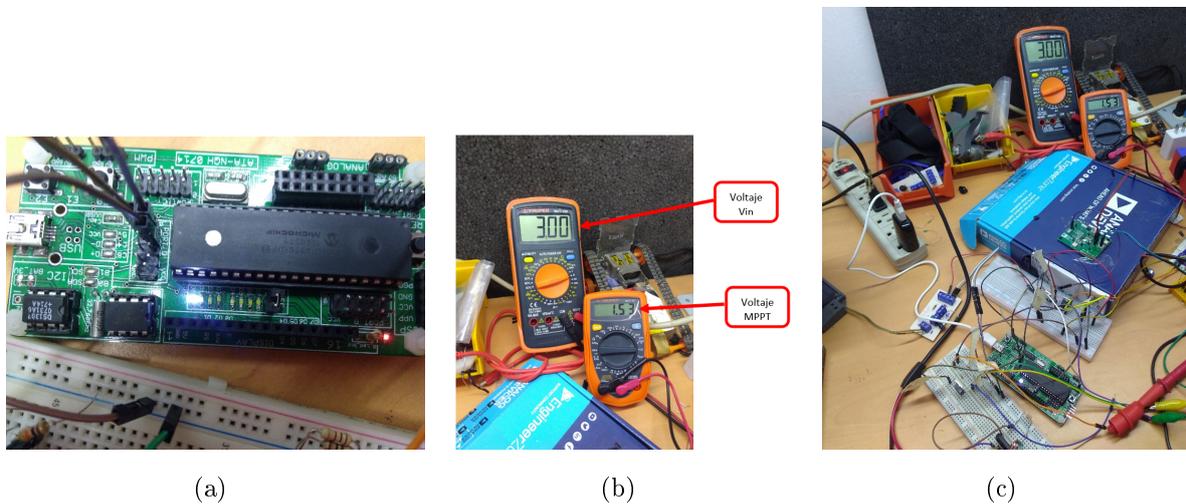


Figura 4.56: Control MPPT con resistencias en el orden de $K\Omega$ para elemento biomecánico.

● Celda solar

Para la celda solar, con resistencias en el orden de $K\Omega$ como se muestra en el inciso a) de la Figura 4.57, en el inciso b) se observa como se da prioridad con el μC a ésta y al control MPPT, y en el inciso c) y d) se observan los voltajes de V_{in} y V_{MPPT} que se ajusta al 78 % del V_{oc} .

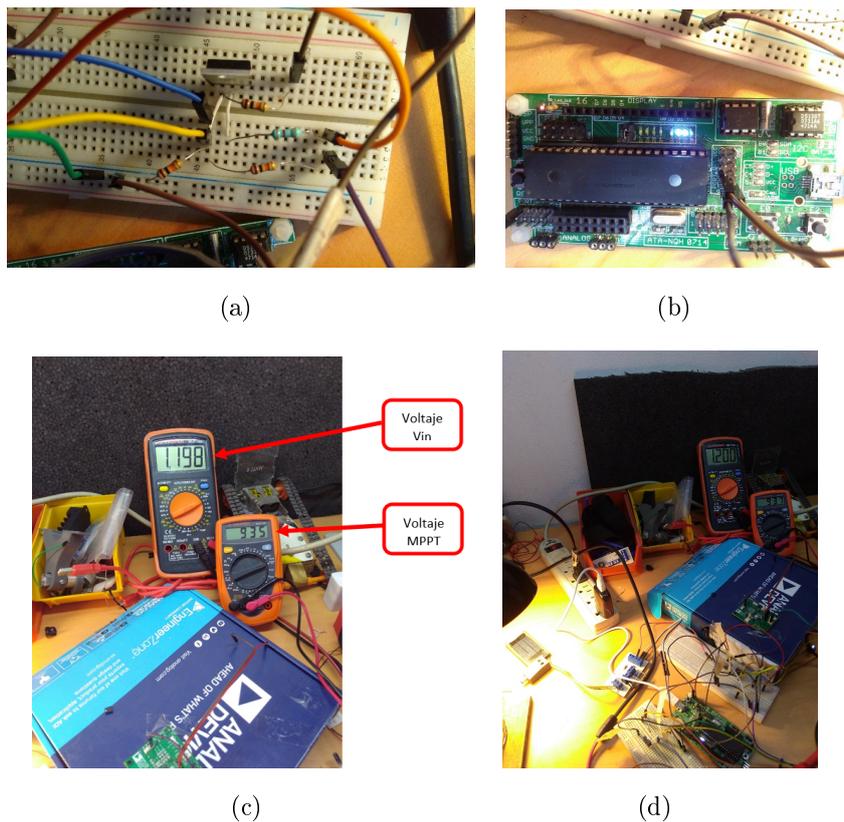


Figura 4.57: Control MPPT con resistencias en el orden de $K\Omega$ para celda solar.

MEDICIÓN DE VOLTAJE REGULADO de 3.5V EN EL PIN BAT DEL CHIP ADP5090.

Resistencia	Voltaje
330 Ω	2.9V-0.97V
460 Ω	3V-1.34V
1K Ω	3V-2.7V
4.7K Ω	3.43V
10K Ω	3.43V
33K Ω	3.43V
68K Ω	3.44V
100K Ω	3.45V
10M Ω	3.44V

Tabla 4.4: voltaje de salida regulado.

Como se muestra en la Tabla 4.4, el voltaje en el pin bat del chip de harvesting ADP5090 se regula ante la variación de cargas. Esta prueba se realizó solo con el fin de conocer si el voltaje es regulado o no.

4.4.5. Cosecha de Energía - Buscando Alternativas

Para evitar el uso de diodos adicionales con el uso de transistores MOSFET en el sistema de recolección de energía que previenen un flujo de corriente inversa, se buscaron alternativas siendo una de ellas el uso de transistores BJT, específicamente la matrícula MPSA13, los cuales son transistores NPN que tienen una configuración Darlington en un solo encapsulado. La principal razón por la que se eligió este tipo de transistor se debe a que se puede controlar con corrientes muy pequeñas, es decir, permite controlar corrientes de gran magnitud con corrientes de base muy pequeñas. La estructura interna del transistor MPSA13 se puede observar en la Figura 4.58, en donde el pin “base” se conectó el microcontrolador, al pin “colector” se conectó la fuente y en el pin “emisor” se conectó la entrada V_{in} del chip de recolección de energía ADP5090.

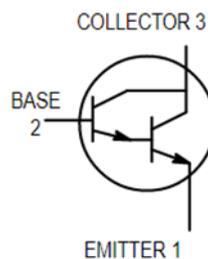


Figura 4.58: Estructura interna del transistor MPSA13.

La prueba que se realizó utilizando este tipo de transistor para recolectar energía a partir de dos fuentes (celda solar y elemento biomecánico) se basa en la conexión que se muestra en el diagrama de la Figura 4.59. La conexión realizada físicamente se muestra en la Figura 4.60, en donde desafortunadamente no se obtuvo un resultado favorable, ya que con ninguna de las fuentes suministrando energía se pudo recolectar a ésta.

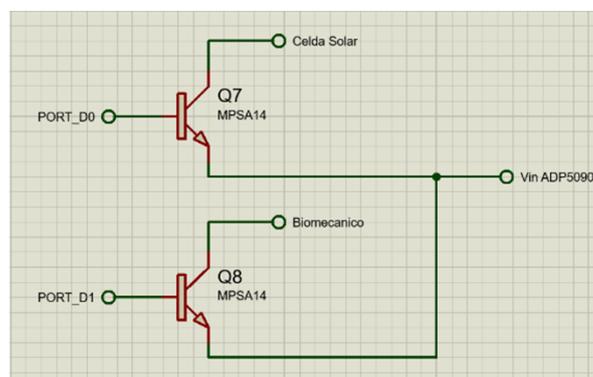


Figura 4.59: Recolección de energía a partir de 2 fuentes (celda solar y elemento biomecánico).

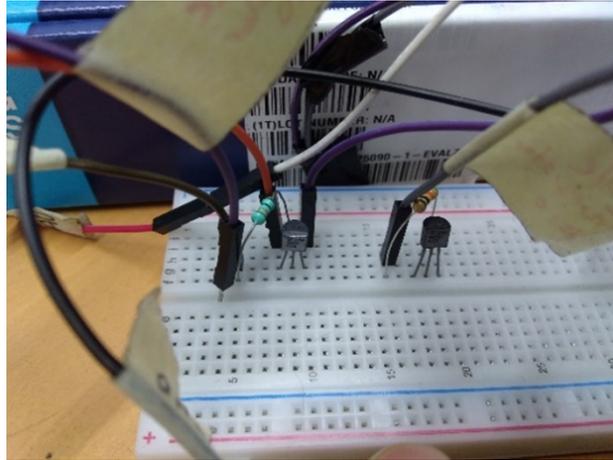


Figura 4.60: Conexión utilizando transistores BJT MPSA13.

Otra alternativa fue utilizar fototransistores, los cuales pertenecen a la familia de optoacopladores debido a que una de sus ventajas es que se consigue un aislamiento eléctrico entre los circuitos de entrada y salida, siendo esta una razón de que no exista ningún camino de conducción entre ambos circuitos, eliminando así la implementación de diodos para evitar un flujo de corriente inverso. Además, un fototransistor es un dispositivo que es más sensible a la luz que un fotodiodo y tiene compatibilidad con los circuitos digitales de un microprocesador. La Figura 4.61 muestra la estructura interna de un fototransistor.

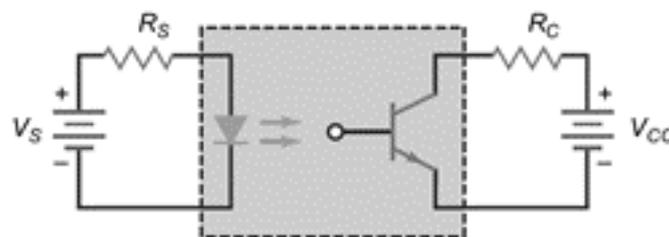


Figura 4.61: Estructura interna de un fototransistor.

La conexión que se realiza para intentar recolectar energía utilizando fototransistores se muestra en el diagrama de la Figura 4.62. Las conexiones realizadas se pueden observar en la Figura 4.63, en donde por el momento solo se están utilizando dos fuentes. Para el control del MPPT también se utiliza un fototransistor.

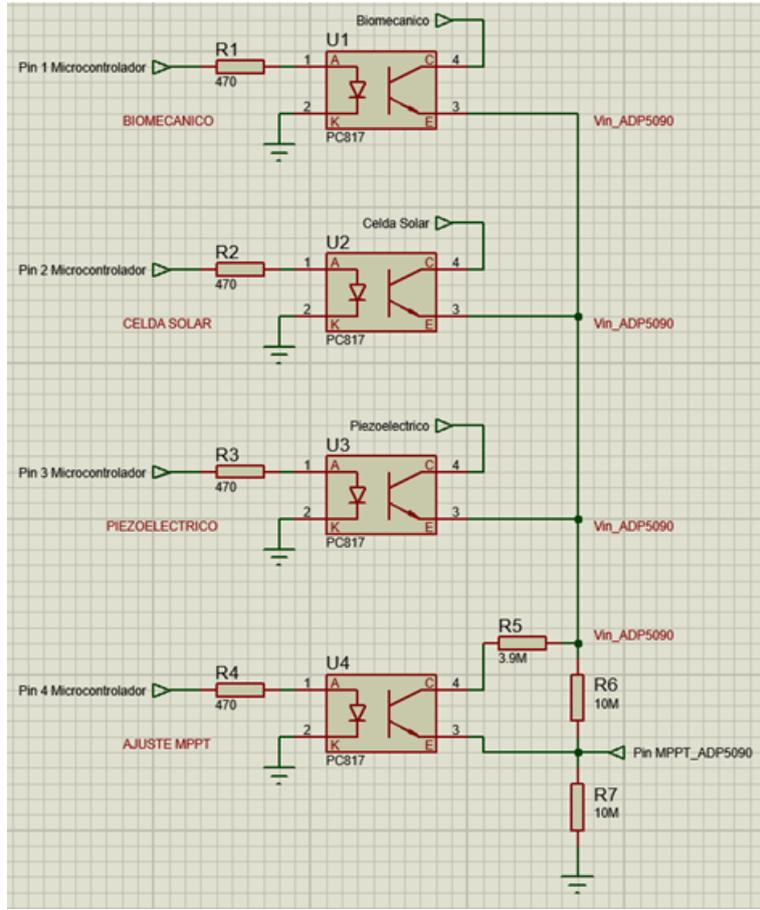


Figura 4.62: Diagrama de conexión de fototransistores.

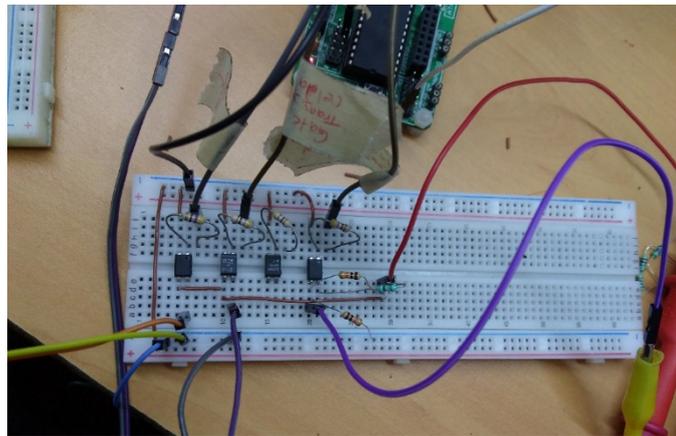


Figura 4.63: Implementación de fototransistores para la recolección de energía.

Las pruebas que se realizaron utilizando dos fuentes de energía son: (elemento piezoeléctrico & celda solar) y (piezoeléctrico & elemento biomecánico). Se menciona que al no utilizar diodos para evitar un flujo de corriente inverso, no se tiene un consumo de energía extra, lo cual hace más eficiente al sistema en la recolección de esta.

Para resolver el problema de lectura del voltaje MPPT utilizando resistencias en el rango de $M\Omega$, se implementa un seguidor de voltaje con ayuda de un amplificador operacional (OPAM) como se muestra en la Figura 4.64. La matrícula del OPAM es LM358 debido a que su alimentación puede ser a partir de una fuente con un rango de voltaje de 3V a 32V. La configuración del OPAM LM358 se puede observar en la Figura 4.65.

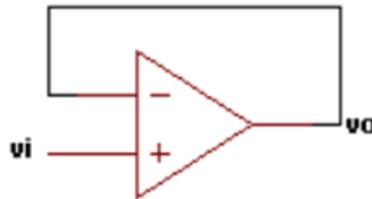


Figura 4.64: Diagrama seguidor de voltaje.

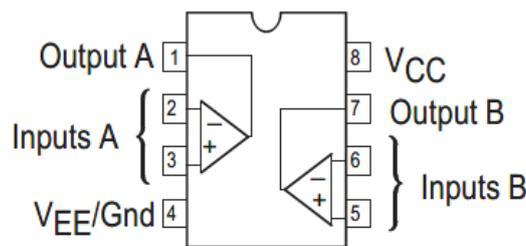


Figura 4.65: Configuración OPAM LM358.

La razón por la que se hace uso de un seguidor de voltaje es porque el voltaje de salida es el mismo al de la entrada. Al presentar la ventaja de tener una alta impedancia de entrada (en el orden de $M\Omega$) toma una cantidad mínima de corriente garantizando una baja potencia de entrada que a su vez garantiza que esta señal de entrada no se distorsione al conectarse al pin no inversor y además quede en su totalidad en la impedancia de entrada.

La salida del circuito será la misma que la de la entrada debido a la falta de resistencia de retroalimentación. Al presentar una muy baja impedancia de salida (por el orden de Ω) se garantiza que haya una transferencia total de potencia a una resistencia de carga (R_L). Por esta razón al OPAM seguidor también se le conoce como *buffer* o *amplificador de ganancia unitaria* y se usa para acoplar impedancias.

Como se observa en la Figura 4.66, al implementar el seguidor de voltaje y al realizar la medición cuando el elemento piezoeléctrico proporciona energía, se obtiene un voltaje rectificado de 1.06V y un voltaje MPPT de 0.55V el cual corresponde al 50 % del V_{oc} .



Figura 4.66: Medición de voltaje MPPT en elemento piezoeléctrico implementando seguidor de voltaje.

Al extraer energía del elemento biomecánico, se realizó nuevamente la medición con el seguidor de voltaje implementado obteniendo como voltaje de entrada 3V y voltaje MPPT 1.59V el cual corresponde al 50 % del V_{oc} . La Figura 4.67 muestra las mediciones que se obtuvieron en el elemento biomecánico.



Figura 4.67: Medición de voltaje MPPT en elemento biomecánico.

Por último, se realizaron mediciones cuando la celda solar proporciona energía utilizando el seguidor de voltaje, en donde a la entrada se obtiene un voltaje de 1.79V y a la salida un voltaje de 1.43V el cual corresponde al 80 % del V_{oc} que se configura con el arreglo de resistencias implementado. Las mediciones se pueden observar en la Figura 4.68.



Figura 4.68: Medición de voltaje MPPT en fotocelda implementando seguidor de voltaje.

Como se puede observar, al implementar el uso de optoacopladores para la recolección de energía se obtuvieron mejores resultados, ya que al tener un total aislamiento eléctrico entre la entrada y la salida nos evita el uso de diodos para evitar un flujo de corriente inverso en los transistores MOSFET que se utilizan como interruptores para el control de las fuentes de energía, del mismo modo al no tener diodos conectados no hay una caída de tensión a través de ellos, evitando así un consumo adicional de energía que hace ineficiente al sistema de cosechamiento de energía. Se hace mención que al utilizar fototransistores nos permite tener una mejor recolección de energía mejorando así la eficiencia del sistema.

4.5. Desarrollo Del Sistema de Cosecha de Energía Con Optoacopladores PC817

Durante el desarrollo en el proyecto “recolección de energía a partir de 3 fuentes” al tener todas las fuentes caracterizadas experimentalmente para saber el tipo de señal que van a proporcionar cuando se encuentren en su entorno, se procedió a realizar un control de administración de energía utilizando la configuración “PowerOring” como se muestra en la Figura 4.69(a) en donde se pueden utilizar 2 o más fuentes que proporcionen energía. Esta configuración tiene una desventaja, la cual es la siguiente: Cuando una fuente está generando energía mucho mayor que las demás, ésta no permitirá que el resto proporcionen su energía sino hasta que sea menor, por lo que se puede considerar como una pérdida de energía en las otras fuentes, es decir, en esta configuración solo predominara la fuente que este proporcionando energía mucho mayor que las del resto.

Para evitar este inconveniente, los diodos que utiliza la configuración PowerOring se

sustituyen por fototransistores pertenecientes a la familia de los optoacopladores como se muestra en la Figura 4.69(b), esto se hace para dar prioridad a cada una de las fuentes (con ayuda de un microcontrolador) cuando estén proporcionando energía y con base al voltaje de la energía almacenada en su condensador; consiguiendo así un mejor aprovechamiento en la recolección de energía.

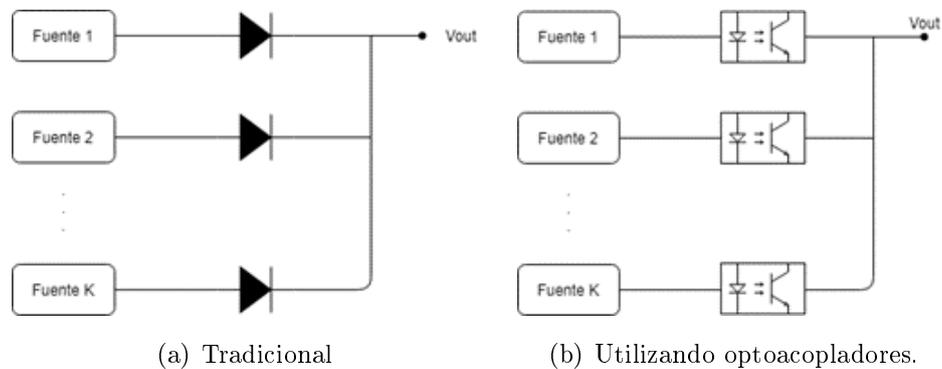


Figura 4.69: Configuración PowerOring para la recolección de energía.

La conexión que se procedió a realizar utilizando las 3 fuentes (biomecánico, celda solar y piezoeléctrico) se muestra en el diagrama de la Figura 4.70 en donde se hizo uso de fototransistores con matrícula PC817; acondicionando previamente su señal para no exceder el voltaje y potencia de entrada del chip de recolección de energía ADP5090.

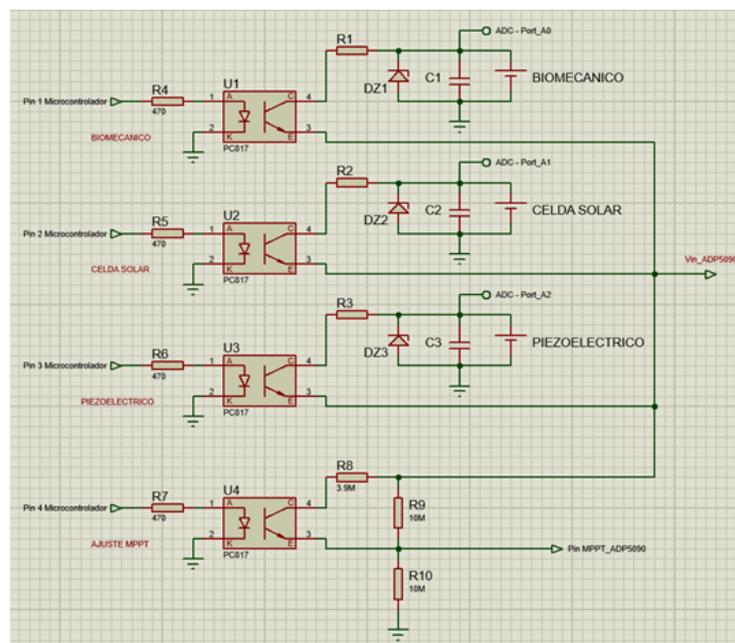


Figura 4.70: Configuración PowerORing utilizando fototransistores PC817 para la recolección de energía a partir de 3 fuentes.

