

Trabajo de Fin de Grado
Grado en Ingeniería Electrónica, Robótica y
Mecatrónica

Análisis/estudio de los sistemas de cosecha de energía en el cuerpo humano.

Autor: Mario Palmero Delgado

Tutor: María del Mar Elena Pérez y Eduardo Galván Díez

Dpto. Ingeniería Electrónica
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, julio de 2022



Trabajo de Fin de Grado
Grado en Ingeniería Electrónica, Robótica y Mecatrónica

Análisis/estudio de los sistemas de cosecha de energía en el cuerpo humano.

Autor:

Mario Palmero Delgado

Tutores:

María del Mar Elena Pérez

Profesora contratado doctor

Eduardo Galván Díez

Catedrático de Universidad

Dpto. de Ingeniería Electrónica
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla
Sevilla, julio de 2022

Trabajo de Fin de Grado: Análisis/estudio de los sistemas de cosecha de energía en el cuerpo humano.

Autor: Mario Palmero Delgado

Tutores: María del Mar Elena Pérez y Eduardo Galván Díez

El tribunal nombrado para juzgar el Trabajo arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, julio de 2022

El Secretario del Tribunal

Lo conseguí abuelo

Agradecimientos

En primer lugar, gracias a mis padres y a mi hermana por su apoyo incondicional en los momentos más bajos de la carrera y de la vida en general. Por sus palabras de aliento cuando llega el punto en que todo te sobrepasa. Gracias mamá. Gracias papá. Gracias Celia.

También quiero agradecer a mis tutores, Mar y Eduardo, por las múltiples reuniones de control a lo largo del proyecto y por la suerte que he tenido de contar con todo su conocimiento y sus consejos para poder aprender de ellos.

Por último, pero no menos importante, muchas gracias a mis amigos y compañeros de la carrera con los que he podido desconectar de la universidad y disfrutar de momentos estupendos. En especial quería hacer mención a Sito por saber escuchar y estar ahí siempre que lo he necesitado y a Encarni, por acompañarme en este trayecto y siempre hacerme creer en mí mismo.

Mario Palmero Delgado

Jerez de la Frontera, julio de 2022

Resumen

En la búsqueda de una alternativa a las fuentes de alimentación tradicionales aparecen los energy harvester con el objetivo de aprovechar la energía que se genera en el ambiente o con la propia actividad humana para el uso de dispositivos biomédicos como puede ser una bomba de insulina. Se realiza un análisis de la situación actual de estos dispositivos y más concretamente de los generadores piezoeléctricos, termoeléctricos y solares. Posteriormente se realizan simulaciones para comprobar su funcionalidad.

Abstract

In the search for an alternative to traditional power sources, energy harvesters appear with the aim of taking advantage of the energy generated in the environment or with human activity itself for the use of biomedical devices such as an insulin pump. An analysis of the current situation of these devices and more specifically of piezoelectric, thermoelectric, and solar generators is conducted. Subsequently, simulations are conducted to verify its functionality.

Índice

Agradecimientos	ix
Resumen	xi
Abstract	xiii
Índice	xiv
Índice de Tablas	xvi
Índice de Figuras	xviii
Notación	xxi
1 Introducción	1
1.1 <i>Motivación.</i>	1
1.2 <i>Objetivos y Alcance del Trabajo.</i>	1
1.3 <i>Requisitos.</i>	1
1.3.1 <i>Funcionales.</i>	1
1.3.2 <i>Prestaciones.</i>	2
1.3.3 <i>Diseño.</i>	2
1.3.4 <i>Operación.</i>	2
1.4 <i>Organización de la memoria.</i>	2
1.5 <i>Bombas de insulina.</i>	3
2 Estado del Arte	5
2.1 <i>Evolución histórica de los energy harvesters.</i>	5
2.1.1 <i>Generadores solares.</i>	6
2.1.2 <i>Generadores piezoeléctricos.</i>	7
2.1.3 <i>Generadores termoeléctricos.</i>	8
2.2 <i>Patentes y artículos recientes.</i>	9
3 Modelos Analíticos	11
3.1 <i>Generador Solar.</i>	11
3.1.1 <i>Introducción teórica y ecuaciones de comportamiento.</i>	12
3.1.2 <i>Simulación del modelo.</i>	13
3.1.3 <i>Modelos SIMULINK.</i>	14
3.2 <i>Generador Piezoeléctrico.</i>	15
3.2.1 <i>Introducción teórica y ecuaciones de comportamiento.</i>	16
3.2.2 <i>Simulación del modelo.</i>	16
3.2.3 <i>Modelos de SIMULINK.</i>	17
3.3 <i>Modelo piezoeléctrico.</i>	17
3.4 <i>Generador Termoeléctrico.</i>	19
3.4.1 <i>Introducción teórica y ecuaciones de comportamiento.</i>	19
3.4.2 <i>Simulación del modelo.</i>	20
3.4.3 <i>Modelo de SIMULINK.</i>	20
4 Análisis de los Resultados	21
4.1 <i>Harvester Solar.</i>	21
4.2 <i>Harvester termoeléctrico.</i>	23