Se menciona que el capacitor C1, C2 y C3 se encargara de almacenar la energía reco-

lectada de cada una de las fuentes que se están utilizando y del mismo modo con ayuda del microcontrolador PIC 18F4550, utilizando su recurso del convertidor analógico-digital, hacer una lectura del voltaje de la energía almacenada en cada uno de ellos para procesar después con ayuda del chip de energy harvesting (ADP5090) la energía de la fuente que esté proporcionando en ese momento. En la Tabla 4.5, se pueden observar todas las posibles combinaciones de acuerdo con el número de fuentes que se están utilizando (consideradas como ENTRADAS ANALÓGICAS), de la misma manera, se puede observar la discriminación que se considera de acuerdo con la fuente o fuentes que estén proporcionando energía en ese momento (consideradas como SALIDAS DIGITALES).

ESTADO	ENTRADAS ANALÓGICAS			SALIDAS DIGITALES				GRUPOS ESTADOS
	Fuentes			Fototransistores				
	AN2	AN1	AN0	D1	D2	D0	D4	
	S_FV	S_PE	S_BIO	T1_FV	T2_PE	T3_BIO	T_MPPT	
00	0	0	0	0	0	1	0	A
01	0	0	1	0	0	1	0	A
02	0	1	0	0	1	0	0	B
03	0	1	1	0	1	0	0	B
04	1	0	0	1	0	0	1	C
05	1	0	1	1	0	0	1	C
06	1	1	0	0	1	0	0	B
07	1	1	1	0	1	0	0	B

Tabla 4.5: Discriminación de fuentes para la cosecha de energía.

Para una mejor visualización, se puede observar y analizar el diagrama de estados de la Figura 4.71 en donde las fuentes se colocan dentro del círculo (correspondientes a las entradas ANALÓGICAS) y la respuesta en función de la fuente proporcionando energía se coloca afuera del círculo (correspondientes a las salidas DIGITALES).

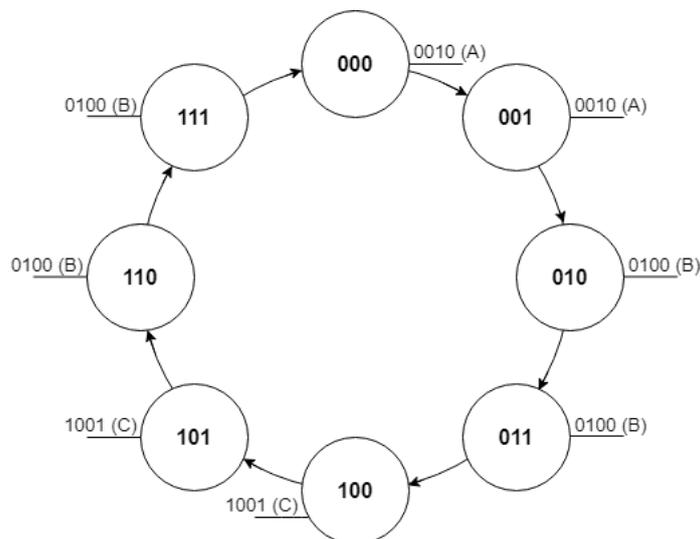


Figura 4.71: Diagrama de máquina de estados para la cosecha de energía.

Como se muestra en la Tabla 4.5, de acuerdo con los 8 estados que tenemos a la entrada, obtenemos 8 estados a la salida de los cuales algunos se repiten, teniendo así un total de 3 estados nombrándolos A, B, y C. Por ejemplo, para el estado 000 que es cuando no está ninguna fuente proporcionando energía, por defecto se va a tener el fototransistor del elemento biomecánico activado y el resto de los fototransistores estarán desactivados para poder recolectar energía, el cual corresponde a la salida 0010. Para el estado 001 nos indica que el elemento biomecánico está proporcionando energía, por tanto, la respuesta a la salida será 0010 que indica que el fototransistor del biomecánico permanecerá activado mientras que el resto de los fototransistores incluyendo el del MPPT están desactivados. Para el estado 010, el elemento piezoeléctrico su fototransistor permanecerá activado mientras que el resto permanecen desactivados incluyendo de igual manera el fototransistor que ajusta el control MPPT, la salida corresponde a 0100. Para el estado 011 nos indica que tanto el elemento piezoeléctrico como el elemento biomecánico están proporcionando energía, por lo que la respuesta que se indica es obtener la energía que proporciona el elemento piezoeléctrico ya que es el elemento que más puede dilatar en volver a proporcionar energía debido a la baja señal que proporciona, por lo que la respuesta a la salida que se va a obtener es 0100, esta misma respuesta también se va a obtener cuando la señal de entrada corresponda al estado 110 que es cuando la fotocelda y el elemento biomecánico están proporcionando energía y al estado 111 que es cuando todas las fuentes están proporcionando energía al mismo tiempo. En el estado 100 que es cuando la fotocelda proporciona energía, la respuesta a la salida será 1001, que indica que se activa el fototransistor de la fotocelda al igual que el del MPPT. Por último, se tiene el estado 101 el cual indica que tanto la celda solar como el elemento biomecánico están proporcionando energía, dando prioridad a la celda solar obteniendo como respuesta 1001. Los estados que se repiten a la salida se pueden observar en la Tabla 4.6.

NOMBRE ESTADO	ESTADO	PRIORIDAD A FUENTE
C	1001	Celda solar
A	0010	Biomecánico
B	0100	Piezoeléctrico

Tabla 4.6: Estados que se repiten acorde a la discriminación de energía.

Los niveles de voltajes que se tomaron en cuenta para recolectar energía de cada una de las fuentes involucradas se consideran a partir de la caracterización experimental realizada previamente, estos datos se pueden observar en la Tabla 4.7.

FUENTE	NIVEL LÓGICO		RESOLUCIÓN ADC
	0 <	1 >=	
Piezoeléctrico	0.5V	0.5V	100
Biomecánico	2V	2V	409
Fotovoltaico	1V	1V	210

Tabla 4.7: Niveles de voltaje para la recolección de energía.

Con base en la Tabla 4.5 y Tabla 4.7, se procedió a implementar un algoritmo en lenguaje C utilizando el software CCS Compiler para realizar la recolección de energía a partir de 3 fuentes con ajuste de control MPPT. El código se puede consultar en el apéndice A.4. Antes de implementar el sistema híbrido de recolección de energía y descargar el programa en el microcontrolador a utilizar, se realizó la simulación del sistema para conocer como sería su comportamiento como se muestra a continuación.

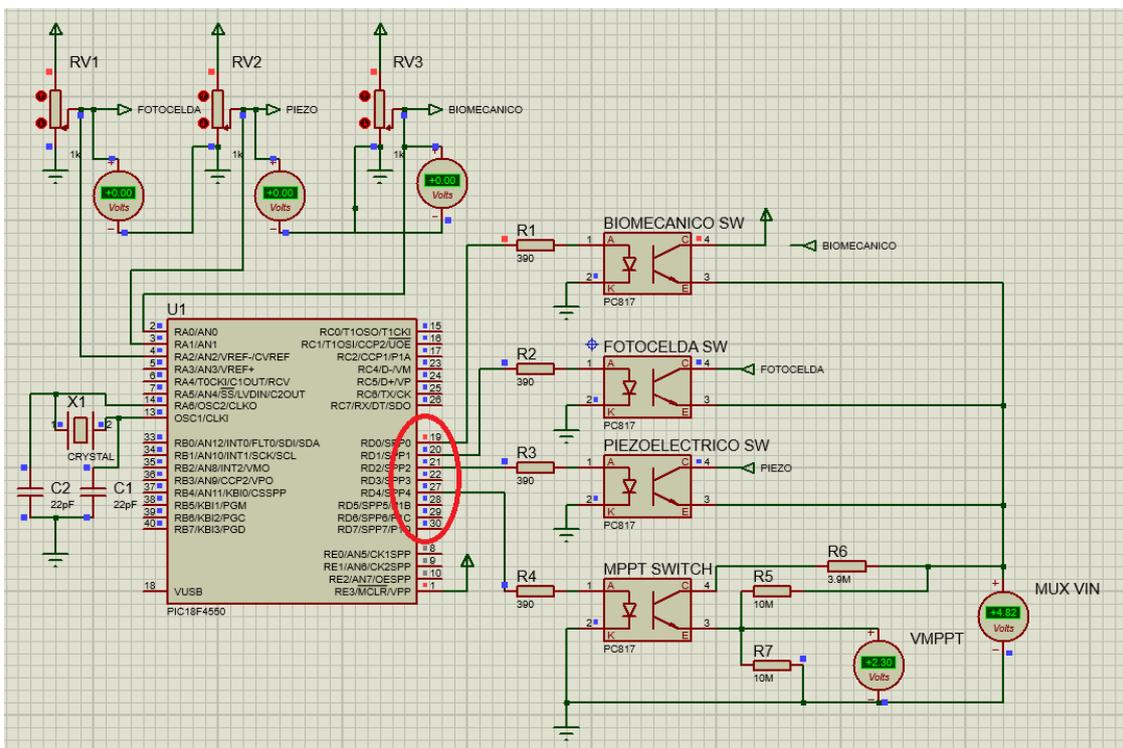


Figura 4.72: Estado 00 prioridad elemento biomecánico.

En la Figura 4.72 se muestra el estado 00 que supone cuando las fuentes no proporcionan energía. Debido a que el elemento biomecánico proporcionara energía aun estando en estado reposo se le da prioridad para no desperdiciarla.

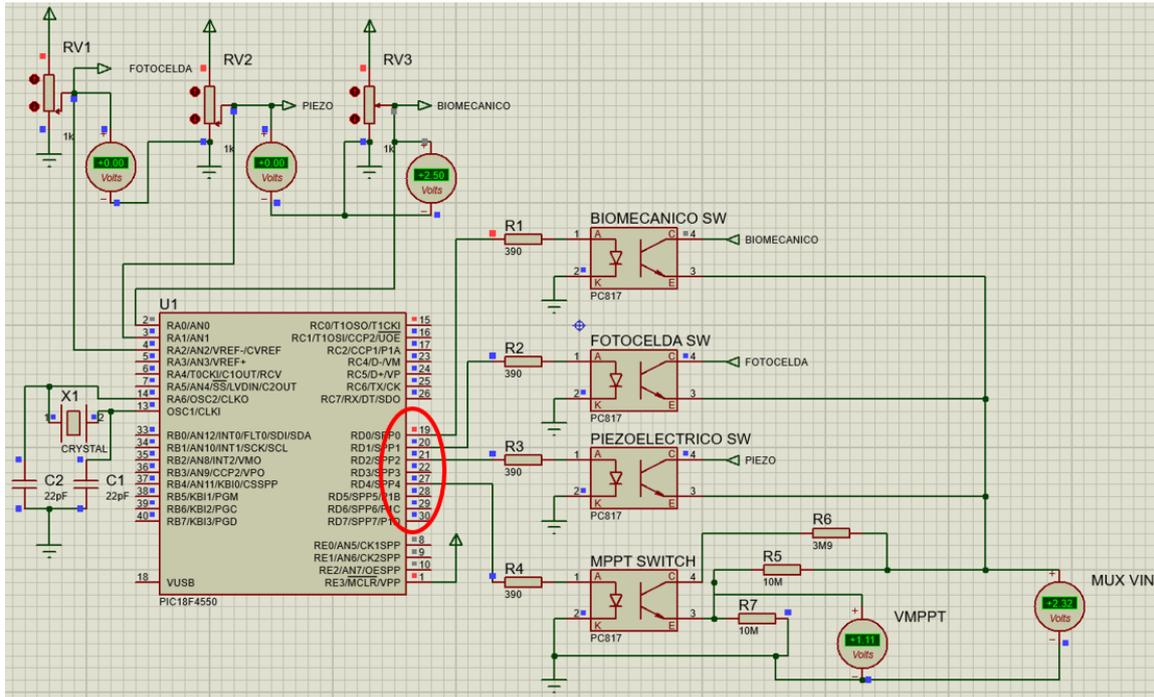


Figura 4.73: Estado 01 prioridad elemento biomecánico.

La Figura 4.73, simula el estado 01 que es cuando el individuo realiza la actividad de caminar y es cuando comienza a recolectar energía.

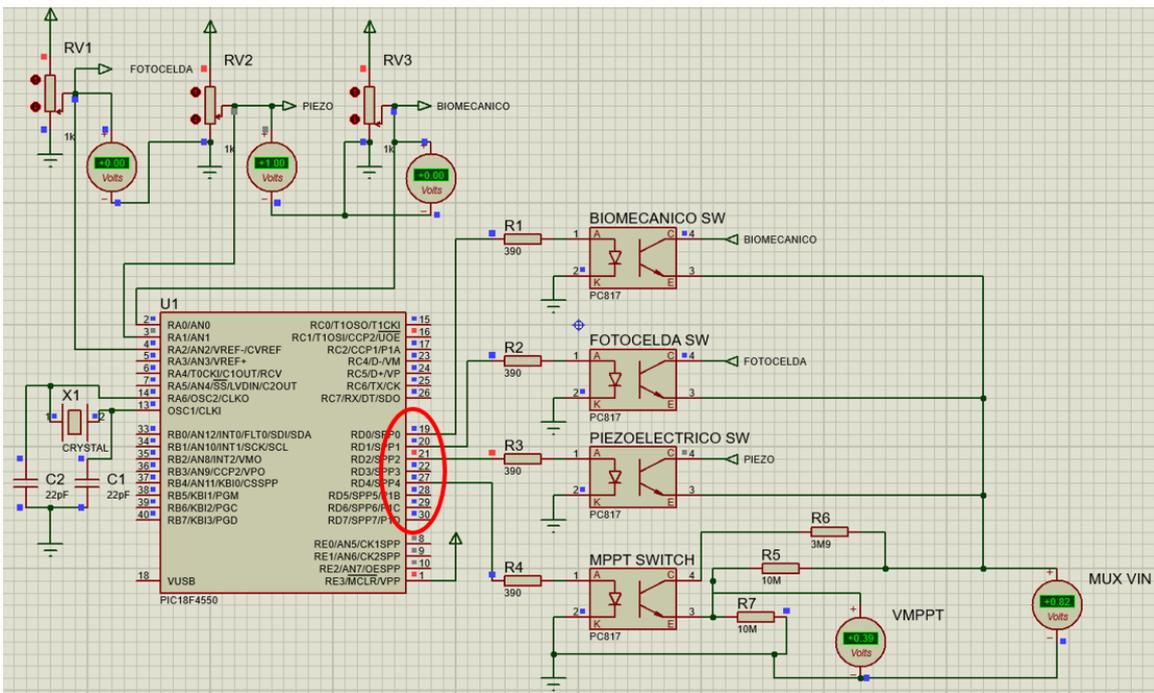


Figura 4.74: Estado 02 prioridad elemento piezoeléctrico.

La Figura 4.74 presenta el estado 02, representando cuando el elemento piezoeléctrico dispone de la energía recolectada a partir de las vibraciones a las que esta expuesto.

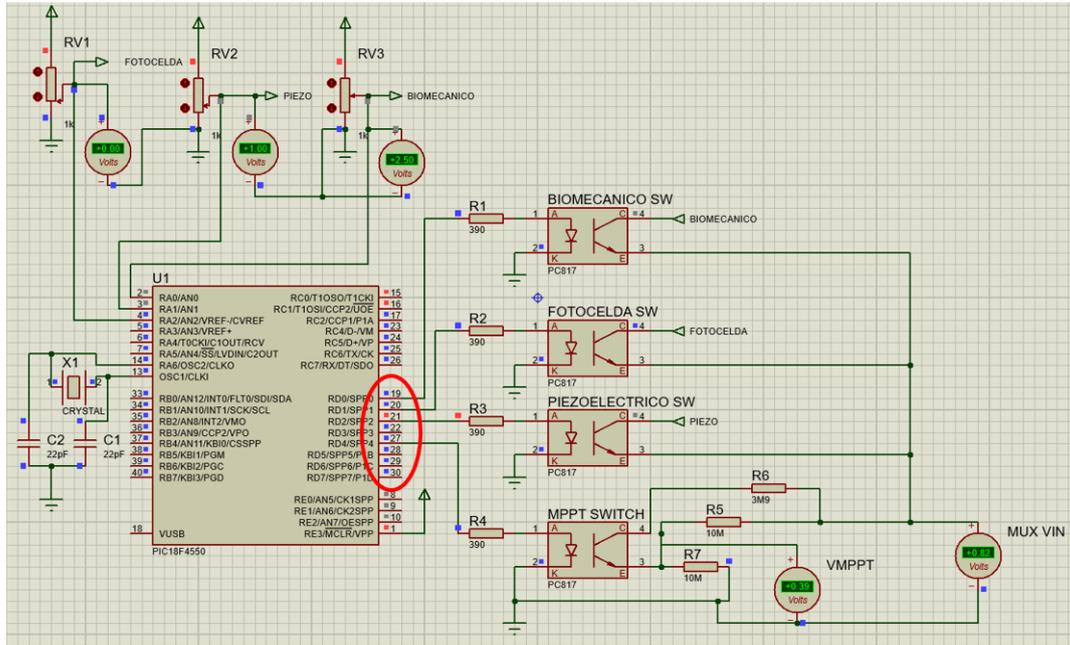


Figura 4.75: Estado 03 prioridad elemento piezoeléctrico.

La Figura 4.75, simula cuando el elemento biomecánico y piezoeléctrico están proporcionando energía, dándole prioridad al piezoeléctrico debido a que es el elemento que puede dilatar en proporcionar su energía.

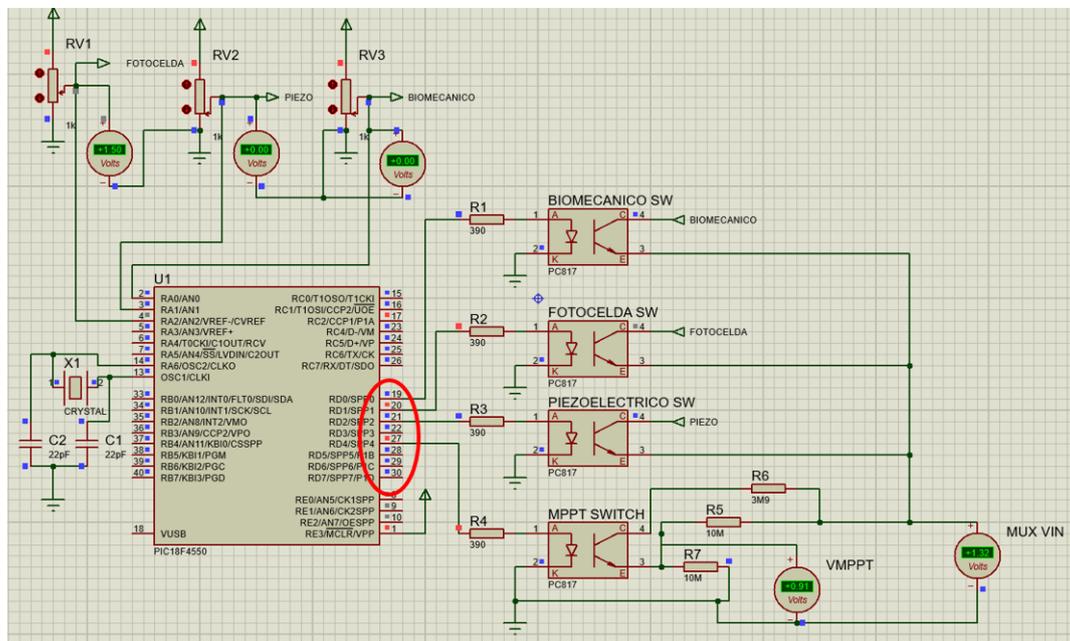


Figura 4.76: Estado 04 prioridad celda solar.

La Figura 4.76, muestra el estado 04 que es cuando la celda solar entra en función proporcionando la energía a partir de la radiación lumínica. Como se puede observar, el control MPPT también entra en función ajustando el V_{oc} al 78 %.