4.3	<i>Harvester piezoeléctrico.</i>	25
5	Conclusiones	28
5.1	<i>Conclusiones generales.</i>	28
5.2	<i>Cronograma y presupuesto.</i>	28
5.3	<i>Líneas futuras de investigación.</i>	29
	Referencias	31

ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1: Comparación en los dispositivos de recolección de energía [13].</i>	6
<i>Tabla 2: Parámetros del PZT [23].</i>	8
<i>Tabla 3: Parámetros característicos de la célula solar.</i>	11
<i>Tabla 4: Parámetros obtenidos con FEA del piezoeléctrico [38].</i>	25

ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1: Consumo estimado de la bomba de insulina.</i>	3
<i>Figura 2: Formas de energy harvesting [9].</i>	5
<i>Figura 3: Irradiación solar normal en España [15].</i>	6
<i>Figura 4: Irradiación solar mensual en kWh/m² en Sevilla [16].</i>	7
<i>Figura 5: Comparación de generadores termoeléctricos [26].</i>	8
<i>Figura 6: Generador termoeléctrico flexible [28].</i>	9
<i>Figura 7: Imagen real del generador implantado en mascarilla [29].</i>	9
<i>Figura 8: Nano generador triboeléctrico [30].</i>	10
<i>Figura 9: Célula de biocombustible implantada en una paloma [31].</i>	10
<i>Figura 10: Temperatura ambiente en el caso de uso.</i>	11
<i>Figura 11: Irradiación solar en el caso de uso.</i>	12
<i>Figura 12: Modelo eléctrico de una placa solar [34].</i>	12
<i>Figura 13: Característica I-V y P-V de la célula solar.</i>	13
<i>Figura 14: Diagrama de bloques del generador solar.</i>	14
<i>Figura 15: Lazo de control del Duty Cycle.</i>	14
<i>Figura 16: Esquema SIMULINK para convertidor DC/DC elevador.</i>	14
<i>Figura 17: Modelo SIMULINK del harvester solar.</i>	15
<i>Figura 18: Pasos por segundo en el caso real.</i>	15
<i>Figura 19: Modelo electromecánico de un piezoeléctrico [35].</i>	16
<i>Figura 20: Diagrama de bloques del harvester piezoeléctrico.</i>	16
<i>Figura 21: Puente de diodos rectificador de onda completa.</i>	17
<i>Figura 22: Modelo electromecánico del piezoeléctrico en SIMULINK.</i>	17
<i>Figura 23: Montaje del harvester piezoeléctrico en SIMULINK.</i>	18
<i>Figura 24: Montaje completo del harvester piezoeléctrico en SIMULINK.</i>	18
<i>Figura 25: Evolución de la temperatura y la diferencia térmica.</i>	19
<i>Figura 26: Diagrama de bloques del generador termoeléctrico.</i>	20
<i>Figura 27: Modelo matemático del harvester termoeléctrico en SIMULINK.</i>	20
<i>Figura 28: Modelo completo del harvester termoeléctrico en SIMULINK.</i>	20
<i>Figura 29: Salida de la celda solar.</i>	21
<i>Figura 30: Duty Cycle del convertidor DC/DC.</i>	22
<i>Figura 31: Evolución del estado de carga de la batería.</i>	22

<i>Figura 32: Salida del harvester termoeléctrico.</i>	23
<i>Figura 33: Duty Cycle del convertidor DC/DC.</i>	24
<i>Figura 34: Evolución del estado de carga de la batería.</i>	24
<i>Figura 35: Tensión y corriente a la salida del piezoeléctrico.</i>	25
<i>Figura 36: Detalle de los picos de tensión y corriente en el piezoeléctrico.</i>	26
<i>Figura 37: Tensión y corriente a la salida del rectificador.</i>	26
<i>Figura 38: Evolución del estado de carga de la batería.</i>	27
<i>Figura 39: Diagrama de Gantt del proyecto.</i>	28

PVDF	Fluoruro de polivinilideno
EAP	Polímero electroactivo
PZT	Titanato zirconita de plomo
TEG	Generador termoeléctrico
FEA	Análisis de elemento finito

1 INTRODUCCIÓN

Audentis Fortuna Iuvat

- Virgilio -

1.1 Motivación.

La motivación que me ha llevado a realizar este trabajo es investigar posibles formas de utilizar la energía que ya está presente en el ambiente con el objetivo de eliminar el uso de baterías de usar y tirar en dispositivos biomédicos para así conseguir una solución que sea más sana para el medio ambiente.

Aunque en principio usamos como objetivo la alimentación de una bomba de insulina, la idea es que estos dispositivos que se están analizando se puedan usar en cualquier aparato electrónico de carácter biomédico como pueden ser prótesis electromecánicas, audífonos, marcapasos...

1.2 Objetivos y Alcance del Trabajo.

El objetivo principal de este trabajo es el análisis y simulación de varios *energy harvesters* y comprobar la viabilidad de sustituir la pila que incorporan las bombas de insulina por un *harvester* y una pila recargable que almacene la energía suministrada y la bomba pueda usarla cuando la necesite.

Para ello, en primer lugar, realizaremos una revisión bibliográfica de los diferentes *energy harvester* que existen, las múltiples formas que hay para extraer energía de la actividad humana y de los dispositivos que ya existen y que implementen esta tecnología. También estudiaremos que patentes y artículos científicos han sido publicadas recientemente respecto a esta tecnología.

El alcance de este proyecto es plantear unos modelos de simulación tales que podamos determinar si realmente son viables para la implementación física en la aplicación que hemos propuesto. Para poder realizar este análisis, planteamos un caso de uso real basado en mi actividad diaria y con los resultados de la simulación podremos determinar si son una opción real y también cuál de ellos sería el mejor.

1.3 Requisitos.

1.3.1 Funcionales.

El dispositivo que va a ser estudiado en este trabajo debe ser capaz de suministrar suficiente energía como para cargar una pila recargable. Esta pila debe garantizar un suministro constante de potencia a la bomba de insulina permitiendo así su funcionamiento continuado a lo largo del día, sin importar que las condiciones ambientales impidan la generación de energía a través del dispositivo. El dispositivo también debe adaptarse al modo de vida del usuario y, además, debe ser cómodo para no interferir en las actividades del día a día.

- F.1 El dispositivo debe suministrar potencia a la pila recargable.
- F.2 La pila recargable debe garantizar el funcionamiento continuado de la bomba de insulina.
- F.3 El dispositivo debe ser portátil.
- F.4 El dispositivo debe estar adaptado al día a día del usuario.

1.3.2 Prestaciones.

Las prestaciones del dispositivo que se relacionan con las funcionalidades previamente expuestas:

- P.1.1 El dispositivo debe suministrar más potencia que la demandada por la bomba de insulina.
- P.1.2 Se podrán combinar varios *harvester* para garantizar la carga de la pila.
- P.2.1 La pila que se usará para modelar la carga es una Energizer recargable de 2300 mAh.
- P.2.2 La pila garantiza una tensión constante a la entrada de la bomba de insulina de 1.2 V.
- P.3.1 El tamaño del dispositivo debe permitir que su colocación no obstaculice al usuario.
- P.3.2 El dispositivo deberá adaptarse al sitio donde sea colocado.
- P.4.1 El dispositivo usado debe ser elegido de acuerdo al estilo de vida del usuario.
- P.4.2 El dispositivo podrá combinarse con otros *harvester* para optimizar la producción de energía.