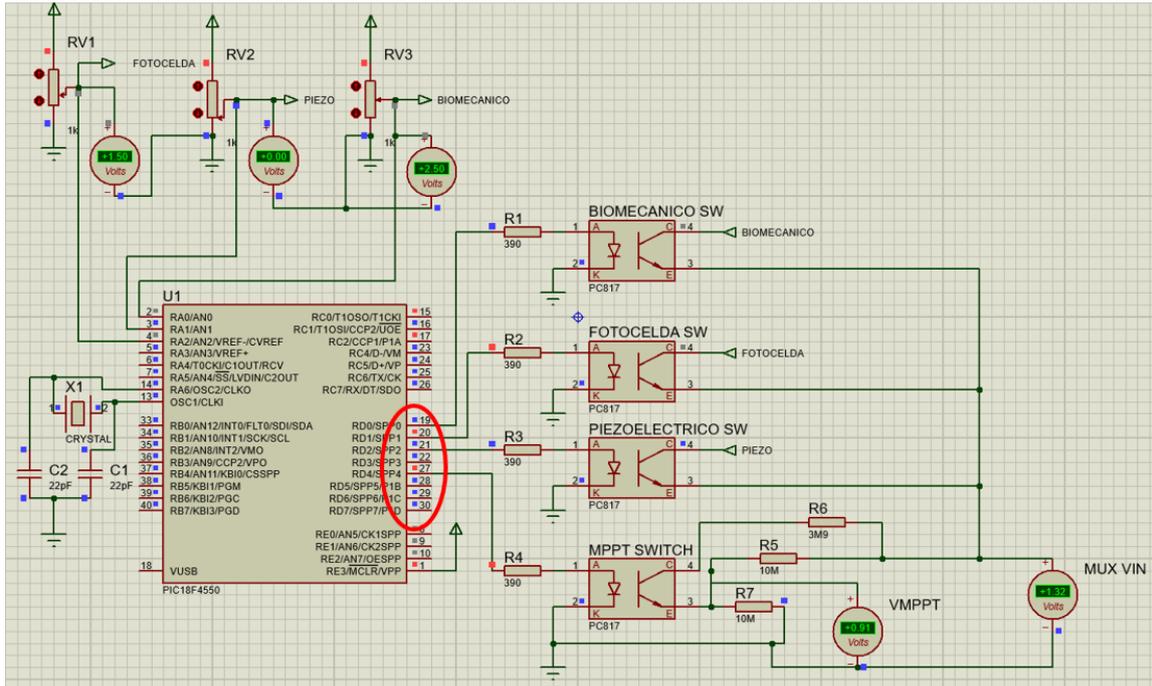


Figura 4.77: Estado 05 prioridad celda solar.

La Figura 4.77 corresponde al estado 05 que es cuando la celda solar y el elemento bio-mecánico proporcionan su energía, dándole prioridad a la primera ya que ésta dependiera de las condiciones climáticas que estén presentes, ajustando de igual manera el control MPPT al 78 % del V_{oc} .

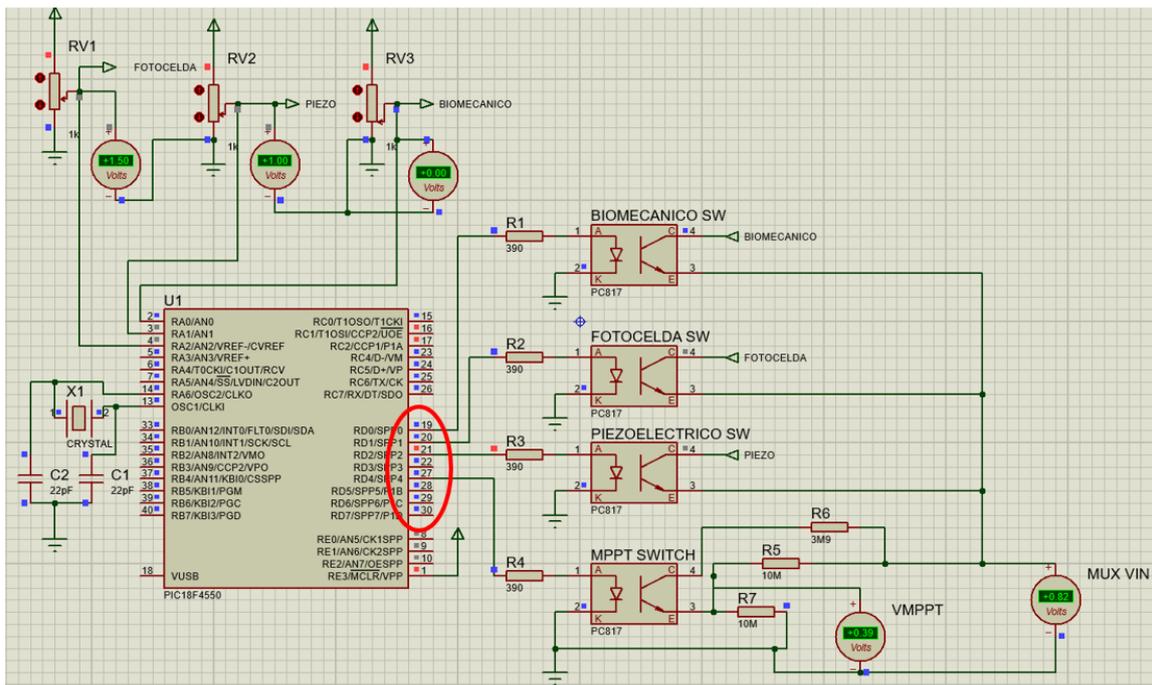


Figura 4.78: Estado 06 prioridad elemento piezoeléctrico.

El estado 06 que se muestra en la Figura 4.78 muestra cuando la celda solar y el elemento piezoeléctrico están proporcionando su energía, dándole prioridad a éste último debido a que esta menos expuesto a las vibraciones, como se puede notar el MPPT se ajusta al 50 % del V_{oc} .

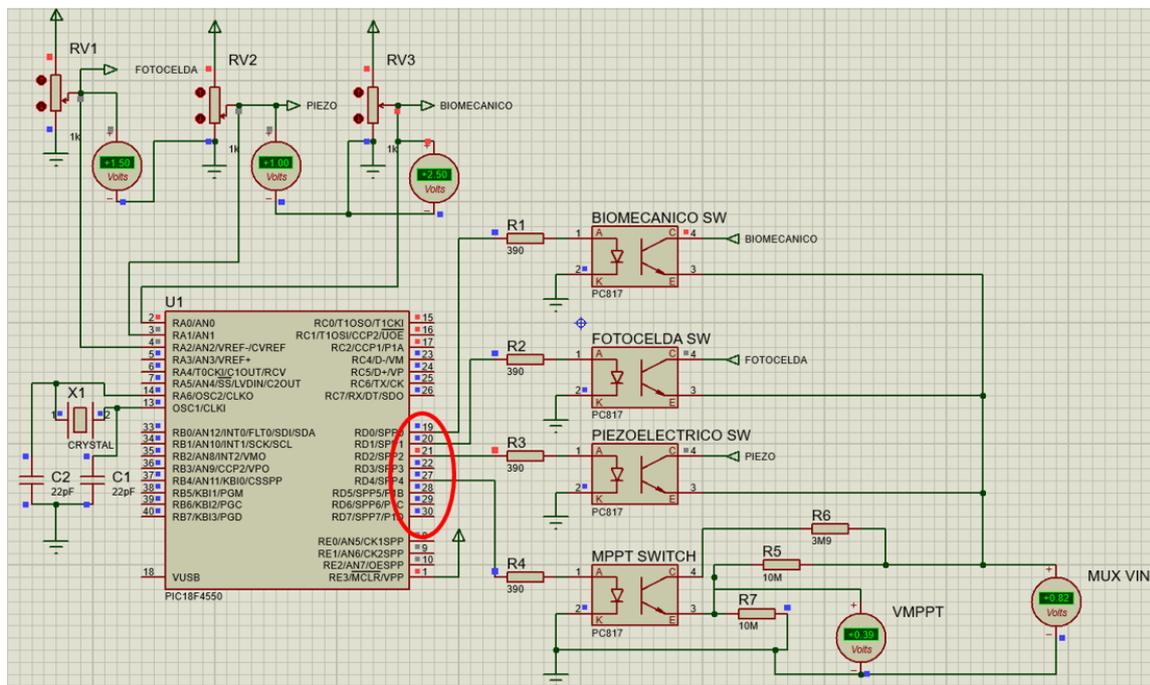


Figura 4.79: Estado 07 prioridad elemento piezoeléctrico.

Por último, la Figura 4.79 que representa al estado 07 muestra cuando todas las fuentes proporcionan su energía, dándole prioridad nuevamente al elemento piezoeléctrico.

Se menciona que en teoría solamente una fuente a la vez puede proporcionar su energía ya que su capacitor tiende a descargarse, dando oportunidad a las demás fuentes de también poder proporcionar su energía.

4.5.1. ANÁLISIS ESTADÍSTICO.

Se realizó una prueba estadística de ANOVA con un nivel de significancia de 0.05 y una confiabilidad del 95 % para comparar los valores obtenidos del voltaje recolectado a nivel laboratorio frente al nivel experimental, así como también para determinar si el tipo de actividad física y la distancia recorrida influían en la cantidad de voltaje recolectado por el supercapacitor. Por otro lado, se obtuvieron ecuaciones de predicción para conocer el punto en el que se podría obtener el máximo voltaje que corresponde a 3.5V.

El experimento de prueba consistió en realizar diferentes actividades físicas como caminar, trotar y marchar a una distancia de 10m, 20m y 30m con un número de 6 repeticiones

para cada una. Los voltajes de prueba que se midieron durante la experimentación fueron los voltajes que proporcionaron las diferentes fuentes (biomecánico, piezoeléctrico y celda solar), así como el voltaje recolectado y almacenado en el supercapacitor. La Tabla 4.8 muestra el diseño de experimentos propuesto para la recolección de datos necesarios para su posterior análisis.

Distancia:			Condición experimento:				
Repetición	Hora	Voltaje BIO [V]	Voltaje PIEZO [V]	Voltaje CELDA [V]	Calorías	Pasos	Voltaje Capacitor [V]
1	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx
2	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx
3	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx
4	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx
5	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx
6	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx

Tabla 4.8: Propuesta de diseño de experimentos.

Capítulo 5

RESULTADOS Y ANÁLISIS

Para realizar las pruebas del sistema híbrido de recolección de energía, se propuso el diagrama mostrado en la Figura 5.1 para desarrollar este tema de investigación. Se menciona que para alimentar el sistema se aprovecha la pila recargable que tiene implementado el sistema biomecánico la cual proporciona un voltaje de 4.2V. Debido a que este voltaje no es suficiente para alimentar al microcontrolador 18F4550, se utilizó un convertidor “step-up” de matricula MT3608 para obtener un voltaje regulado a 5V y así conseguir auto-alimentar el sistema.

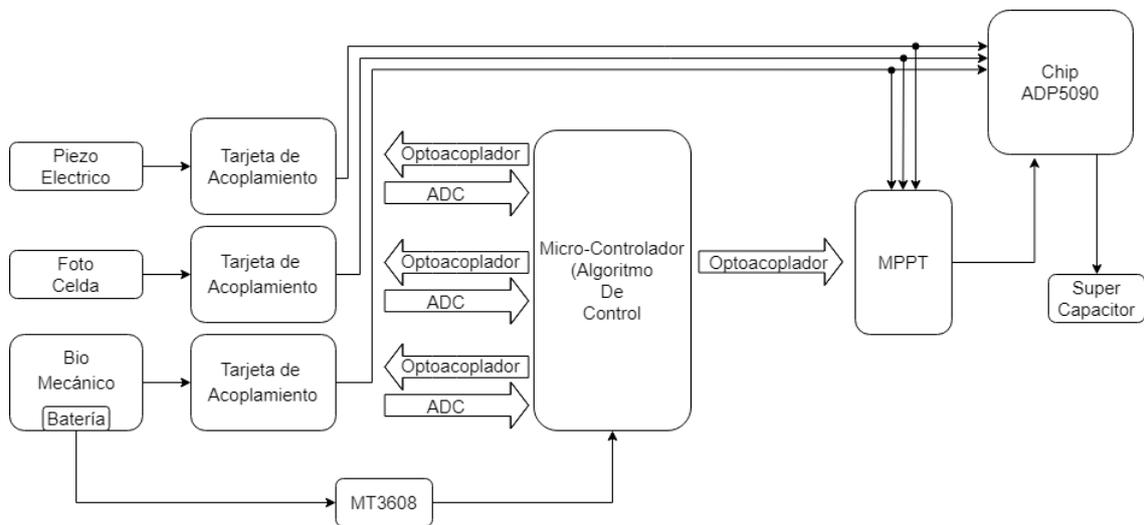


Figura 5.1: Diagrama de bloques del sistema de recolección de energía

La Figura 5.2 muestra el sistema implementado físicamente para poder llevar a cabo las pruebas de campo necesarias y lograr hacer el analisis estadístico.

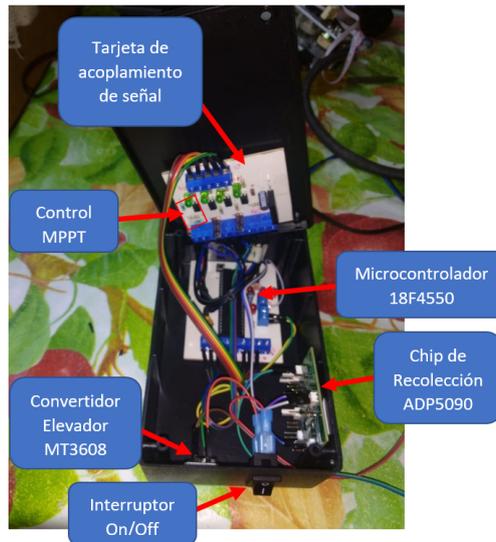


Figura 5.2: Sistema híbrido de recolección de energía implementado físicamente.

El Step-Up MT3608 se utilizó debido a las características que posee, las cuales son: voltaje de entrada de 2V a 24V, frecuencia de conmutación de 1.2MHz, compensación interna, modo automático de modulación de frecuencia de pulso con cargas ligeras, voltaje de salida de 5V a 28V y tiene una eficiencia de conversión energética superior del 93 % debido a que es un regulador elevador de tipo conmutado con bajo voltaje de rizado de acuerdo como lo especifica la hoja de datos. Este elemento reduce al mínimo el uso de componentes externos para simplificar el diseño de fuentes de alimentación. Además, tiene como función principal entregar un voltaje de salida constante aún cuando existan variaciones en el voltaje de entrada (voltaje inferior al de salida) o de carga, soportando corrientes de salida de hasta 2A o una potencia de 6W.

Los convertidores conmutados convierten el voltaje mediante el almacenamiento periódico de energía de entrada y la posterior liberación de esa energía en la salida de forma que el nivel de voltaje final es el deseado. Los convertidores DC-DC conmutados con el objetivo de convertir la energía eléctrica con la máxima eficiencia poseen únicamente componentes que no presentan pérdidas, es decir, que no absorben energía. Los componentes son básicamente de 2 tipos: 1) conmutadores y 2) almacenadores. Los conmutadores son interruptores del paso de corriente que idealmente no presentan pérdidas por conmutación; normalmente son transistores MOSFET. Los componentes almacenadores son los inductores y capacitores que almacenan la energía temporalmente para luego devolverla al circuito.

La posición de cada una de las fuentes del sistema híbrido de recolección de energía se posicionaron de acuerdo al esquema mostrado en la Figura 5.3. El producto obtenido y su colocación final se muestran en la Figura 5.4.

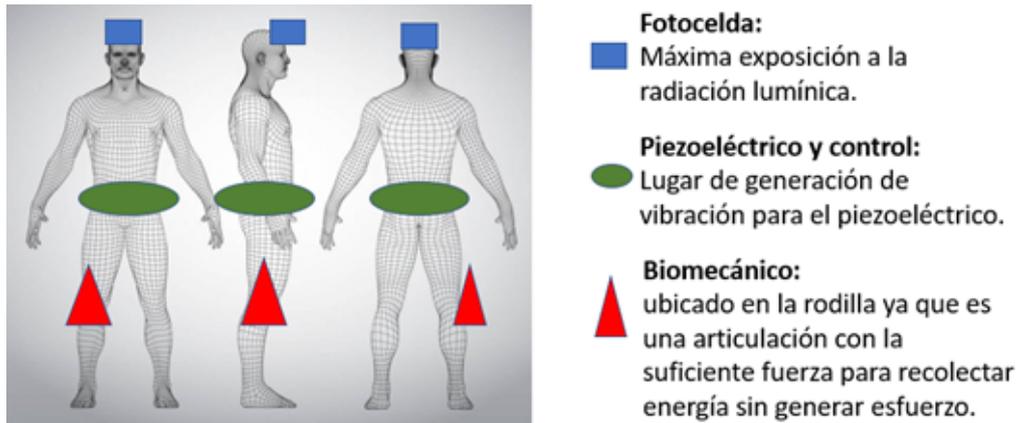


Figura 5.3: Posicionamiento para el sistema híbrido de recolección de energía.



Figura 5.4: Posicionamiento experimental del sistema híbrido de recolección de energía.

5.1. Análisis Estadístico

A continuación se presenta un análisis estadístico de las pruebas realizadas en campo, donde se muestra el promedio de los resultados obtenidos para cada una de las condiciones experimentales, así como la distancia recorrida para cada caso. Se observa que los valores del voltaje recolectado por la fuente biomecánica, piezoeléctrica y la celda solar son similares para cada condición experimental, así como el promedio de calorías quemadas oscila entre 1-2 cal.

Distancia: 10 metros			Condición experimento: CAMINANDO				
Repetición	HORA	Voltaje BIO [V]	Voltaje PIEZO [V]	Voltaje CELDA [V]	CALORIAS	PASOS	Voltaje Capacitor [V]
1	03:43	3.9	0.392	1.65	1	14	0.03
2	03:45	3.9	0.4	1.7	1	16	0.04
3	03:50	3.9	0.375	1.7	1	15	0.05
4	03:52	3.9	0.382	1.62	0	14	0.04
5	03:54	3.9	0.4	1.69	1	15	0.03
6	03:57	3.9	0.39	1.69	1	15	0.04
Promedio		3.9	0.389	1.675	0.833	14.833	0.038

Tabla 5.1: Resultados de la prueba caminando 10m.

La Tabla 5.1 muestra el experimento que se realizó caminando una distancia de 10m, se observa que el promedio de pasos es de 14.8 y que el voltaje que se recolecta en esa distancia es de 0.038V cuando el elemento biomecánico proporciona un voltaje de 3.9V, el elemento piezoeléctrico un voltaje de 0.389 y la celda solar un voltaje de 1.657.

Distancia: 10 metros			Condición experimento: TROTANDO				
Repetición	HORA	Voltaje BIO [V]	Voltaje PIEZO [V]	Voltaje CELDA [V]	CALORIAS	PASOS	Voltaje Capacitor [V]
1	03:55	3.9	0.45	1.62	1	14	0.05
2	04:00	3.9	0.492	1.67	1	13	0.06
3	04:02	3.9	0.415	1.67	0	14	0.06
4	04:04	3.9	0.488	1.75	1	15	0.08
5	04:06	3.9	0.47	1.66	1	14	0.05
6	04:07	3.9	0.474	1.69	0	15	0.07
Promedio		3.9	0.464	1.676	0.666	14.166	0.061

Tabla 5.2: Resultados de la prueba trotando 10m.

La Tabla 5.2 presenta la condición trotando una distancia de 10m. Se observa que el número de pasos es de 14.1 y que el voltaje recolectado es de 0.061V cuando el elemento biomecánico proporciona un voltaje de 3.9V, el elemento piezoeléctrico un voltaje de 0.464 y la celda solar un voltaje de 1.676.

Distancia: 10 metros			Condición experimento: MARCHANDO				
Repetición	HORA	Voltaje BIO [V]	Voltaje PIEZO [V]	Voltaje CELDA [V]	CALORIAS	PASOS	Voltaje Capacitor [V]
1	04:28	3.9	0.425	1.79	0	18	0.1
2	04:30	3.9	0.492	1.65	0	16	0.12
3	04:32	3.9	0.425	1.73	0	18	0.15
4	04:34	3.9	0.461	1.66	1	19	0.08
5	04:36	3.9	0.487	1.65	1	17	0.07
6	04:38	3.9	0.484	1.7	0	18	0.07
Promedio		3.9	0.462	1.696	0.333	17.666	0.098

Tabla 5.3: Resultados de la prueba marchando 10m.

Y por último a la misma distancia de 10m se muestra la Tabla 5.3 al marchar. Se observa que el voltaje promedio recolectado es de 0.098V con un número de pasos de 17.6 cuando el elemento biomecánico proporciona un voltaje de 3.9V, el elemento piezoeléctrico un voltaje de 0.462 y la celda solar un voltaje de 1.696.

Distancia: 20 metros			Condición experimento: CAMINAR				
Repetición	HORA	Voltaje BIO [V]	Voltaje PIEZO [V]	Voltaje CELDA [V]	CALORIAS	PASOS	Voltaje Capacitor [V]
1	01:15	3.9	0.438	1.72	1	28	0.07
2	01:16	3.9	0.441	1.73	0	30	0.03
3	01:18	3.9	0.445	1.75	1	29	0.06
4	01:19	3.9	0.472	1.7	1	27	0.07
5	01:20	3.9	0.46	1.69	0	28	0.1
6	01:21	3.9	0.46	1.7	1	30	0.07
Promedio		3.9	0.452	1.715	0.666	28.666	0.066

Tabla 5.4: Resultados de la prueba caminando 20m.

En la Tabla 5.4 se muestra la condición caminar una distancia de 20m en donde el número de pasos promedio es de 28.6 recolectando un voltaje de 0.066 cuando el elemento biomecánico proporciona un voltaje de 3.9V, el elemento piezoeléctrico un voltaje de 0.452 y la celda solar un voltaje de 1.715.

Distancia: 20 metros			Condición experimento: TROTAR				
Repetición	HORA	Voltaje BIO [V]	Voltaje PIEZO [V]	Voltaje CELDA [V]	CALORIAS	PASOS	Voltaje Capacitor [V]
1	01:31	3.9	0.518	1.7	0	27	0.1
2	01:32	3.9	0.6	1.7	1	29	0.06
3	01:34	3.9	0.5	1.76	0	27	0.02
4	01:35	3.9	0.52	1.75	1	28	0.07
5	01:36	3.9	0.614	1.74	0	28	0.04
6	01:37	3.9	0.523	1.7	2	29	0.05
Promedio		3.9	0.545	1.725	0.666	28	0.074

Tabla 5.5: Resultados de la prueba trotando 20m.

La Tabla 5.5 presenta los resultados que se obtuvieron cuando se trota una distancia de 20m, en donde el elemento biomecánico proporciona un voltaje de 3.9V, el elemento piezoeléctrico un voltaje de 0.545 y la celda solar un voltaje de 1.725, obteniendo un voltaje promedio de 0.074V en un rango aproximado de 28 pasos.

Distancia: 20 metros			Condición experimento: MARCHAR				
Repetición	HORA	Voltaje BIO [V]	Voltaje PIEZO [V]	Voltaje CELDA [V]	CALORIAS	PASOS	Voltaje Capacitor [V]
1	01:59	3.9	0.478	1.72	1	32	0.07
2	02:00	3.9	0.465	1.74	0	35	0.12
3	02:01	3.9	0.478	1.72	1	31	0.09
4	02:02	3.9	0.481	1.76	1	32	0.12
5	02:04	3.9	0.49	1.69	0	31	0.11
6	02:06	3.9	0.47	1.69	1	35	0.12
Promedio		3.9	0.477	1.72	0.666	32.666	0.105

Tabla 5.6: Resultados de la prueba marchando 20m.

La última condición que es marchar a esta misma distancia de 20m, proporcionó un voltaje recolectado de 0.105 y en donde el número de pasos promedio es de 32.6 se muestran en la Tabla 5.6. Se menciona que el elemento biomecánico proporciona un voltaje de 3.9V, el elemento piezoeléctrico un voltaje de 0.477 y la celda solar un voltaje de 1.72.

Distancia: 30 metros			Condición experimento: CAMINAR				
Repetición	HORA	Voltaje BIO [V]	Voltaje PIEZO [V]	Voltaje CELDA [V]	CALORIAS	PASOS	Voltaje Capacitor [V]
1	02:18	3.9	0.406	1.75	1	39	0.09
2	02:19	3.9	0.45	1.7	1	41	0.07
3	02:20	3.9	0.413	1.7	1	39	0.09
4	02:21	3.9	0.44	1.74	1	40	0.07
5	02:22	3.9	0.45	1.69	1	41	0.1
6	02:24	3.9	0.448	1.68	1	42	0.11
Promedio		3.9	0.434	1.71	1	40.333	0.088

Tabla 5.7: Resultados de la prueba caminando 30m.

La Tabla 5.7 muestra que cuando se recorre una distancia de 30m caminando y cuando el elemento biomecánico proporciona un voltaje de 3.9V, el elemento piezoeléctrico un voltaje de 0.434 y la celda solar un voltaje de 1.71 el voltaje promedio recolectado es de 0.088V con un número de 40.3 pasos.

Distancia: 30 metros			Condición experimento: TROTAR				
Repetición	HORA	Voltaje BIO [V]	Voltaje PIEZO [V]	Voltaje CELDA [V]	CALORIAS	PASOS	Voltaje Capacitor [V]
1	02:31	3.9	0.446	1.78	2	39	0.08
2	02:32	3.9	0.502	1.69	2	41	0.1
3	02:33	3.9	0.5	1.67	2	38	0.08
4	02:35	3.9	0.515	1.69	2	41	0.08
5	02:36	3.9	0.502	1.68	2	42	0.1
6	02:37	3.9	0.518	1.67	2	39	0.08
Promedio		3.9	0.497	1.696	2	40	0.086

Tabla 5.8: Resultados de la prueba trotando 30m.

En la Tabla 5.8 se presenta que cuando el elemento biomecánico proporciona un voltaje de 3.9V, el elemento piezoeléctrico un voltaje de 0.497 y la celda solar un voltaje de 1.696, se recolectó un voltaje promedio de 0.086V cuando se recorre una distancia de 30m trotando.

Distancia: 30 metros			Condición experimento: MARCHAR				
Repetición	HORA	Voltaje BIO [V]	Voltaje PIEZO [V]	Voltaje CELDA [V]	CALORIAS	PASOS	Voltaje Capacitor [V]
1	02:40	3.9	0.486	1.7	1	50	0.11
2	02:41	3.9	0.518	1.7	1	52	0.1
3	02:42	3.9	0.48	1.66	1	49	0.12
4	02:43	3.9	0.469	1.68	1	50	0.09
5	02:44	3.9	0.5	1.74	1	51	0.13
6	02:45	3.9	0.512	1.72	1	49	0.1
Promedio		3.9	0.494	1.7	1	50.166	0.108

Tabla 5.9: Resultados de la prueba marchando 30m.

Finalmente, la Tabla 5.9 presenta los datos de voltaje obtenido de 0.108V cuando el elemento biomecánico proporciona una energía de 3.9V, el elemento piezoeléctrico 0.494V y la celda solar un voltaje de 1.7V.

5.1.1. ANÁLISIS ANOVA

De acuerdo con los resultados obtenidos con el análisis ANOVA considerando las fuentes a utilizar mostrados en la Tabla 5.10, se concluye que los valores de voltaje obtenidos son diferentes dependiendo de la fuente utilizada (biomecánico, piezoeléctrico y celda solar). Por otro lado, se obtuvo que los valores de voltaje son estadísticamente similares tanto los obtenidos en el laboratorio como a nivel experimental (pruebas de campo).

El valor medido de los voltajes a nivel laboratorio son de 4V para el elemento biomecánico, 1.7V en la celda solar y 0.8V para el elemento piezoeléctrico, mientras que los valores a nivel experimental (pruebas de campo) son de 3.9V para el elemento biomecánico, 1.7V para la celda solar y 0.63V para el elemento piezoeléctrico. Por lo que se consideró que el sistema se comportó de la manera esperada para la recolección de energía a partir de diferentes fuentes utilizadas.

Análisis De Varianza De Dos Factores Con Una Sola Muestra Por Grupo						
RESUMEN	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza		
Piezoeléctrico	2	1.2692	0.6346	0.05471432		
Biomecánico	2	7.9	3.95	0.005		
Celda	2	3.4012	1.7006	7.2E-07		
						Nivel de significancia (α)
Laboratorio	3	6.5	2.166666667	2.723333333		0.05
Campo	3	6.0704	2.023466667	3.020489013		

ANÁLISIS DE VARIANZA						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	Estadístico F	Probabilidad	Valor crítico para F
Elemento (Fuente)	11.45868901	2	5.729344507	395.731995	0.002520593	19
Condiciones (laboratorio vs. campo)	0.03075936	1	0.03075936	2.12458212	0.282293658	18.51282051
Error	0.02895568	2	0.01447784			
Total	11.51840405	5				

Tabla 5.10: Análisis ANOVA para fuentes a utilizar.

Al realizar un segundo análisis ANOVA considerando las tres actividades físicas propuestas (caminar, trotar y marchar) y la distancia recorrida como se muestra en la Tabla 5.11, se concluye que la actividad física sí influye en la cantidad de voltaje recolectado, es decir, cuando se realiza la actividad de trotar o marchar en el cuerpo se está generando una frecuencia mucho mayor que hace vibrar al elemento piezoeléctrico para generar un voltaje mayor en comparación con el voltaje que se genera cuando se camina. Al generar el voltaje trotando o marchando el sistema de recolección de energía da prioridad al elemento piezoeléctrico lo cual provoca que el voltaje recolectado no incremente de manera exponencial.

Por otro lado, el análisis muestra que la distancia recorrida no es un factor estadísticamente determinante en la recolección del voltaje, esto se explica debido a que al haber una frecuencia de vibración diferente al realizar una actividad en específico se puede alcanzar o no un nivel de energía determinado para el elemento piezoeléctrico que al entrar en función tendrá como consecuencia una prolongación tardada en la recolección de energía. Se aclara que la energía que estén proporcionando las demás fuentes no se desperdicia ya que se les da prioridad cuando dispongan de la energía suficiente para poder recolectarla de acuerdo con las pruebas que se realizaron a nivel laboratorio.

Análisis De Varianza De Dos Factores Con Una Sola Muestra Por Grupo						
RESUMEN	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza		
Caminar	3	0.193	0.064333333	0.000637444		
Trotar	3	0.223452381	0.074484127	0.000146036		
Marchar	3	0.311666667	0.103888889	2.59259E-05		
						Nivel de significancia (α)
10 m	3	0.198833333	0.066277778	0.000920731		0.05
20 m	3	0.245952381	0.081984127	0.00041181		
30 m	3	0.283333333	0.094444444	0.00014537		

ANÁLISIS DE VARIANZA						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	Estadístico F	Probabilidad	Valor crítico para F
Actividad física	0.002532321	2	0.00126616	11.95890798	0.020528495	6.94427191
Distancia	0.00119531	2	0.000597655	5.644862888	0.068441669	6.94427191
Error	0.000423504	4	0.000105876			
Total	0.004151134	8				

Tabla 5.11: Análisis ANOVA para condiciones de uso.

En los gráficos presentados a continuación se muestran las ecuaciones de predicción obtenidas para cada una de las actividades físicas realizadas.

Para el caso de la prueba que consistió en caminar, como se muestra en el gráfico de la Figura 5.5, se obtuvo la siguiente ecuación de predicción $y = 0.0025x + 0.014$. Con esta ecuación se estimó que el voltaje máximo que corresponde a 3.5V se puede recolectar al recorrer una distancia de 1394m. También se obtuvo un valor de R^2 (coeficiente de correlación) de 0.9938 el cual indica que los valores obtenidos a nivel experimental se ajustan a esta recta.

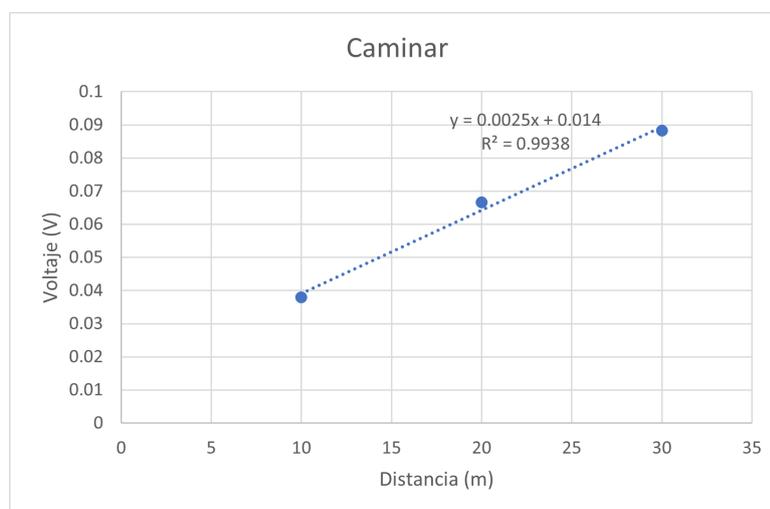


Figura 5.5: Gráfica correspondiente a la prueba de caminar.

Para la actividad física de trotar, con ayuda del gráfico obtenido que se observa en la Figura 5.6 se halló la ecuación de predicción $y = 0.0012x + 0.0503$ la cual nos ayudó a pronosticar la distancia de 2874m que es aproximadamente donde se puede conseguir el voltaje máximo de 3.5V. Su coeficiente de correlación con un valor de 0.9997 indica que también los valores obtenidos a nivel experimental se ajustan a la recta obtenida.

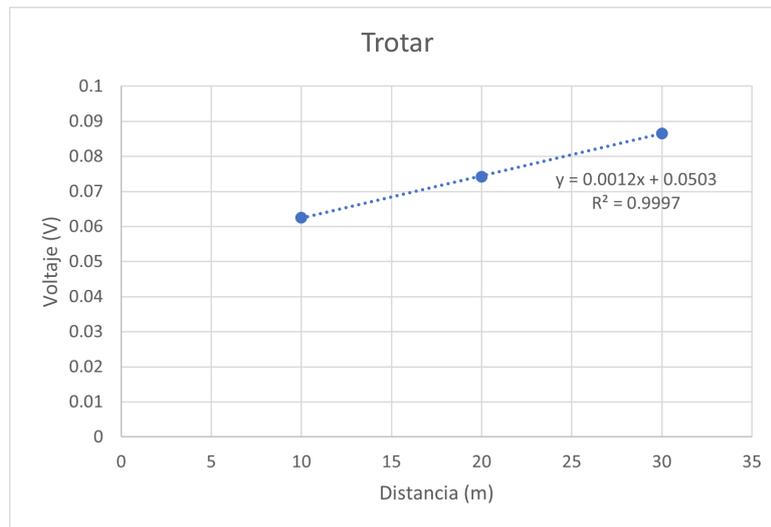


Figura 5.6: Gráfica correspondiente a la prueba de trotar.

Por último, para la condición de marchar, la gráfica que se obtuvo se puede apreciar en la Figura 5.7, en donde de igual manera la ecuación de predicción que se obtuvo es $y = 0.0005x + 0.0939$ y con la cual se predice que al recorrer una distancia de 6812m se puede obtener el voltaje máximo. De acuerdo con el valor del coeficiente de correlación obtenido de 0.9629 informa que los valores obtenidos de manera experimental de igual manera se ajustan a esta recta.

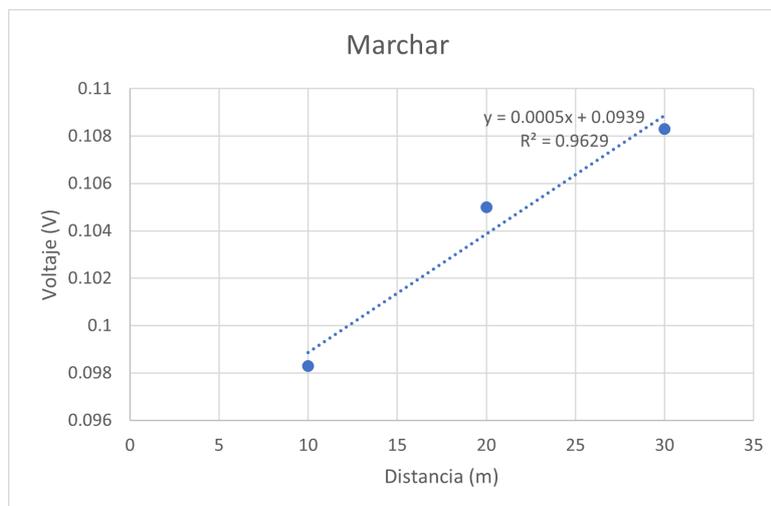


Figura 5.7: Gráfica correspondiente a la prueba de trotar.

Como se presentó en las tablas mencionadas en la sección **5.1 Análisis Estadísticos**, la fuente que proporcionó más energía es el elemento biomecánico ya que presenta un voltaje constante de 3.9V, seguida de la celda solar con un voltaje de 1.7V en condiciones de irradiancia lumínica y quedando en tercer lugar el elemento piezoeléctrico ya que el voltaje que proporciona está alrededor de 0.6V en condiciones experimentales. La gráfica de la Figura 5.8 muestra una comparación de los voltajes obtenidos a nivel laboratorio y a nivel experimental, mostrando los diferentes niveles de voltaje que cada una de las fuentes proporcionan.

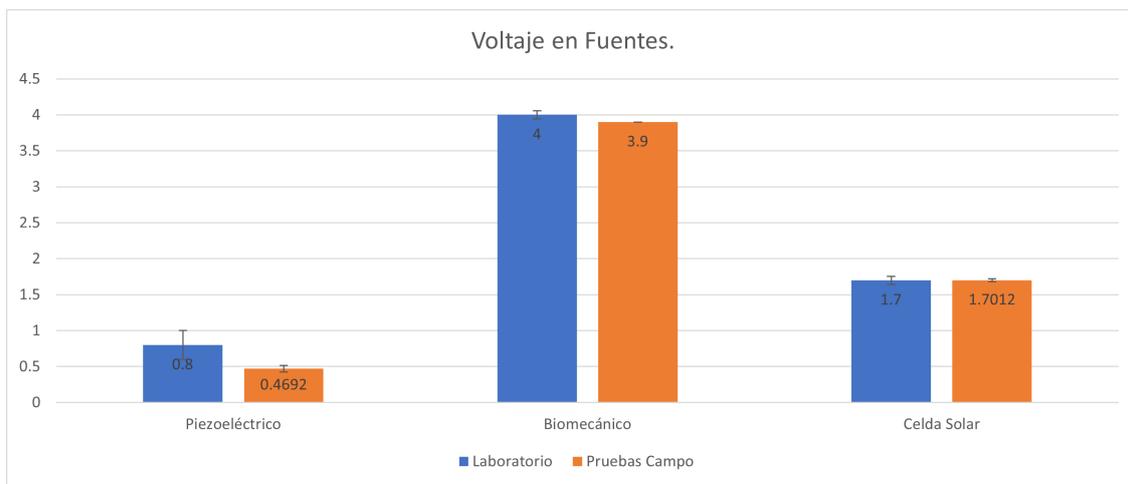


Figura 5.8: Gráfica de comparación de voltajes entre fuentes utilizadas a nivel laboratorio y campo, con su respectiva desviación estándar.

La energía almacenada en los capacitores es energía potencial eléctrica. Para determinar esta energía potencial eléctrica se utiliza la fórmula 5.1, pero la energía almacenada en el capacitor se calculará con la formula 5.2 y se explica el por qué a continuación.

La energía almacenada en un capacitor sería $Q * V$ si durante la descarga todas las cargas cayeran del total del voltaje V , sin embargo, durante la descarga no todas las cargas van a caer a través de este voltaje; de hecho, solo la primera carga que es transferida va a caer a través del total del voltaje V , todas las cargas que sean transferidas después van a caer a través de menos voltaje. La razón de esto es que cada vez que una carga es transferida decrementa la cantidad total de carga almacenada en el capacitor y conforme disminuye la carga del capacitor, el voltaje a través de éste también va a disminuir debido a que la capacitancia (C) se define como la carga (Q) almacenada en el capacitor entre el voltaje (V) a través de ese capacitor ($C = Q/V$), así que conforme disminuye la carga el voltaje también disminuye conforme más carga es transferida. Llegará un punto en el que la carga solo va a tener una caída de $\frac{3}{4}$ a través del voltaje inicial, si esperamos un poco más la caída de la carga va a ser a través de $\frac{1}{2}$ del voltaje original, si esperamos un poco

más, la carga va a tener una caída de $\frac{1}{4}$ del voltaje original y la última carga que se transfiere va a caer a casi nada de voltaje porque básicamente no quedara carga en el capacitor. Si sumamos todas las caídas de energía potencial eléctrica (EP) encontramos que la caída total de energía en el capacitor es Q (carga total en el capacitor) multiplicado por la mitad del voltaje original del capacitor ($V/2$). Así, que básicamente el $1/2$ está en la formula 5.2 porque no toda la carga va a tener una caída a través de todo el voltaje inicial V .

Sí tomamos la carga almacenada en un capacitor en cualquier momento y la multiplicamos por el voltaje a través del capacitor en ese mismo instante y lo dividimos entre 2 tendremos la energía almacenada en el capacitor en ese instante particular del tiempo. Otra manera de calcular la energía potencial eléctrica de un capacitor es sustituir $Q = CV$ en la ecuación 5.2 obteniendo la ecuación 5.3. Hay que tener en cuenta que el voltaje (V) en estas fórmulas se refiere al voltaje a través del capacitor.

$$\Delta EP_{electrica} = QV \quad (5.1)$$

$$E_{capacitor} = \frac{1}{2}QV \quad (5.2)$$

$$E_{capacitor} = \frac{1}{2}CV^2 \quad (5.3)$$

El almacén de la energía recolectada y procesada se realizó en un supercapacitor de 1F a 5.5V en el que la energía promedio almacenada y calculada en términos de trabajo fue de 5.832mJ, pero que si se recolecta el voltaje máximo de 3.5V al que está diseñado el sistema híbrido de recolección de energía con base en las ecuaciones que se muestran en las Figuras 5.5, 5.6 y 5.7 se obtiene una energía de 6.125J que de acuerdo a la Tabla 2.2 del capítulo 2, el equivalente de energía en Watts corresponde entre 2W y 10W, energía suficiente para alimentar dispositivos de bajo consumo como calculadoras, algun tipo de reloj de pulsera, reproductores mp3, entre otros de acuerdo a la Figura 1.1 del capítulo 1. Para obtener resultados con un tiempo de carga mucho menor al de este trabajo de investigación se puede variar el valor del capacitor por un rango más pequeño.

Retomando la Tabla 2.4 del capítulo 2, se hace una comparación del voltaje que recolecta este sistema con los que se consultaron en el estado del arte como se muestra a continuación en la Tabla 5.12.

Parámetros	[22]	[4]	[59]	[60]	[61]	[62]	Este trabajo
Tecnología	0.35 μm	0.18 μm	0.18 μm	0.35 μm	0.35 μm	0.35 μm (TEG) 0.18 μm (RF)	Nivel discreto
Fuentes de Recolección	PV TEG PE	PE EM TEG	GBFC TEG	PE	PE	TEG RF	Biomecánico PV PE
Frecuencia de Excitación	PV: DC TEG: DC PE: NA	PE: 282Hz EM: 2-3Hz TEG: DC	GBFC: DC TEG: DC	200Hz	NA	TEG: DC RF: NA	Biomecánico: DC PV: DC PE: 15Hz
Energía Mínima de Entrada	PV: 150 μW TEG: 90 μW PZT : 45 μW	PE: 4.2 μW EM: 1 μW TEG: NA	GBFC: 0.5 μW TEG: 0.5 μW	$\approx 20 \mu\text{W}$	33 μW	TEG: 70 μW RF: NA	Biomecánico: 20mW PV: 96mW PE: 0.7mW
Voltaje de Salida	1.9 V	0.8-1.25 V	1.9 V	1.8-6.6 V	1-8 V	1.75-4.3 V	3.5V
Conversión Máxima	NA	29% at 68 μW	85.5% at 56.4 μW	NA	80% at 5 mW	78% NA	68% at 65 mW

Tabla 5.12: Comparación de este trabajo con recolectores de energía híbrido consultados en el estado del arte.