1.3.3 Diseño.

Son requisitos que se exigen al diseño del dispositivo con el objetivo de cumplir con lo previamente expuesto.

- D.1 El dispositivo debe pesar menos de 50 gramos.
- D.2 El dispositivo debe tener unas dimensiones menores a 150x50 50mm.
- D.3 El dispositivo debe tener un coste inferior a los 100€.
- D.4 El dispositivo debe ser resistente a salpicaduras de polvo y agua, al menos IP65.

1.3.4 Operación.

Estos requisitos garantizan que mientras el dispositivo esté operando, sea seguro de usar y que cumpla con las normativas pertinentes para poder asegurar que el usuario no va a percibir ningún daño por usarlo.

- O.1 El dispositivo en funcionamiento no debe sobrepasar los 60°C.
- O.2 La temperatura ambiente para que el dispositivo funcione debe estar entre -10°C y 50°C.
- O.3 El dispositivo debe cumplir con la normativa de compatibilidad electromagnética.
- O.4 Las conexiones eléctricas del dispositivo deben estar completamente aisladas.
- O.5 El dispositivo debe cumplir con la normativa de seguridad eléctrica.

1.4 Organización de la memoria.

En este Apartado 1, definiremos los objetivos del proyecto, la motivación y el alcance de este. También analizamos los requisitos que esperamos obtener del proyecto en función de los objetivos que previamente hemos descrito. También se estudian las bombas de insulina, que actuará como carga en nuestro sistema.

En el Apartado 2 revisamos en un primer lugar el concepto de los *energy harvesters* y algunas de las principales actividades del día a día que nos permitirían obtener energía gracias a estos dispositivos. Posteriormente realizamos un análisis más exhaustivo de los tres tipos de *energy harvester* en los que se basa este trabajo. Por último, se incluyen algunas de las patentes o artículos de investigación más actuales sobre diferentes dispositivos que se han desarrollado implementando *energy harvesters*.

En el Apartado 3 analizamos los modelos analíticos y las ecuaciones de comportamiento que describen el modelo matemático que hemos utilizado en las simulaciones y también los parámetros más característicos que describen el dispositivo que hemos elegido como modelo para la simulación y se incluyen los esquemas de los modelos en SIMULINK. Finalmente, para cada simulación, exponemos el caso de uso en el que nos hemos basado para la simulación.

En el Apartado 4 realizamos las simulaciones por el período de un día (24 horas) en un supuesto real para poder analizar la producción de potencia de cada uno de ellos en una situación realista de uso y posteriormente comparamos la energía que hemos recolectado con cada uno de ellos a lo largo del día en función de su tamaño. También se incluyen gráficas para poder realizar un análisis más claro del funcionamiento de estos.

En el Apartado 5, tras realizar todas las simulaciones comparamos y exponemos las conclusiones del proyecto. Además, incluimos las posibles líneas futuras de investigación relacionadas con este trabajo.

1.5 Bombas de insulina.

Las bombas de insulina son dispositivos usados por personas que padecen de diabetes para que se suministre insulina de forma parecida a como lo haría el páncreas en una persona no diabética, este tipo de tratamiento permite un control mucho más preciso de los diferentes tipos de glucemia [1]. Estos dispositivos cuentan con muchos sensores con el objetivo de automatizar al máximo este proceso y hacer un uso más sencillo para los pacientes. Sin embargo, todavía se requiere del control por parte del paciente para su correcto funcionamiento.

La insulina se administra mediante un catéter con una cánula de inserción subcutánea, que libera insulina en un mismo sitio durante 3 o 4 días a diferencia de las inyecciones que habitualmente se aplican los pacientes de diabetes para mantener niveles normales de insulina. La insulina inyectada se almacena en cartuchos que se renuevan y para impulsarla cuenta con un motor eléctrico [2].

La bomba que vamos a utilizar es la MiniMed 780G de Medtronic [3]. Para estimar el consumo de esta bomba de insulina hemos recurrido a preguntar a usuarios reales sobre la duración aproximada de una batería y de forma aproximada hemos estimado el consumo medio de la bomba. En la *Figura 1*, podemos apreciar la estimación de consumo que hemos considerado para las simulaciones.