5.2. VENTAJAS DEL SISTEMA DE COSECHA DE ENERGÍA REALIZADO

Existe cierta incertidumbre de que la recolección de energía disponible en el medio ambiente se considera como un experimento de laboratorio no lo suficientemente maduro debido a que los dispositivos que recolectan la energía requieren de condiciones ambientales específicas, es por ello que el sector de las energías renovables se encuentra en permanente proceso de innovación para poder aumentar la eficiencia y operación en este tipo de sistemas.

Los sistemas híbridos son una alternativa prometedora que pretenden incrementar el acceso a la energía eléctrica de manera sostenible ya que combinan en un sistema de control varias fuentes energéticas debido a que la recolección de energía renovable se considera intermitente porque presenta variaciones horarias, diarias o estacionales. Estas fuentes se revelan como una herramienta fundamental y eficaz para suministrar energía limpia y eficiente.

Las ventajas que presenta el sistema híbrido de recolección de energía implementado son que 1) a partir de las fuentes que dispongan de la energía ésta se almacena en un capacitor para después poder ser procesada y almacenada en un supercapacitor para su uso futuro, ya que a comparación de [68] que asigna intervalos de tiempo a cada una de las fuentes no se sabe si disponen de la energía recolectada por lo que se considera que si la fuente dispone de dicha energía pero no tiene el tiempo asignado ésta se puede desper-

diciar y cuando vuelva a tener el intervalo de tiempo probablemente ya no disponga de ella; 2) con ayuda del microcontrolador mediante una lectura analógica-digital aprovechar la energía que la fuente disponga; 3) El sistema cuenta con un único control MPPT que ajusta el 50 % o el 80 % del V_{oc} dependiendo la fuente que entre en función lo cual reduce el costo, tamaño y número de componentes a utilizar; 4) El sistema es capaz de autoalimentarse. 5) los elementos que utiliza el sistema de cosecha de energía como lo son la celda solar y el elemento piezoeléctrico no necesitan costos de operación y mantenimiento.

Para la implementación del sistema híbrido de cosecha de energía basado en tres fuentes se estimó un costo de \$6178.00 (Seis mil ciento setenta y ocho) pesos mexicanos. Se menciona que no se considero la herramienta que se utilizó como taladro minitool, protoboards y tarjetas de entrenamiento como Miuva o Spunik 3 para facilitar el desarrollo del proyecto. Los elementos que se utilizaron para este proyecto así como su costo se puede consultar en la Tabla C.1 en el apéndice C.

5.3. Eficiencia del Sistema

Para tener un bosquejo sobre la energía total que podría consumir el sistema de cosecha de energía se tiene que considerar la energía que cada uno de los elementos implementados puede tener, ya que en el diseño se utilizaron elementos activos y pasivos. Por ejemplo, al utilizar los optoacopladores estos tendrán un consumo energético de entrada y salida puesto que pertenecen a la familia de los fototransistores. El microcontrolador también tendrá un consumo energético puesto que se está utilizando su recurso del convertidor analógico digital el cual tendrá un consumo de energía con base en las lecturas que se estén realizando, es decir, el número de pines en uso. Al utilizar diodos led para identificar las fuentes que están proporcionando energía, así como para saber cuándo el control MPPT entra en función también se tiene un consumo de energía puesto que ésta se disipa en forma de luz, también al utilizar diodos Shockley y un puente rectificador Shockley se tendrá un consumo de energía por muy menor que sea. Por último, se menciona que el convertidor elevador MT3608 se tiene que considerar puesto que alimenta al sistema de cosecha de energía híbrido ya que también tendrá un consumo energético determinado.

Se menciona que en una prueba realizada de 10:40 am a 11:10 am se consiguió que al quemar 10 calorías se obtuvo un voltaje de 0.64, con 24 calorías se obtuvo un voltaje de 1.07V y con 60 calorías se obtuvo un voltaje de 3.3V. La eficiencia que mostró tener el sistema fue del 68 % a 65mW. También se menciona que debido al horario en el que se realizaron las pruebas todas las fuentes aportaron energía.

En otra prueba realizada en un horario de 5:00 pm a 5:40 pm en donde todas las fuentes aportaron energía se quemó un total de 27 calorías obteniendo un voltaje de 0.86V, con 38 calorías se obtuvo un voltaje de 1.11V y con un total de 95 calorías se obtuvo un voltaje de 3.36V. Con este último voltaje se realizó la prueba de encender un diodo led en donde se obtuvo una conversión máxima del 64 % a 55.2mW en donde se obtuvieron los siguientes porcentajes de eficiencia para cada una de las fuentes utilizadas: biomecánico: 69 %, piezoeléctrico: 12.5 % y fotovoltaico: 57.5 %.

Por último, en un horario de 6:00 pm a 6:40 pm se realizó otra prueba en donde con una cantidad de 10 calorías se obtuvo un voltaje de 0.91V, con 48 calorías se obtuvo 1.31V y finalmente con 60 calorías se obtuvo un voltaje de 2.75V. Con este voltaje y conectando un diodo led la eficiencia que mostro tener el sistema de cosecha de energía fue del 59 % a 30mW en donde los porcentajes de eficiencia para cada una de las fuentes fue 70 % para el elemento biomecánico, 12.5 % para el elemento piezoeléctrico y 0 % para la celda solar puesto que no había irradiación alguna sobre ésta.

La Figura 5.9 muestra cómo se realizó el análisis de carga en las diferentes condiciones de uso que se experimentaron al conectar un diodo led el cual requiere un voltaje de aproximadamente 1.6V y una corriente de alrededor de 10mA. Este elemento nos ayudó a determinar la potencia promedio que se puede obtener de la energía recolectada.



Figura 5.9: Eficiencia del sistema de cosecha de energía en diferentes condiciones.

La gráfica de la Figura 5.10 muestra los porcentajes en los que se obtuvo la eficiencia del sistema ante diferentes escenarios de prueba los cuales son “temprano” en donde se

obtuvo una eficiencia del sistema de 68 % con 65mW, “tarde” con una eficiencia del 64 % con 55.2mW y “noche” con una eficiencia del 59 % con 30mW.

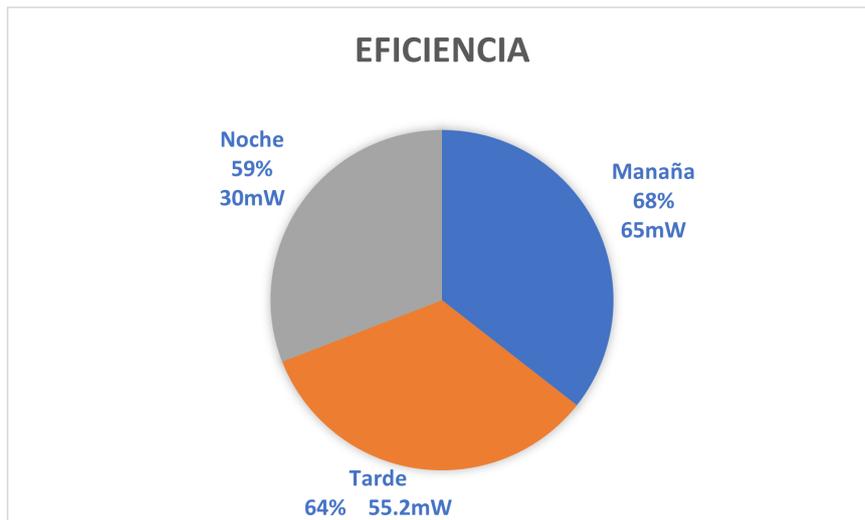


Figura 5.10: Eficiencia del sistema de cosecha de energía en diferentes condiciones.

En la Tabla 5.13 se comparan las calorías y el voltaje obtenido durante las diferentes pruebas que se realizaron y de manera gráfica estos datos se muestran en la Figura 5.11.

Mañana		Tarde		Noche	
voltaje [V]	Calorías	Voltaje [V]	Calorías	Voltaje [V]	Calorías
0.64	10	0.86	27	0.91	10
1.07	24	1.11	38	1.31	48
3.3	60	3.36	95	2.65	60

Tabla 5.13: Comparación de voltaje obtenido y calorías quemadas en diferentes condiciones de uso.

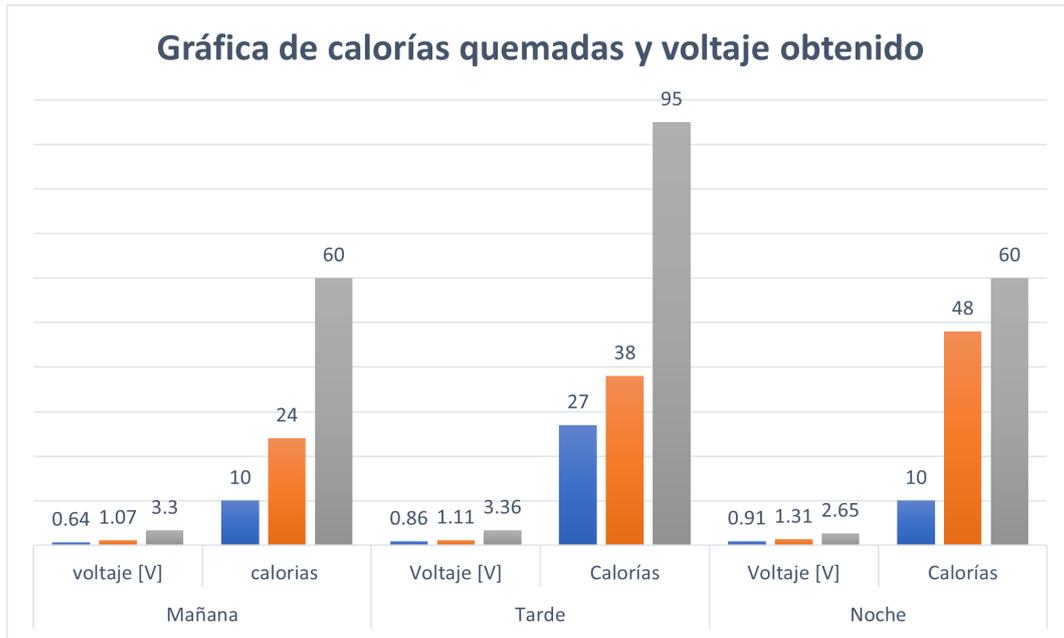


Figura 5.11: Comparación de calorías quemadas y voltaje obtenido en diferentes condiciones de uso.

Durante las pruebas que se hicieron al paso del día, la energía recolectada en un determinado tiempo y la cual proporciona un voltaje se considera como un voltaje de circuito abierto (V_{oc}) debido a que éste se está almacenando en un supercapacitor y no está conectado a una carga.

Capítulo 6

CONCLUSIONES Y TRABAJO A FUTURO

Con la realización de este trabajo de investigación se desarrolló un sistema híbrido de recolección de energía que involucra tres fuentes, estas son: elemento piezoeléctrico que proporciona un voltaje máximo de 1.2V el cual se obtiene a partir de las vibraciones que se generen en el cuerpo humano, una celda solar que proporciona un voltaje de 1.7V en condiciones de radiación lumínica y un elemento biomecánico que proporciona un voltaje de 4V a partir del ciclo de la marcha humana, siendo este último la fuente que proporciona más energía a nuestro sistema híbrido. En conjunto, estas tres fuentes en el diseño del sistema de recolección de energía proporcionan un voltaje máximo de 3.5V que se almacena en un supercapacitor de 1F a 5.5V proporcionando una energía de 6.125J, energía que se puede utilizar para alimentar dispositivos de bajo consumo.

De acuerdo con el análisis estadístico se predijo que en la condición “caminar” al recorrer una distancia de 1394m, en la condición de “trotar” al recorrer la distancia de 2874m y en la condición de “marchar” al recorrer la distancia de 6812m se puede obtener el voltaje máximo de 3.5V. Además, de acuerdo con el análisis estadístico, este sistema híbrido presentó resultados similares en los obtenidos a nivel laboratorio con respecto a las pruebas de campo que se realizaron.

La eficiencia que mostró tener el sistema de cosecha de energía en diferentes condiciones de uso fue del 68 % con una potencia de 65mW para escenario de la mañana, una eficiencia del 64 % con una potencia del 55.2mW para la transición de la tarde y una eficiencia del 59 % a 30mW correspondiendo al paso de la noche.

Para el desarrollo de este tema que lleva por nombre “Sistema Cosechador de Energía Híbrido Basado en Tres Fuentes”, se consideró la topología PowerORing que originalmente

utiliza diodos. Para tener una mejor eficiencia evitando el consumo de energía en estos, se utilizaron optoacopladores para así tener un mejor control con ayuda de un microcontrolador y en conjunto con el chip de harvesting ADP5090 en el aprovechamiento de la energía cuando las diferentes fuentes dispongan de ella, ya que cada una proporcionara energía ante diferentes escenarios o condiciones de uso.

Con base en los objetivos establecidos se logró conocer y determinar las características y parámetros que proporcionó cada una de las fuentes que se utilizaron. Se realizaron pruebas experimentales en conjunto con simulaciones del sistema de recolección de energía para saber cómo sería el comportamiento de nuestro sistema. Se implementó a nivel discreto con elementos off-the-shelf el diseño del recolector de energía híbrido para poder realizar las pruebas de campo necesarias y poder realizar un análisis ANOVA.

Para finalizar, como trabajo futuro se puede considerar el uso de un sistema de control en configuración “Compuerta de Transmisión” utilizando interruptores MOSFET para aprovechar los diferentes niveles de energía que las fuentes proporcionan, ya que al ser un sistema de recolección de energía que considera el uso de diferentes fuentes estas proporcionarán un voltaje mayor o menor dependiendo las condiciones ambientales o de uso en que se encuentren. Adicionalmente, como se realizó un análisis estadístico se pretende hacer una evaluación extensiva del sistema para verificar que recolecta dicha energía con los resultados de distancia pronosticados.

Apéndice A

Códigos Implementados

A.1. Código implementado para seleccionar el MPPT a partir de una sola fuente.

```
#include <main.h>

void main()
{
    set_tris_a(0b00000111); //Pongo el RA0,RA1,RA2 como entrada
    set_tris_d(0b00000000); //Pongo el Puerto D como Salida
    set_tris_b(0b00000000); //Pongo el Puerto B como Salida
    setup_adc_ports(all_analog); //Pongo todo el puerto A analogo
    setup_adc(adc_clock_internal); //Selecciono reloj interno para ADC

    int i =0; // CELA SOLAR
    int j =0; // PIEZOELECTRICO
    int k =0; // BIOMECANICO

    while(TRUE)
    {
        set_adc_channel(0); // Selecciono canal A0 de lectura y asigno
                           // valor a variable temporal
        i = read_adc();

        if (i>210) //Mayor energia de la celda
        {
```

```

    output_bit( PIN_D0, 1); //Pone el MPPT al 80%
}

if (i<209) //Mayor energia de la celda
{
    output_bit( PIN_D0, 0); //Pone el MPPT al 80%
}

delay_ms(50);

}
}

```

A.2. Código implementado para seleccionar la fuente que está proporcionando energía.

```

#include <main.h>

void main()
{
    set_tris_a(0b00000111); //Pongo el RA0,RA1,RA2 como entrada
    set_tris_d(0b00000000); //Pongo el PuertoD como Salida
    set_tris_b(0b00000000); //Pongo el PuertoB como Salida
    setup_adc_ports(all_analog); //Pongo todo el puerto a analogo
    setup_adc(adc_clock_internal); //Selecciono reloj interno para ADC

    int i =0;
    // int j =0;
    // int k =0;

    while(TRUE)
    {
        set_adc_channel(0); //Selecciono canal A0 de lectura y asigno
                               //valor a variable temporal
        i = read_adc();

        //Comparo el valor de cada variable entre si, elijo la de mas

```

```
//alta energia y paso a la entrada de la tarjeta configurando  
//el valor de MPPT de acuerdo al tipo de sensor que uso
```

```
if (i>210) //Mayor energia de la celda  
{  
  
output_bit( PIN_D0, 1); //transistor CELDA ACTIVADO  
delay_ms(2);  
output_bit( PIN_D1, 0); //transistor BIO DESACTIVADO  
  
}  
if (i<209) //Mayor energia de la celda  
{  
  
output_bit( PIN_D0, 0); //Transistor CELDA DESACTIADO  
delay_ms(2);  
output_bit( PIN_D1, 1); //transistor BIO ACTIVADO  
  
}  
  
delay_ms(50);  
  
}  
}
```

A.3. Código para selección del MPPT de acuerdo con la fuente en uso.

```
#include <main.h>  
  
void main()  
{  
    set_tris_a(0b00000111); //Pongo el RA0,RA1,RA2 como entrada  
    set_tris_d(0b00000000); //Pongo el PuertoD como Salida  
    set_tris_b(0b00000000); //Pongo el PuertoB como Salida  
    setup_adc_ports(all_analog); //Pongo todo el puerto A analogo  
    setup_adc(adc_clock_internal); //Selecciono reloj interno para ADC
```

```

output_D(0X00);

float i =0; // Celda solar

while(TRUE)
{
set_adc_channel(0); //Selecciono canal A0 de lectura y
                    //asigno valor a variable temporal
    i = read_adc();

    if (i>210) //Mayor energia de la celda (Mayor a 1V)
    {
        output_bit( PIN_D0, 0); //transistor BIO - desactivado
        output_bit( PIN_D2, 1); //MPPT 75% - activado
        delay_ms(20);
        output_bit( PIN_D1, 1); //transistor CELDA - activado
    }
    if (i<209) //Menor energia de la celda (Menor a 1V)
    {
        output_bit( PIN_D0, 1); //Transistor BIO - activado
        output_bit( PIN_D2, 0); //MPPT 75% - Desactivado
        delay_ms(20);
        output_bit( PIN_D1, 0); //transistor CELDA - desactivado
    }

    delay_ms(50);
}
}

```

A.4. Código para sistema híbrido de recolección de energía a partir de 3 fuentes con ajuste del control MPPT de acuerdo con la fuente en uso.

```

#include <18f4550.h>
#define device adc=10
#define USE_DELAY(CLOCK=20000000)
#define FUSES XT,NOPROTECT,NOWDT,NOBROWNOUT,NOPUT,NOLVP

```

```

#BYTE PORTA= 5 // Ubicacion de mapa de memoria del puerto A en 05h
#BYTE PORTD= 8 // Ubicacion de mapa de memoria del puerto D en 08h
#BYTE ESTADO = 0x22 //Registro que almacena el estado de acuerdo
                    //a las entradas

int estado_temp = 0;
int siguiente_estado = 0;
//float bits0=0; //Variable almacena Lectura analogica canal 0 / Biomecanico
float bits1=0; //Variable almacena Lectura analogica canal 1 / Piezoelectrico
float bits2=0; //Variable almacena Lectura analogica canal 2 / Fotocelda

//Sub rutinas de estado de salidas
void fotocelda ()
{
    output_bit( PIN_D0, 0); // Bit biomecanico
    output_bit( PIN_D1, 1); // Bit fotocelda - ACTIVADO
    output_bit( PIN_D2, 0); // Bit piezoelectrico
    output_bit( PIN_D4, 1); // Bit MPPT - ACTIVADO
}
void piezoelectrico ()
{
    output_bit( PIN_D0, 0); // Bit biomecanico
    output_bit( PIN_D1, 0); // Bit fotocelda
    output_bit( PIN_D2, 1); // Bit piezoelectrico - ACTIVADO
    output_bit( PIN_D4, 0); // Bit MPPT
}
void biomecanico ()
{
    output_bit( PIN_D0, 1); // Bit biomecanico - ACTIVADO
    output_bit( PIN_D1, 0); // Bit fotocelda
    output_bit( PIN_D2, 0); // Bit piezoelectrico
    output_bit( PIN_D4, 0); // Bit MPPT
}
//Sub rutinas de estado de salidas

//Sub rutina deseleccion de estado
int estado_presente ()
{
    /*//////////////////////////////////////
    if (bits0 > 409) //Valor de activacion BIOMECANICO

```

```

    {
        #asm
            BSF ESTADO,0
        #endasm
    }
    else
    {
        #asm
            BCF ESTADO,0
        #endasm
    }
    //////////////////////////////////////*/

    //////////////////////////////////////
    if (bits1 > 102) //Valor de activacion PIEZOELECTRICO
    {
        #asm
            BSF ESTADO,1
        #endasm
    }
    else
    {
        #asm
            BCF ESTADO,1
        #endasm
    }
    //////////////////////////////////////

    //////////////////////////////////////
    if (bits2 > 204) //Valor de activacion FOTOCELDA
    {
        #asm
            BSF ESTADO,2
        #endasm
    }
    else
    {
        #asm
            BCF ESTADO,2

```

```

        #endasm
    }
    //////////////////////////////////////

    estado_temp = ESTADO;
    return (estado_temp);

}

//Sub rutina de seleccion de estado

void main()
{
    set_tris_a(0 b00000111);           //Pongo el RA0 como entrada
    set_tris_b(0);
    set_tris_c(0);                     //Pongo el PuertoC como Salida
    set_tris_d(0);                     //Pongo el PuertoD como Salida
    setup_adc_ports(all_analog);       //Pongo todo el puerto a analogo
    setup_adc(adc_clock_internal);     //Selecciono reloj interno para conversio
    output_D (0x00);

#asm
    CLRF ESTADO
#endasm
    while(1)
    {
        /*////BIOMECANICO
        set_adc_channel(0);           //Selecciono el canal 0 (RA0)
        delay_ms(5);                 //llamo retardo de 1 ms
        bits0=read_adc();            //Guarde el dato en bits0
        */

        ////PIEZOELECTRICO
        set_adc_channel(1);           //Selecciono el canal 1 (RA1)
        delay_ms(5);                 //llamo retardo de 1 ms
        bits1=read_adc();            //Guarde el dato en bits1

        ////FOTOCELDA
        set_adc_channel(2);           //Selecciono el canal 2 (RA2)
        delay_ms(5);                 //llamo retardo de 1 ms

```

```

    bits2=read_adc();           //Guarde el dato en bits2

    siguiente_estado = estado_presente(); //Obtenemos codificacion para
                                        //valores de entrada

    output_C (siguiente_estado); //lo publicamos

    switch(siguiente_estado)
    {
    /* case 0x01:
        biomecanico ();
            break;*/
    case 0x02:
        piezoelectrico ();
            break;
    case 0x03:
        piezoelectrico ();
            break;
    case 0x04:
        fotocelda ();
            break;
    case 0x05:
        fotocelda ();
            break;
    case 0x06:
        piezoelectrico ();
            break;
    case 0x07:
        piezoelectrico ();
            break;
    default:
        biomecanico ();
    }
}
}
}

```

Apéndice B

Interruptor MOSFET Back-To-Back

B.1. Interruptor MOSFET Back-To-Back

Una alternativa más para tener control sobre las fuentes que proporcionarán energía es utilizar la configuración “Back-To-Back” con transistores MOSFET. Durante el desarrollo del sistema de recolección de energía híbrido se hace mención que al utilizar los transistores MOSFET como interruptores se aseguraría un control sobre el flujo de la energía que proporcionan cada una de las fuentes que se están utilizando. El problema que surgió al recolectar la energía a partir de 2 fuentes fue que se presentó un flujo de corriente inverso no deseado y esto se debe al diodo corporal que está conectado entre el DRENAJE y el SURTIDOR del transistor MOSFET (IRLZ44), como lo muestra la Figura B.1.