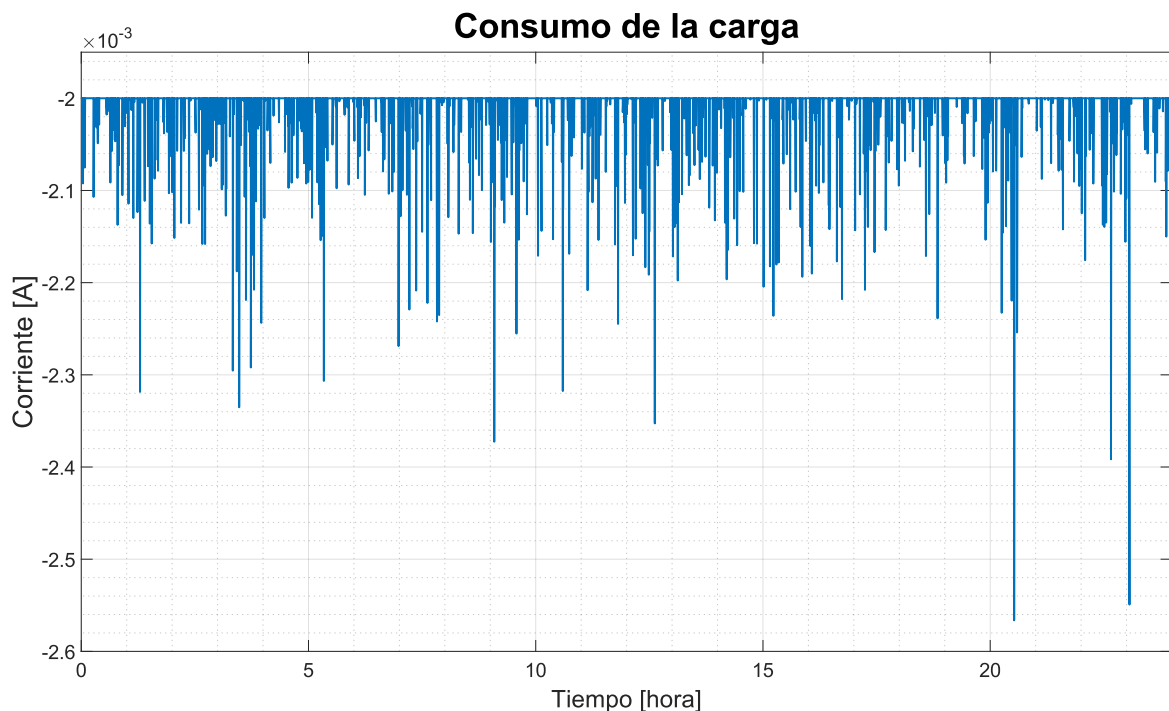


Figura 1: Consumo estimado de la bomba de insulina.

2 ESTADO DEL ARTE

2.1 Evolución histórica de los *energy harvesters*.

La creciente aparición de dispositivos electrónicos portátiles de pequeño tamaño y con un consumo bastante bajo de potencia, invitan a pensar en la posibilidad de eliminar la dependencia actual de dichos dispositivos en baterías cuyo tamaño es mucho mayor al de estos dispositivos y tienen una vida útil mucho menor [4]. Además, en función de la aplicación concreta con la que estemos trabajando, realizar un cambio de batería puede suponer un problema [5], por ejemplo, en el caso de un marcapasos para cambiar la batería es necesario una intervención quirúrgica.

En vistas de este problema, aparece una solución que son los recolectores de energía. Estos dispositivos son más conocidos por el término anglosajón *energy harvester* por tanto a lo largo del trabajo me referiré a ellos como tal. El *energy harvesting* consiste en la conversión de la energía presente en el ambiente hacia una energía que podamos aprovechar, en este caso, sería una energía eléctrica [6]. Su funcionamiento es exactamente igual al de los generadores de energías renovables a gran escala con la diferencia de que producen cantidades mucho menores de potencia y son dispositivos pensados para ser pequeños y portátiles.

Una prueba del creciente interés que muestra la sociedad en estos *energy harvester* es el incremento de artículos de investigación publicados [7] con relación a este tema en los últimos años.

Cuando analizamos las posibles fuentes de energía existentes tanto en el ambiente como aquellas que genera el ser humano con su actividad diaria observamos varias posibilidades viables para desarrollar un *energy harvester* que nos proporcione una potencia suficiente para nuestra demanda [8]. En la Figura 2 se expone una posible clasificación de las diferentes formas de *energy harvesting*:

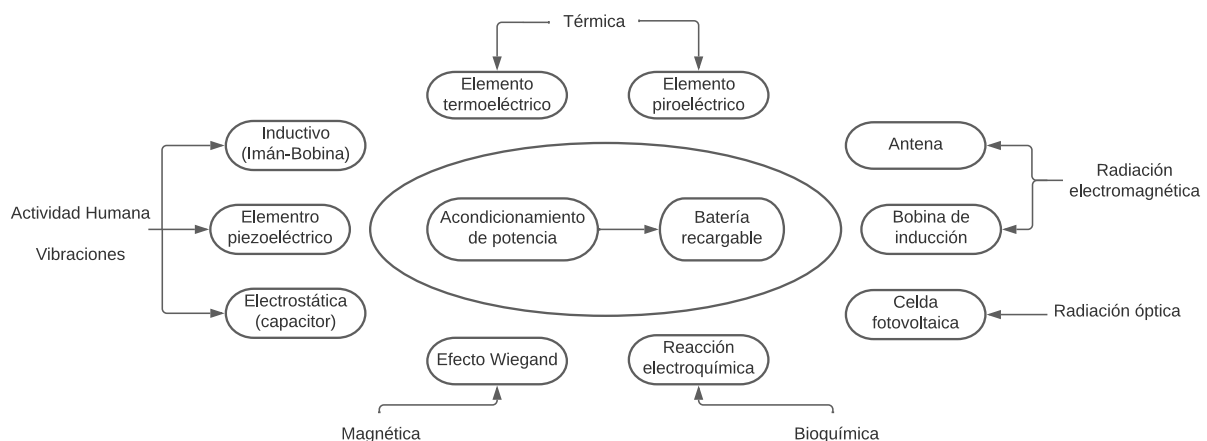


Figura 2: Formas de *energy harvesting* [9].

De entre todas esas posibilidades, hemos decidido decantarnos por 3 alternativas que hemos considerado que son las óptimas, analizando la densidad de potencia por unidad de volumen, para el caso de uso que estamos estudiando. Podemos buscar en la literatura para obtener una aproximación de la potencia que generan estos *energy harvesters* basándonos en experimentos que ya han sido realizados bajo unas determinadas condiciones de uso se consiguió obtener la potencia que aparece reflejada en la Tabla 1:

FORMA DE OPERACIÓN	AUTOR	POTENCIA [μW]	VOLUMEN [mm^3]
PVDF EN LA SUELA DEL ZAPATO	Schenk and Paradiso [10]	1300	5000
EAP EN LA SUELA DEL ZAPATO	Pelrine et al. [11]	1000000	50000
TERMOELÉCTRICO	Applied digital solutions [12]	50	41
CELDA SOLAR EN EXTERIOR		20000	500000
CELDA SOLAR EN INTERIOR		1500	500000

Tabla 1: Comparación en los dispositivos de recolección de energía [13].

Si comparamos estos resultados expuestos en la Tabla 1, los *harvester* con una mayor tasa de potencia generada por unidad de volumen son los EAP insertados en la suela de los zapatos. Pese a ello, nuestra investigación irá dirigida a otras alternativas que consideramos más viables para la implementación de un recolector *wearable* (vestible) que permita alimentar un dispositivo biomédico que, en nuestro caso, es la bomba de insulina.

2.1.1 Generadores solares.

La luz se trata de un recurso ambiental que se encuentra a nuestra disposición para recolectar energía y convertirla a una energía que podamos usar a nuestro antojo. Especialmente en la zona del mundo en la que vivimos tenemos la gran ventaja de contar con una irradiación solar muy grande además de tener muchas horas de sol diarias. Según los datos proporcionados por Globas Solar Atlas, España tiene una irradiación solar normal media de 5.11 kWh/m^2 [14].