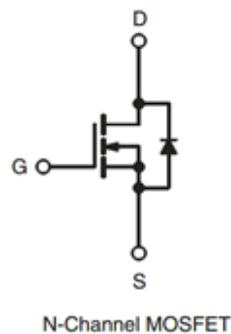


Figura B.1: Diodo corporal de transistor MOSFET canal N (IRLZ44).

Una de las alternativas que se tenían fue utilizar un diodo como se muestra en la Figura B.2 para evitar un flujo de corriente inverso hacia la fuente de energía, pero se sabe que el diodo tendrá una caída de tensión (aproximadamente 0.7V para diodos de silicio o 0.3V para diodos de germanio) que corresponde al voltaje de umbral de polarización directa.

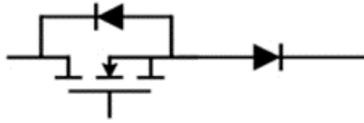


Figura B.2: Transistor MOSFET y diodo conectados en serie.

Para evitar esa caída de tensión, se tiene como alternativa utilizar dos transistores del mismo tipo (Canal N o canal P) conectados en serie, pero en direcciones opuestas, la cual evitara un flujo de corriente en ambos sentidos cuando los transistores MOSFET no estén en conducción. Esta configuración se conoce como interruptor bidireccional o configuración Back-To-Back la cual se muestra en la Figura B.3.

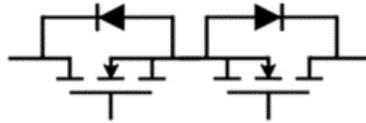


Figura B.3: Configuración Back-To-Back.

Esta configuración tiene 4 estados: ON-ON, ON-OFF, OFF-ON y OFF-OFF.

- **ON-ON:** La corriente puede fluir en ambas direcciones a través del circuito (a través de ambos transistores).
- **ON-OFF:** La corriente puede fluir de izquierda a derecha (a través del FET izquierdo y el diodo derecho) pero no de derecha a izquierda (debido al diodo derecho).
- **OFF-ON:** La corriente puede fluir de derecha a izquierda (a través del FET derecho y el diodo izquierdo) pero no de izquierda a derecha (debido al diodo izquierdo).
- **OFF-OFF:** La corriente no puede fluir en ninguna dirección, porque con ambos FET apagados todo lo que tiene son dos diodos que bloquean el flujo de corriente en cualquier dirección.

Esta configuración o topología tiene la opción de bloquear la corriente en ambas direcciones o permitir el flujo de corriente en cualquier dirección dependiendo de cómo esté la compuerta activada.

Para recolectar energía de tres fuentes partiendo de esta configuración, se procedió a realizar una simulación del sistema con el código implementado previamente como se muestra a continuación:

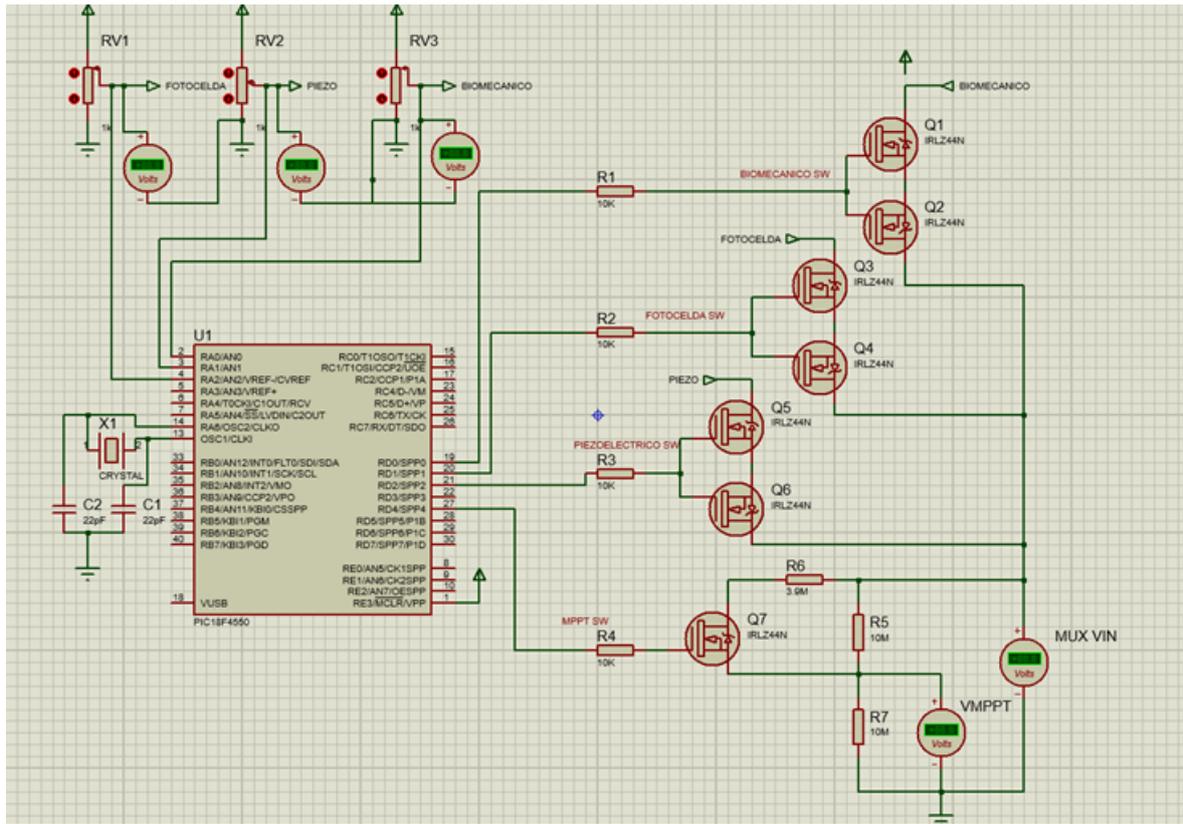


Figura B.4: Simulación del sistema de recolección de energía utilizando la configuración back-to-back con transistores MOSFET.

La Figura B.4 muestra la simulación del sistema de recolección de energía híbrido utilizando la configuración Back-To-Back con transistores MOSFET. La energía almacenada en cada capacitor se simula con un potenciómetro conectado a una alimentación de 5V, en donde para verificar el voltaje de cada fuente se puede visualizar con ayuda de voltímetros.

En la Figura B.5, se observa que cuando el elemento biomecánico entrega energía, el voltaje de entrada de 5V que se proporcione al chip ADP5090 NO será el mismo, ya que se presenta una caída de tensión de 2.08V en el transistor Q1 y por consecuencia el voltaje MPPT NO corresponde al 50 % del V_{oc} que se espera, por lo que no se tiene una buena transferencia de energía.

En la Figura B.6 se observa que cuando el elemento piezoeléctrico proporciona energía, el voltaje de entrada de 4.5V que se proporcione al chip ADP5090 no llega completo, ya que se presenta un consumo de energía de 1.59V en el transistor Q5 el cual corresponde al voltaje restante que entrega el elemento piezoeléctrico y por consecuencia tampoco se tiene el 50 % del V_{oc} .

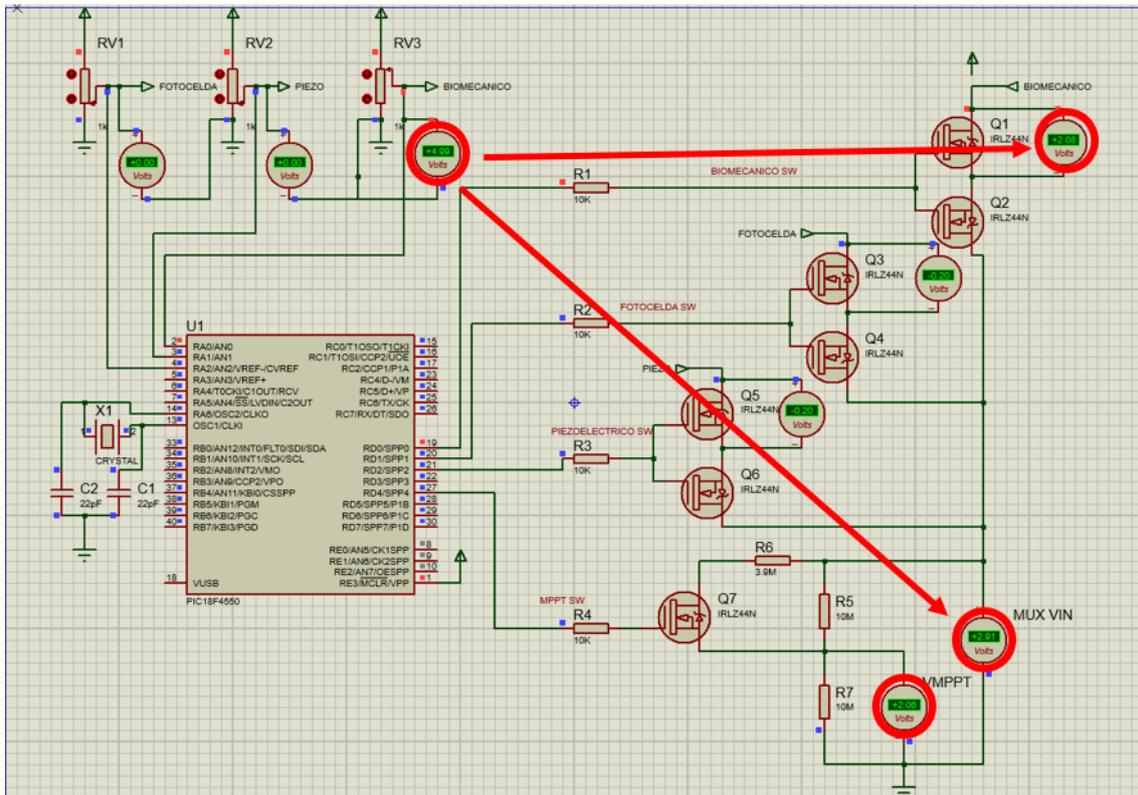


Figura B.5: Elemento biomecánico entregando energía.

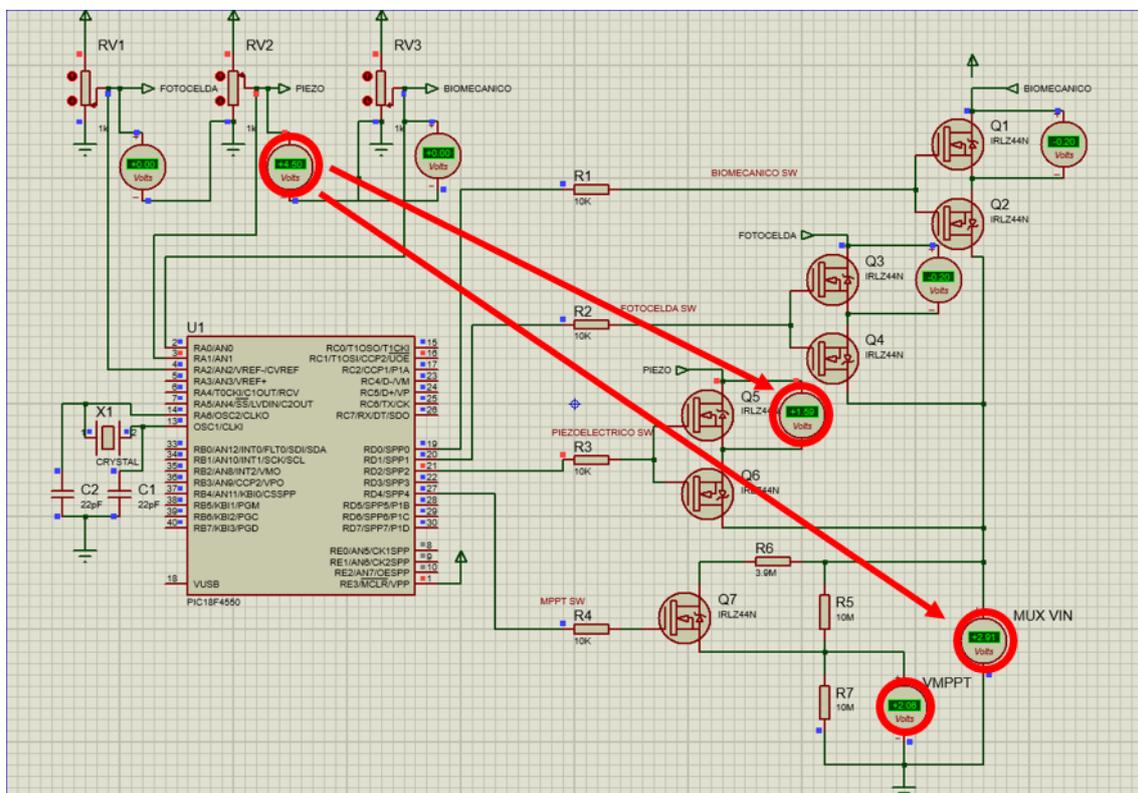


Figura B.6: Elemento piezoeléctrico entregando energía.

En la Figura B.7 se puede observar el mismo comportamiento para la celda solar, ya que al proporcionar 4V éste no llega completo al chip ADP5090 debido a que en el transistor Q3 se presenta una caída de tensión de 1.09V el cual corresponde al voltaje restante que entrega la celda solar al chip ADP5090.

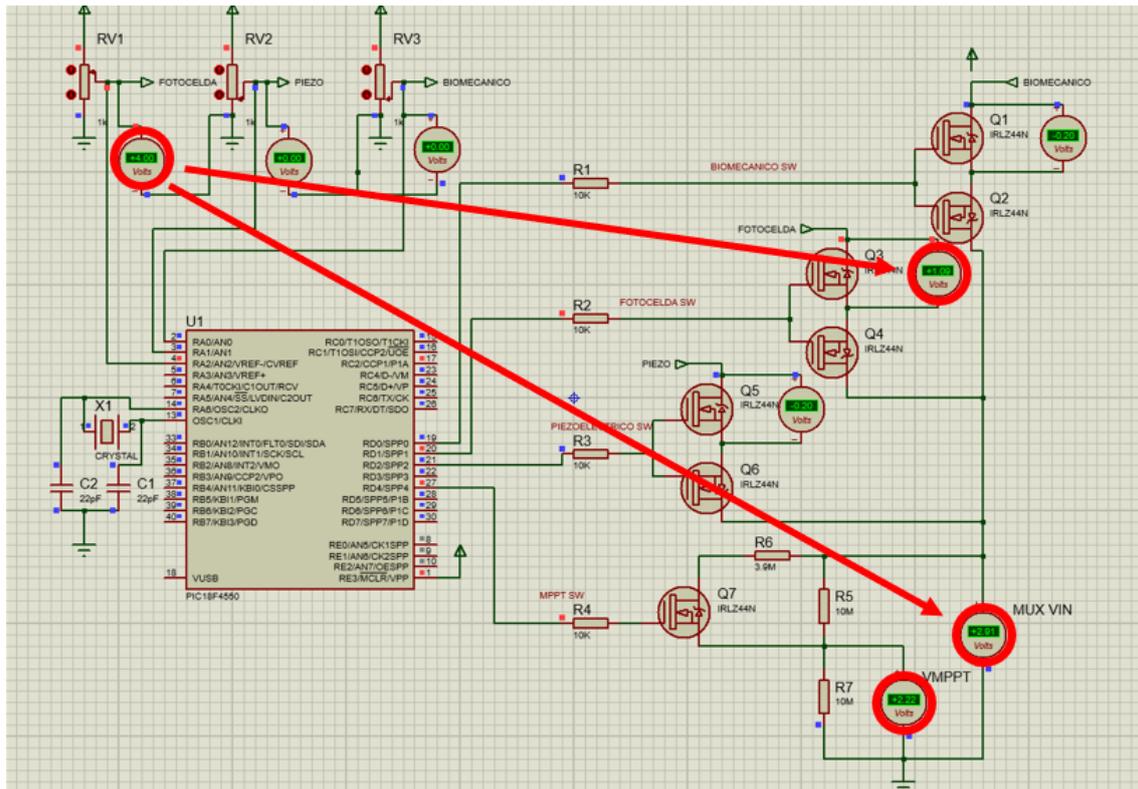


Figura B.7: Celda solar entregando energía.

Como se puede observar en la Figura B.5, B.6 y B.7 en el voltímetro MUX V_{in} el máximo valor de entrada que se puede proporcionar al chip ADP5090 es de 3V, aunque las fuentes estén proporcionando más energía, esto se debe a que después de este valor en los transistores Q1, Q3, y Q5 se presenta una caída de tensión no deseada la cual corresponde al voltaje restante que esté entregando la fuente en ese momento.

La Figura B.8, B.9 y B.10 muestra que si las fuentes proporcionan menos de 3v éste será el mismo que reciba a la entrada el chip de energy harvesting ADP5090, pero que sin embargo, el voltaje MPPT no corresponderá al 50 % u 80 % del V_{oc} que se espera sea.

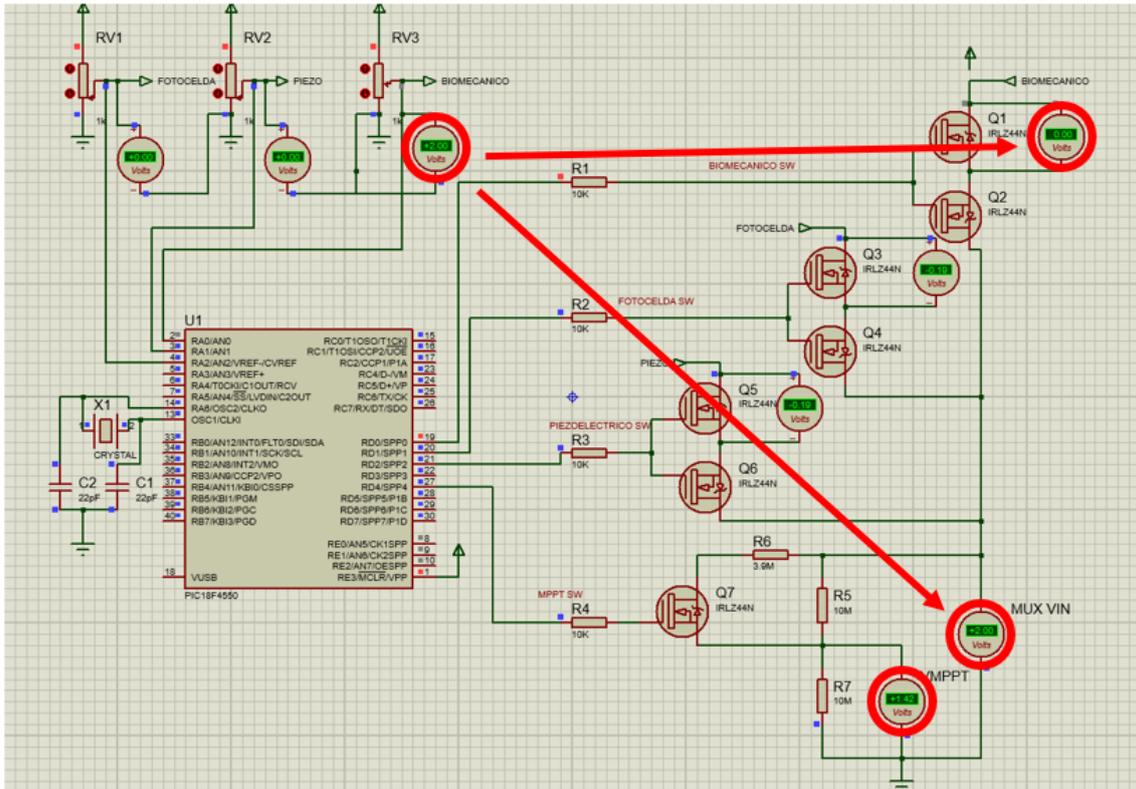


Figura B.8: Elemento biomecánico proporcionando menos de 3V.

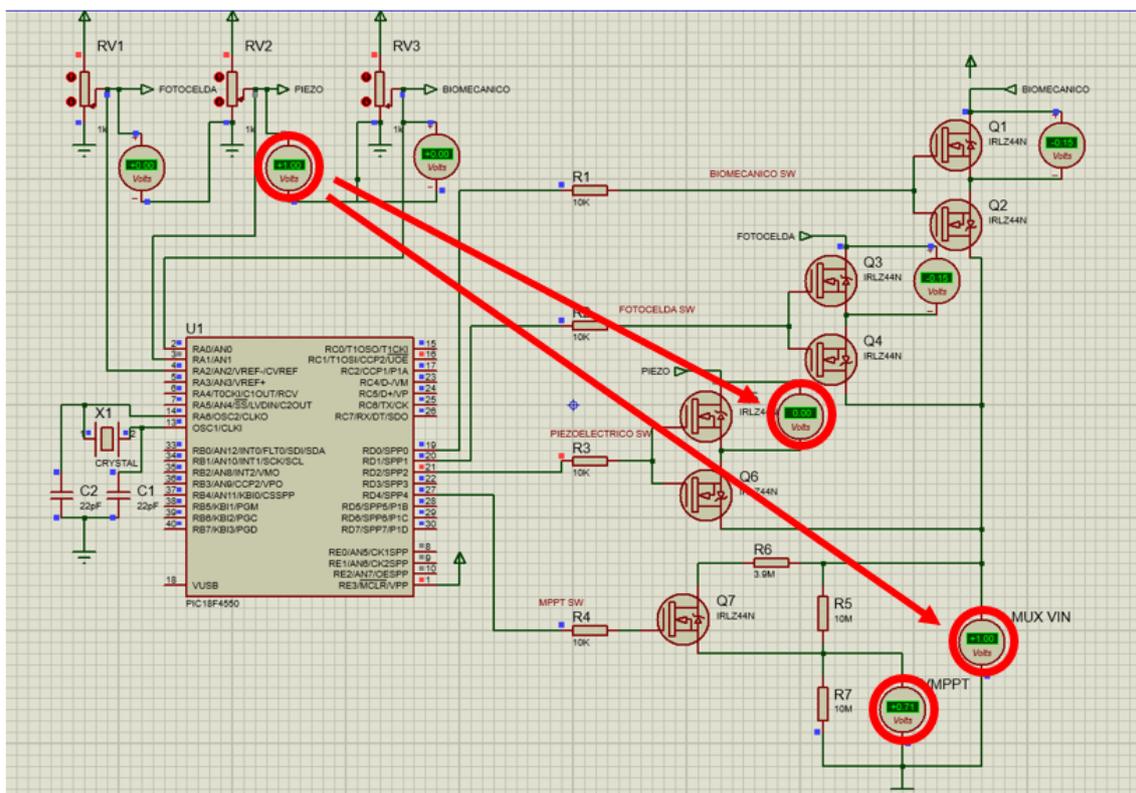


Figura B.9: Elemento piezoeléctrico proporcionando menos de 3V.

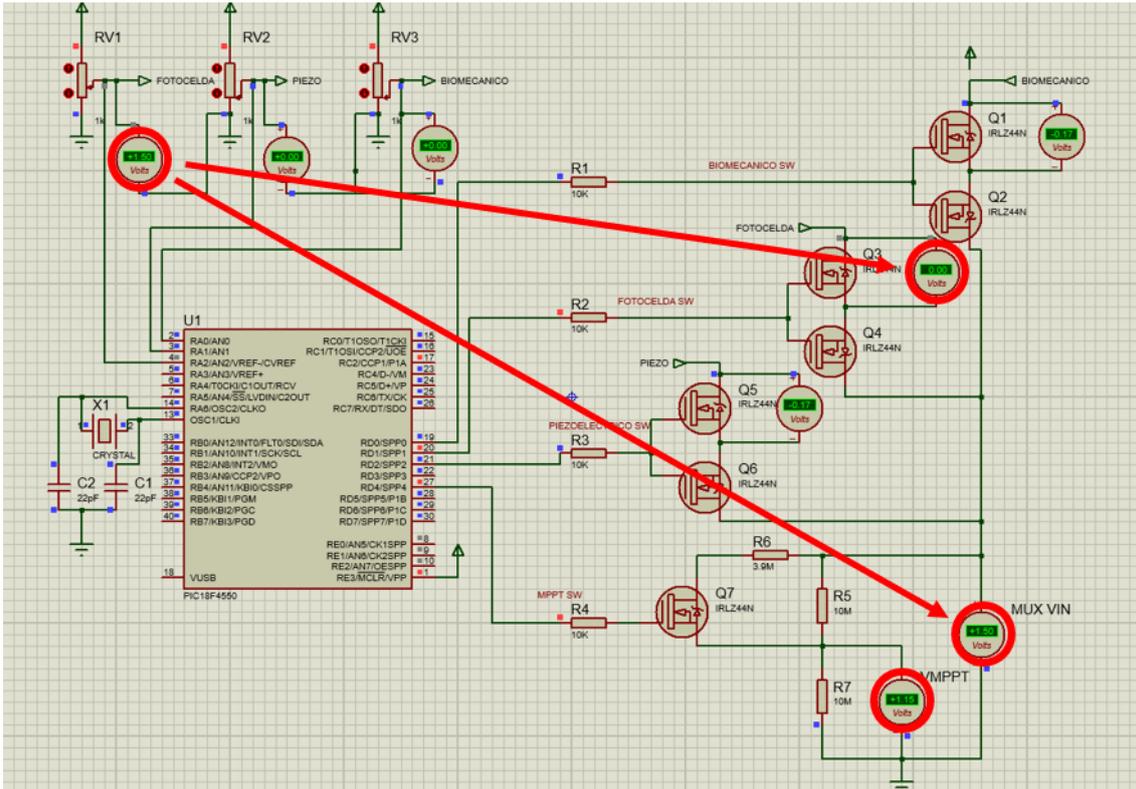


Figura B.10: Celda solar proporcionando menos de 3v.

Para comprobar el comportamiento presentado en la simulación, se procedió a implementar la conexión en físico utilizando dos arreglos de transistores MOSFET, las fuentes que se utilizan son dos cargadores a 5.16V y 5.33V, y para visualizar si tienen un flujo de corriente se conecta un diodo led como se muestra en la Figura B.11.

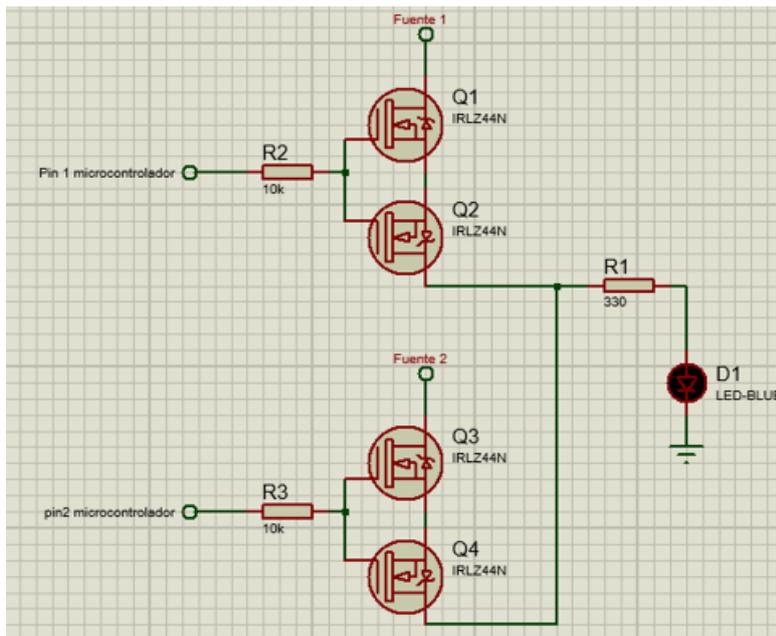


Figura B.11: Diagrama de conexión para la cosecha de energía a partir de 2 fuentes.

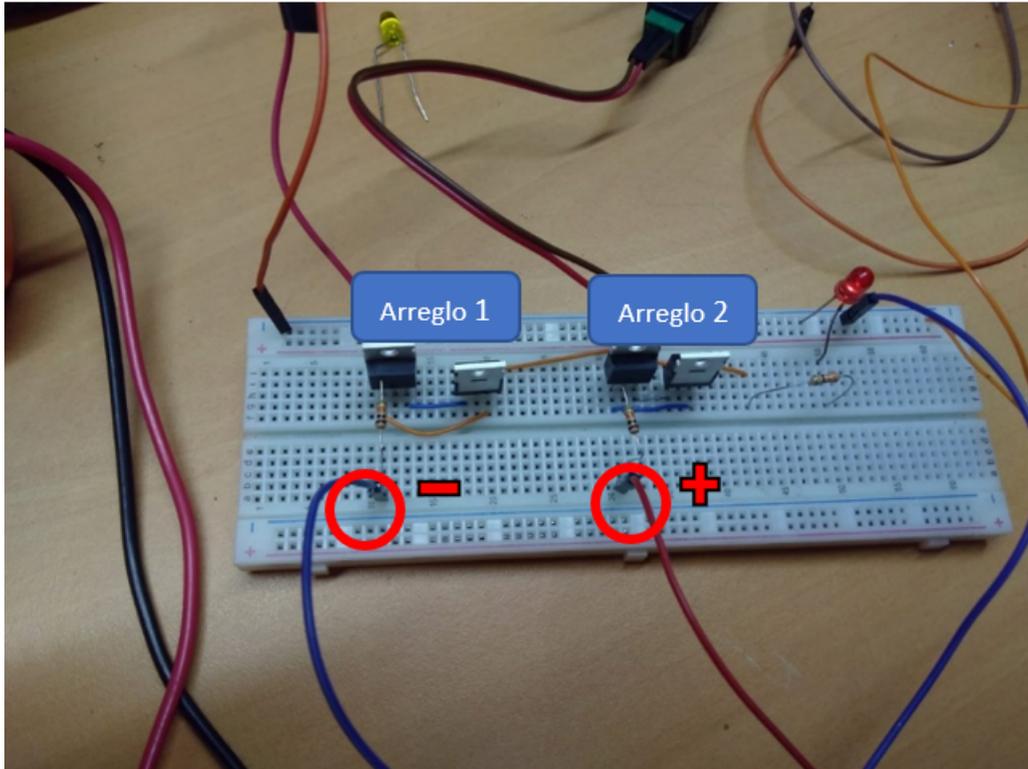
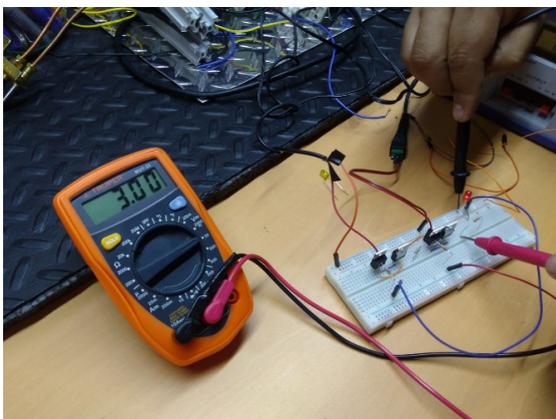
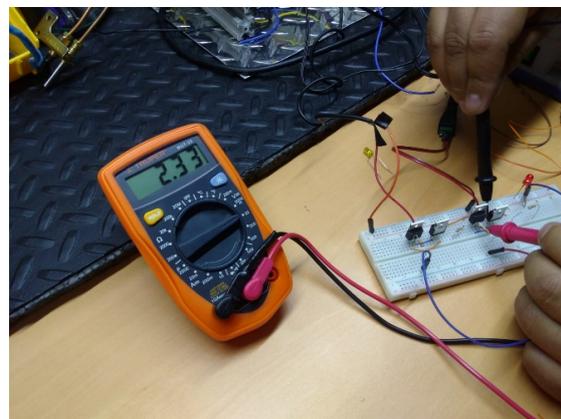


Figura B.12: Implementación física de transistores en configuración Back-To-Back y activación del arreglo 2.

En la Figura B.12 se puede observar la implementación física del diagrama de la Figura B.11, en donde el voltaje de activación para el pin del microcontrolador se emula con un voltaje a 5v, el voltaje del cargador a 5.16V se asinga al arreglo_1 y la fuente de 5.33V al arreglo_2, respectivamente.



(a) Voltaje entre resistencia y led.



(b) Compuertas activadas del arreglo 2.

Figura B.13: Flujo de energía a través del arreglo 2.

En la Figura B.12 se puede observar que las compuertas del arreglo_1 no están activadas por lo que no hay un flujo de corriente y las compuertas del arreglo_2 se activan permitiendo el flujo de corriente hacia el led. En la Figura B.13(a) se observa que el voltaje entre la resistencia y el led corresponde a 3V y no a los 5.33v que proporciona la fuente directamente, y en la Figura B.13(b) se observa que el voltaje V_{DS} (entre el drenaje y el surtidor) corresponde a la diferencia de los 5V que son 2.33V.

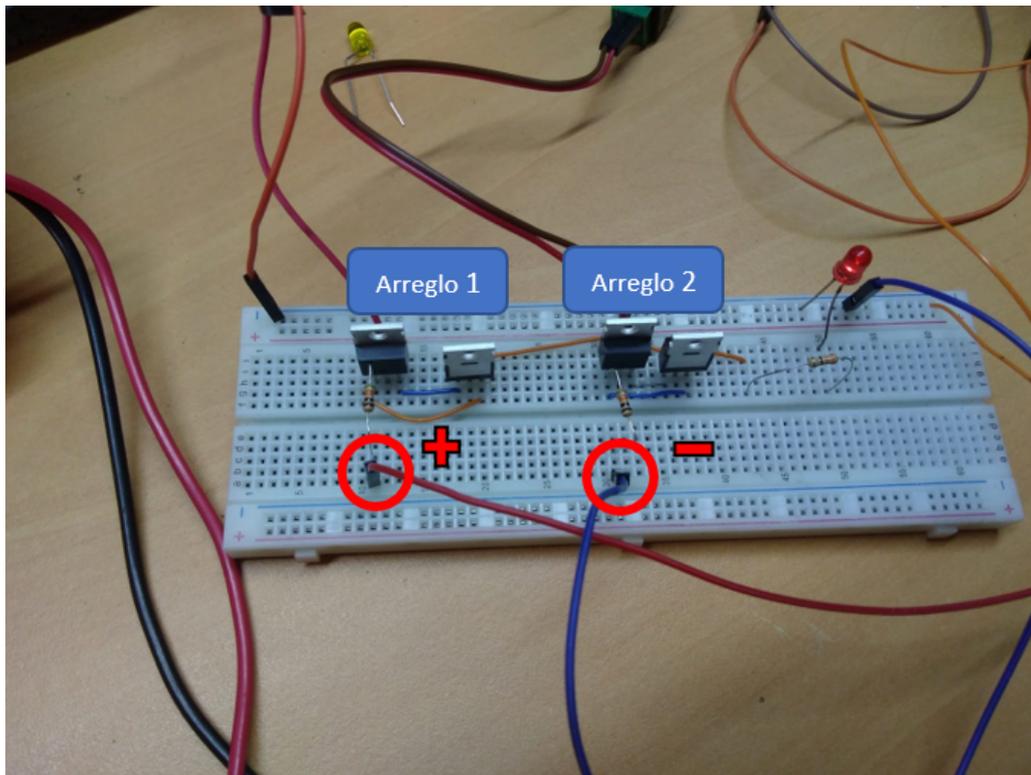
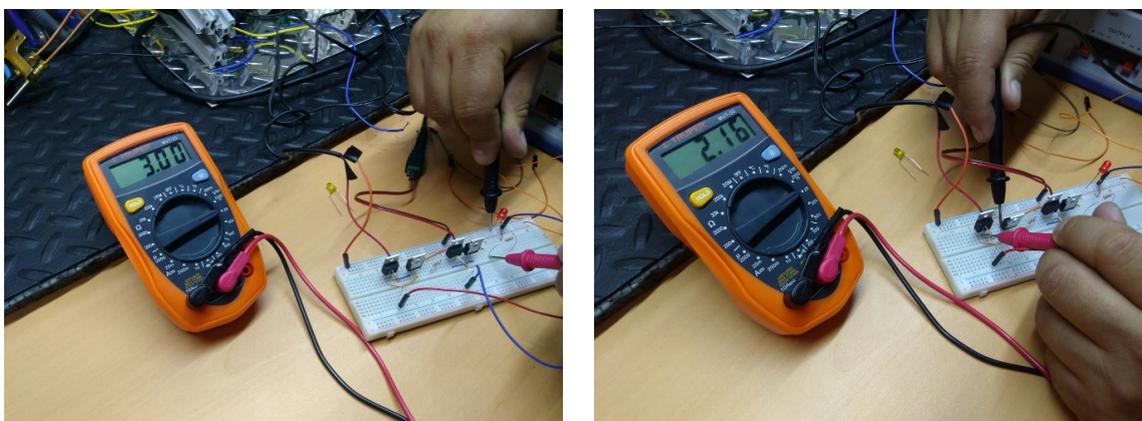


Figura B.14: Activación del arreglo 1 en configuración back-to-back.

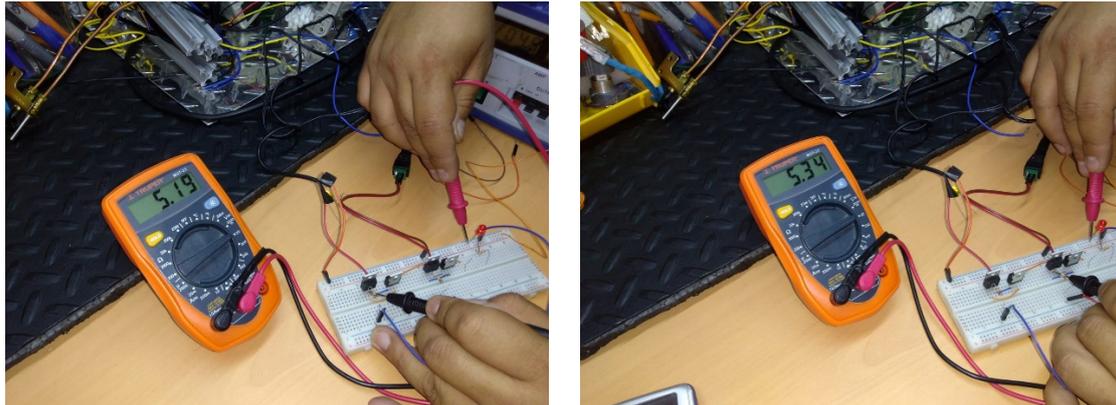


(a) Voltaje entre resistencia y led

(b) Compuertas activadas del arreglo 1.

Figura B.15: Flujo de energía a través del arreglo 1.

En la Figura B.14 se puede observar que ahora las compuertas del arreglo_2 no están activadas por lo que no hay un flujo de corriente y las compuertas del arreglo_1 se activan permitiendo el flujo de corriente hacia el led. En la Figura B.15(a) se observa que el voltaje entre la resistencia y el led corresponde a 3V y no a los 5.16v que proporciona la fuente, y en la Figura B.15(b) se observa que el voltaje V_{DS} (entre el drenaje y el surtidor) corresponde a la diferencia de los 5.16V que son 2.16V.



(a) Fuente de voltaje de 5.19v para arreglo_1 (b) Fuente de voltaje de 5.34v para arreglo_2

Figura B.16: Medición de fuentes de energía.

En la Figura B.16(a) se aprecia que el voltaje de 5.19V corresponde al arreglo_1 y en la Figura B.16(b) que el voltaje de 5.34V corresponde al arreglo_2.

Con la implementación física del diagrama de la Figura B.11 para obtener un mejor control sobre la energía que proporcionan las fuentes, se pudo observar el mismo comportamiento que tiene la simulación como lo muestra la Figura B.5, B.6 y B.7. Esto no es un fenómeno raro que no se pueda discutir, ya que es un problema de operación del transistor y que se puede deducir con análisis de transistores, llegando a la conclusión de que para dejar pasar voltajes bajos se deben utilizar transistores NMOS y si se van a dejar pasar voltajes altos se deben utilizar transistores PMOS. En caso de manejar ambos voltajes se debe utilizar una compuerta de transmisión (transmission gate) que es un circuito en donde se ponen en paralelo un transistor NMOS con un transistor PMOS.

Apéndice C

Costo de implementación y Artículos Publicados

Material	Precio Unitario	Cantidad	Total
Optoacopladores PC817	10	4	40
Resistencias 330 Ω	1	8	8
Resistencias 3.9M Ω	1	1	1
Resistencias 10 M Ω	1	2	2
Resistencias 51 Ω	1	4	4
Capacitores 220 (22pF)	2	2	4
Capacitores 104 (100nF)	2	1	2
Capacitores 47 μ F	6	1	6
Capacitores 4.7 μ F	5	3	15
Clemas (2 terminales)	9	7	63
Clemas (3 terminales)	11	5	55
Puente rectificador GBL06	35	1	35
Ácido férrico	39	1	39
Placa fenólica 15x10cm	30	1	30
Diodo Led	4	8	32
Diodo Zener 3V	5	3	15
Push button	5	1	5
Cristal 20MHz	15	1	15
Microcontrolador 18f4550	250	1	250
Base 40 pines	35	1	35
Pines macho (Barra)	12	1	12
Jumper (cables dupont)	50	2	100
Jumper para pines	5	1	5
Chip ADP5090	1700	1	1700
Elevador MT3608	38	1	38
Interruptor on/off	10	1	10
Terminales p/interruptor	10	2	20
Caja	150	1	150
Celda solar	45	1	45
Piezoeléctrico	900	1	900
Cangurera	60	1	60
Gorra	50	1	50
Remanufactura biomecánico	900	1	900
Impresión CAD pzs biomecánico	500	1	500
Impresión CAD base celda Solar	100	1	100
Impresión CAD caja piezoeléctrico	300	1	300
Supercapacitor 1F / 5.5V	60	2	120
Supercapacitor 0.22 / 5.5V	70	2	140
Cable cal. 22	5	5	25
Estañó	65	1	65
Grasa p/soldar	30	1	30
Cautín	180	1	180
Adaptadores plug	12	6	72
Total	5719		6178



DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE UNA CELDA SOLAR Y SU ANÁLISIS COMPARATIVO CON EL MODELO DE UN SOLO DIODO MEDIANTE SIMULACIÓN EN LTSPICE

José A. Rodríguez Cruz, Roberto C. Ambrosio Lázaro, Víctor R. González Díaz

Facultad de Ciencias de la Electrónica, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, 4 sur #104, Puebla, Puebla, 72570, México, 222 229 5500 antonio.rodriguezcr@alumno.buap.mx, roberto.ambrosio@correo.buap.mx, vicrodolfo.gonzalez@correo.buap.mx

Johan J. Estrada López

Facultad de Matemáticas, Universidad Autónoma de Yucatán, Anillo Periférico Norte Tablaje #13615, Mérida, Yucatán. 97119, México, 999 942 3140, johan.estrada@correo.uady.mx.

RESUMEN

Actualmente, la energía solar se considera una alternativa prometedora para producir energía eléctrica limpia, sin embargo, algunos de los obstáculos que se presentan durante su implementación es mantener su eficiencia ante diferentes escenarios del clima. Este estudio presenta el análisis de una celda solar comercial que hace uso del modelo matemático Single-Diode debido a la simplicidad con la que se pueden deducir los 5 parámetros principales del modelo a partir de las curvas características de corriente-voltaje y potencia-voltaje. De esta forma se obtienen, analizan y comparan los parámetros y curvas características de manera experimental y a nivel simulación, obteniendo un margen de error mínimo del 8.6% y máximo del 24.5% entre simulación y medición.

ABSTRACT

Currently, solar energy is considered a promising alternative to produce clean electrical energy, however, some of the obstacles that arise during its implementation is maintaining its efficiency under different climate scenarios. This study presents the analysis of a commercial solar cell that makes use of the Single-Diode mathematical model due to the simplicity with which the 5 main parameters of the model can be deduced from the current-voltage and power-voltage characteristic curves. In this way, the parameters and characteristic curves are obtained, analyzed and compared experimentally and at the simulation level, obtaining a minimum margin of error of 8.6% and a maximum of 24.5% between simulation and measurement.

Palabras claves: Celda solar, curvas características, eficiencia, circuito solar equivalente, Matlab, LTSpice, resistencia R_s , resistencia R_a , recolección de energía, energías renovables.

1. INTRODUCCIÓN

Los sistemas fotovoltaicos convierten la energía solar en energía eléctrica aprovechando el recurso aparentemente inagotable del sol, haciendo de este sector uno de los de mayor crecimiento a nivel mundial. La importancia de la energía solar hace necesario el uso de herramientas que permitan diseñar y analizar el comportamiento de las celdas solares bajo diferentes condiciones de irradiación y temperatura [1]. La curva característica I-V tiene una ecuación no lineal con múltiples parámetros clasificados de la siguiente manera: 1) los proporcionados por los fabricantes, 2) los conocidos como constantes y 3) los que deben calcularse. Algunos grupos de investigación desarrollan métodos simplificados en los que no se pueden calcular algunos parámetros desconocidos; Por lo tanto, se suponen como constantes. Por ejemplo, en [6] se incluye la resistencia en serie (R_s), pero no la resistencia en paralelo (R_a) para un modelo de complejidad moderada al considerar la resistencia R_a muy grande. Otros autores descuidan las resistencias tanto R_a como R_s ; la primera por ser muy grande y la segunda por ser muy pequeña. Por otro lado, existen otros trabajos en la literatura, en los que estas dos características internas de una celda solar son muy importantes y deben ser determinadas con mayor precisión. Además de R_s y R_a , algunos autores sugieren que se deben determinar otros parámetros importantes como lo es la fotocorriente (I_{ph}), la corriente de saturación (I_0) y el factor de idealidad (n) [2].

Por otro lado, en algunas ocasiones las hojas de datos de las celdas solares que los fabricantes proporcionan no disponen de suficiente información sobre los parámetros que dependen de la irradiancia y la temperatura, por lo que en algunos supuestos con respecto a la naturaleza física del comportamiento de la celda solar son necesarios para establecer un modelo matemático [2]. Varios autores han desarrollado y diseñado distintos modelos fotovoltaicos, al igual que los han simulado con ayuda de herramientas computacionales como Matlab/Simulink o LTSpice para analizar y comprender la eficiencia que pueden proporcionar. El modelado y simulación de dispositivos fotovoltaicos para conocer su comportamiento representan una parte importante de la investigación actual en el campo de la energía solar. Las simulaciones permiten la optimización del diseño de paneles solares y sistemas de energía solar sin experimentos costosos, en cambio, el modelado con un circuito equivalente es de particular interés, porque permite la simulación conjunta de un dispositivo fotoeléctrico con electrónica periférica. La topología de circuito equivalente elegida correctamente es una parte muy importante del proceso de modelado, pero igualmente importante es la metodología correcta para extraer el conjunto óptimo de parámetros de circuito equivalente que caracterizan al dispositivo específico [4].



XLV Semana Nacional de **Energía Solar**

DEL 4 AL 8 DE OCTUBRE, 2021

Otorga la presente

CONSTANCIA

a: **José Antonio Rodríguez Cruz**

POR SU VALIOSA PARTICIPACIÓN CON EL ARTÍCULO:

“Determinación de parámetros de una celda solar y su análisis comparativo con el modelo de un solo diodo mediante simulación en LTSPICE.”

Dra. Karla G. Cedano Villavicencio
Presidenta XXI Consejo Directivo ANES
Octubre 2021

BIBLIOGRAFIA

- [1] Mahyar Shirvanimoghaddam, Kamyar Shirvanimoghaddam, Mohammad Mahdi Abolhasani, Majid Farhangi, Vaid Barsari, Hangyue Liu, Mischa Dohler, and Mino Naebe. Paving the path to a green and self-powered internet of things. 12 2017.
- [2] Salar Chamanian, Berkay Çiftci, Hasan Uluşan, Ali Muhtaroglu, and Haluk Kùlah. Power-efficient hybrid energy harvesting system for harnessing ambient vibrations. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, 66(7):2784–2793, 2019.
- [3] A. Erturk and D. J. Inman. *Introduction to Piezoelectric Energy Harvesting*. John Wiley & Sons, 2011.
- [4] H Uluşan, S Chamanian, W P M R Pathirana, Ö Zorlu, A Muhtaroglu, and H Kùlah. A triple hybrid micropower generator with simultaneous multi-mode energy harvesting. *Smart Materials and Structures*, 27(1):014002, dec 2017.
- [5] T.E. Starner and Joseph Paradiso. *Human-generated power for mobile electronics*, pages 45–1. 01 2004.
- [6] Xuan-Dien Do, Seok-Kyun Han, and Sang-Gug Lee. Optimization of piezoelectric energy harvesting systems by using a mppt method. In *2014 IEEE Fifth International Conference on Communications and Electronics (ICCE)*, pages 309–312. IEEE, 2014.
- [7] James Dicken, Paul D Mitcheson, Ivan Stoianov, and Eric M Yeatman. Power-extraction circuits for piezoelectric energy harvesters in miniature and low-power applications. *IEEE Transactions on power electronics*, 27(11):4514–4529, 2012.
- [8] Sumit Balgavhar and Suresh Bhalla. Green energy harvesting using piezoelectric materials from bridge vibrations. In *2018 2nd International Conference on Green Energy and Applications (ICGEA)*, pages 134–137. IEEE, 2018.
- [9] et al. Hector M. Poggi-Varaldo. *Tecnología solar-eólica-hidrogeno-pilas de combustible como fuentes de energía*. Tecnológico de estudios superior de Ecatepec, 2009.

-
- [10] Anderson Vera-Dávila, Jhan Delgado-Ariza, and Sergio Sepúlveda-Mora. Validación del modelo matemático de un panel solar empleando la herramienta simulink de matlab. *REVISTA DE INVESTIGACIÓN, DESARROLLO E INNOVACIÓN*, 8(2):343–356, jun. 2018.
- [11] M. Diantoro, T. Suprayogi, A. Hidayat, A. Taufiq, A. Fuad, and R. Suryana. Shockey's equation fit analyses for solar cell parameters from i-v curves. *International Journal of Photoenergy*, 2018, 2018. cited By 6.
- [12] Syeda Adila Afghan, Husam Abdulkareem, and Géza Husi. Simulating the electrical characteristics of a photovoltaic cell based on a single-diode equivalent circuit model. *MATEC Web of Conferences*, 126:03002, 01 2017.
- [13] Khan Academy. Operación de celdas solares. url<https://www.pveducation.org/pvc/drom/solar-cell-operation/ideal-solar-cells>, 2020.
- [14] S. G. Francisco. *Desarrollo de un sistema de recolección de energía mediante biomecánica*. Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Puebla, México. 2017.
- [15] Esteban Sepúlveda Orozco. Diseño de un colector de energía piezoeléctrico (energy harvesting) mediante optimización topológica que maximice la transformación de energía mecánica en eléctrica generada por un ser humano al caminar. <http://www.bdigital.unal.edu.co/47308/1/1128267719.2015.pdf>, 2014.
- [16] R. Ambrosio, R. TorreAlba, J. F. Guerrero-C., V. González, A. Limon, and M. Moreno. Energy harvesting combining three different sources for low power applications. In *2015 12th International Conference on Electrical Engineering, Computing Science and Automatic Control (CCE)*, pages 1–6, 2015.
- [17] JunHwi Park and Dong-Hee Lee. Hybrid power system using pv and piezoelectric modules. In *2019 22nd International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*, pages 1–6. IEEE, 2019.
- [18] Claude Vankecke, Laurent Assouère, Anqing Wang, Paul Durand-Estèbe, Fabrice Caignet, Jean-Marie Dilhac, and Marise Baffleur. Multisource and battery-free energy harvesting architecture for aeronautics applications. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 30(6):3215–3227, 2015.
- [19] Lalit Kumar and Shailendra Jain. Multiple-input dc/dc converter topology for hybrid energy system. *Power Electronics, IET*, 6:1483–1501, 09 2013.
- [20] Keithley. *Model 2450 Interactive SourceMeter Instrument*. Tektronix Company, user's manual edition, 2015.

-
- [21] Piezo.com. S128-h5fr-1107yb. url<https://piezo.com/products/piezoelectric-bending-transducer-s128-h5fr-1107yb>, 2020.
- [22] S. Bandyopadhyay and A. P. Chandrakasan. Platform architecture for solar, thermal and vibration energy combining with mppt and single inductor. *Gait & posture*, 47(9):2199–2215, September 2012.
- [23] Pallas A ramon. *Sensores y acondicionadores de señal*. Marcombo, España. 2005.
- [24] Derek Dunn-Rankin, Elisângela Martins Leal, and David C. Walther. Personal power systems. *Progress in Energy and Combustion Science*, 31(5):422 – 465, 2005.
- [25] B Naresh, Vinod Kumar Singh, and VK Sharma. Flexible hybrid energy harvesting system to power wearable electronics. pages 1–5, 2018.
- [26] Nathaniel J. Guilar, Rajeevan Amirtharajah, Paul J. Hurst, and Stephen H. Lewis. An energy-aware multiple-input power supply with charge recovery for energy harvesting applications. *2009 IEEE International Solid-State Circuits Conference - Digest of Technical Papers*, pages 298–299,299a, 2009.
- [27] S. Bandyopadhyay and A. P. Chandrakasan. Platform architecture for solar, thermal and vibration energy combining with mppt and single inductor. In *2011 Symposium on VLSI Circuits - Digest of Technical Papers*, pages 238–239, 2011.
- [28] S. Roundy, P.K. Wright, and K.S.J. Pister. Micro-electrostatic vibration-to-electricity converters. pages 487–496, 2002. cited By 209.
- [29] Michele Dini, M. Filippi, Marco Tartagni, and Aldo Romani. A nano-power power management ic for piezoelectric energy harvesting applications. pages 269–272, 06 2013.
- [30] S. Carreon-Bautista, L. Huang, and E. Sanchez-Sinencio. An autonomous energy harvesting power management unit with digital regulation for iot applications. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 51(6):1457–1474, 2016.
- [31] L. Colalongo, D. Dotti, A. Richelli, and Z. M. Kovács-Vajna. Non-isolated multiple-input boost converter for energy harvesting. *Electronics Letters*, 53(16):1132–1134, 2017.
- [32] M. A. Abouzied, H. Osman, V. Vaidya, K. Ravichandran, and E. Sánchez-Sinencio. An integrated concurrent multiple-input self-startup energy harvesting capacitive-based dc adder combiner. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 65(8):6281–6290, 2018.

-
- [33] Barra V. et al. Bacells J., Autonell J. *Eficiencia En El Uso De La Energía Eléctrica*. MARCOMBO, 20011.
- [34] Bolton W. *Mecatrónica: Sistemas de Control Electrónico en Ingeniería Mecánica y Eléctrica*. Marcombo, España, 2010.
- [35] Lauric Garbuio, Mickaël Lallart, Daniel Guyomar, Claude Richard, and David Audigier. Mechanical energy harvester with ultralow threshold rectification based on sshi nonlinear technique. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 56(4):1048–1056, 2009.
- [36] Huidong Li, Chuan Tian, and Z Daniel Deng. Energy harvesting from low frequency applications using piezoelectric materials. *Applied physics reviews*, 1(4):041301, 2014.
- [37] Corina Covaci and Aurel Gontean. Piezoelectric energy harvesting solutions: A review. *Sensors*, 20(12):3512, 2020.
- [38] Feng Lu, Hp Lee, and S Lim. Modeling and analysis of micro piezoelectric power generators for micro-electromechanical-systems applications. *Smart Materials and Structures*, 13:57–63, 02 2004.
- [39] Fernández Hernan. et. al. Modelo genérico de celdas fotovoltaicas. *Universidad, Ciencia y Tecnología*, 12:157–162, Septiembre, 2008.
- [40] Habbati Bellia, Ramdani Youcef, and Moulay Fatima. A detailed modeling of photovoltaic module using matlab. *NRIAG Journal of Astronomy and Geophysics*, 3(1):53–61, 2014.
- [41] S. Lineykin, Moshe Averbukh, and Alon Kuperman. Five-parameter model of photovoltaic cell based on stc data and dimensionless. pages 1–5, 11 2012.
- [42] Oscar Perpiñan Lamigueiro et al. *Diseño desistemas fotovoltaicos*. Creative Commons, 2012.
- [43] Eric Yeatman. Advances in power sources for wireless sensor nodes. *ResearchGate*, 01 2004.
- [44] S. . Suzuki, T. Katane, H. Saotome, and O. Saito. A proposal of electric power generating system for implanted medical devices. *IEEE Transactions on Magnetics*, 35(5):3586–3588, 1999.
- [45] MOLL Francesc González José Luis, Rubio Antonio. Human powered piezoelectric batteries to supply power to wearable electronic devices. *Int. J. Soc. Mater, Eng. Resour.*, 10(1), marzo 2002.

-
- [46] Andrzej Lewandowski and Maciej Galinski. Practical and theoretical limits for electrochemical double-layer capacitors. *Journal of Power Sources*, 173(2):822 – 828, 2007. X Polish Conference on Systems with Fast Ionic Transport.
- [47] Hua Yu, Qiuqing Yue, and Hanzhong Wu. Power management and energy harvesting for indoor photovoltaic cells system. In *2011 Second International Conference on Mechanic Automation and Control Engineering*, pages 521–524, 2011.
- [48] Sravanthi Chalasani and J. M. Conrad. A survey of energy harvesting sources for embedded systems. In *IEEE SoutheastCon 2008*, pages 442–447, 2008.
- [49] P. D. Mitcheson, E. M. Yeatman, G. K. Rao, A. S. Holmes, and T. C. Green. Energy harvesting from human and machine motion for wireless electronic devices. *Proceedings of the IEEE*, 96(9):1457–1486, 2008.
- [50] M. Elizabeth. Energy harvesting, low power consumption are the way forward for iot, wearables. *oTSIoTAECE Embedded Systems Conference, San Jose, USA*, 96:1457–1486, November 2016.
- [51] Daniel M. Bennett, Richard H. Selfridge, Paul Humble, and John N. Harb. Hybrid power systems for autonomous mems. 4334:354–362, aug 2001.
- [52] K. Sangani. The sun in your pocket. *Engineering and Technology*, 2(8):36–38, 2007. cited By 8.
- [53] J. Kymissis, C. Kendall, J. Paradiso, and N. Gershenfeld. Parasitic power harvesting in shoes. In *Digest of Papers. Second International Symposium on Wearable Computers (Cat. No.98EX215)*, pages 132–139, 1998.
- [54] N. S. Shenck and J. A. Paradiso. Energy scavenging with shoe-mounted piezoelectrics. *IEEE Micro*, 21(3):30–42, 2001.
- [55] M.S. Rahman, P. Sarker, and U.K. Chakravarty. A hybrid energy harvester based on solar radiation and mechanical vibration. volume 2121. American Institute of Physics Inc., 2019. cited By 2; Conference of 8th Bangladesh Society of Mechanical Engineers International Conference on Thermal Engineering, BSME ICTE 2018 ; Conference Date: 19 December 2018 Through 21 December 2018; Conference Code:149747.
- [56] H. Lhermet, C. Condemine, M. Plissonnier, R. Salot, P. Audebert, and M. Rosset. Efficient power management circuit: Thermal energy harvesting to above-ic micro-battery energy storage. In *2007 IEEE International Solid-State Circuits Conference. Digest of Technical Papers*, pages 62–587, 2007.

-
- [57] M.S. Rahman and U.K. Chakravarty. Design and analysis of a hybrid solar and vibration energy harvester. *Energy Harvesting and Systems*, 2020. cited By 0.
- [58] M.S. Rahman and U.K. Chakravarty. A hybrid energy harvesting system based on solar radiation and mechanical vibration. volume 1. American Society of Mechanical Engineers (ASME), 2018. cited By 3; Conference of ASME 2018 International Mechanical Engineering Congress and Exposition, IMECE 2018 ; Conference Date: 9 November 2018 Through 15 November 2018; Conference Code:144113.
- [59] J. Katic, S. Rodriguez, and A. Rusu. A high-efficiency energy harvesting interface for implanted biofuel cell and thermal harvesters. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 33(5):4125–4134, 2018.
- [60] C. Lu, C. Tsui, and W. Ki. Vibration energy scavenging system with maximum power tracking for micropower applications. *IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems*, 19(11):2109–2119, 2011.
- [61] M. Shim, J. Kim, J. Jeong, S. Park, and C. Kim. Self-powered 30 uw to 10 mw piezoelectric energy harvesting system with 9.09 ms/v maximum power point tracking time. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 50(10):2367–2379, 2015.
- [62] H. Lhermet, C. Condemine, M. Plissonnier, R. Salot, P. Audebert, and M. Rosset. Efficient power management circuit: Thermal energy harvesting to above-ic micro-battery energy storage. pages 62–587, 2007.
- [63] Ruiz J, Beristáin A, Ian Sosa Tinoco, and Hernandez H. Estudio del algoritmo de seguimiento de punto de máxima potencia perturbar y observar. *Revista de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Computación 1870-9532*, 8:17, 12 2010.
- [64] Nevzat Onat. Recent developments in maximum power point tracking technologies for photovoltaic systems. *International Journal of Photoenergy*, 2010, 01 2010.
- [65] G. Görge, M. Kirstein, and R. Erbel. Microgenerators for energy autarkic pacemakers and defibrillators: Fact or fiction? *Herz*, 26(1):64–68, 2001. cited By 20.
- [66] P. E. Ross. Managing care through the air [remote health monitoring]. *IEEE Spectrum*, 41(12):26–31, 2004.
- [67] G. Asada, M. Dong, T. S. Lin, F. Newberg, G. Pottie, W. J. Kaiser, and H. O. Marcy. Wireless integrated network sensors: Low power systems on a chip. In *Proceedings of the 24th European Solid-State Circuits Conference*, pages 9–16, 1998.
- [68] T. Kang, S. Kim, C. Hyung, S. Kang, and K. Park. An energy combiner for a multi-input energy-harvesting system. *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, 62(9):911–915, 2015.