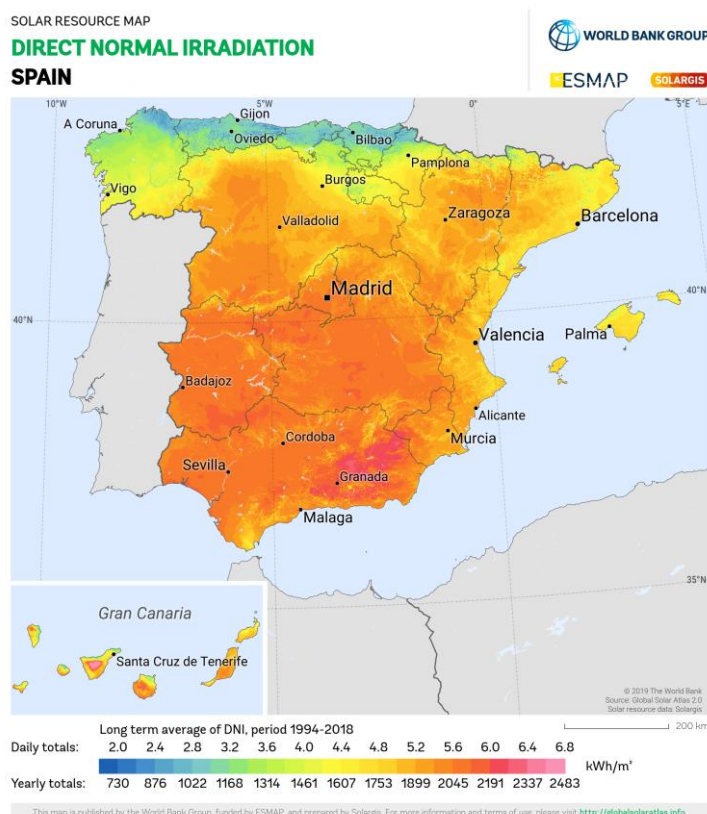


Figura 3: Irradiación solar normal en España [15].

Más concretamente, en Sevilla y según los datos que publica la Agencia Andaluza de la Energía tenemos la evolución de la irradiación solar a lo largo del año en la Figura 4:

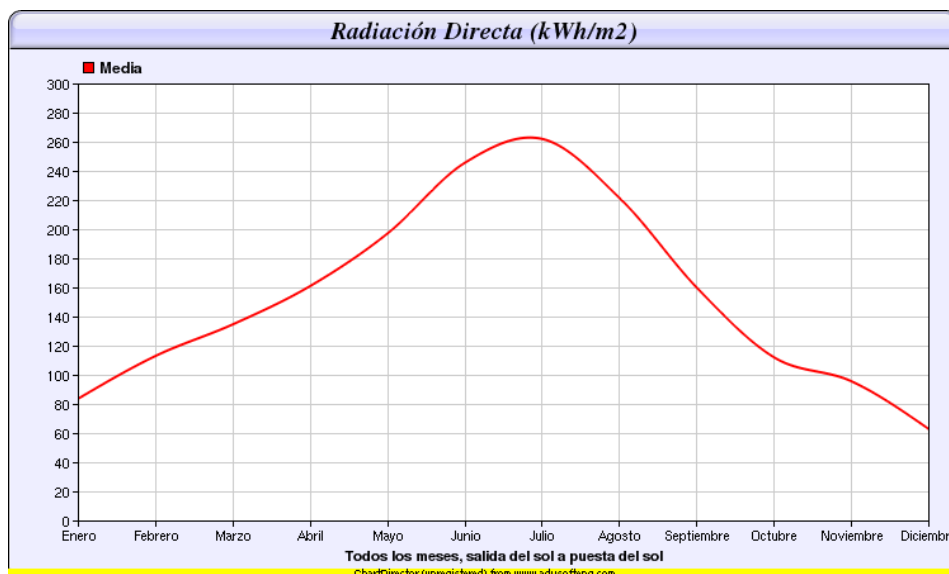


Figura 4: Irradiación solar mensual en kWh/m² en Sevilla [16].

Los paneles solares tradicionales son células mono o policristalinas que tienen unas eficiencias de en torno al 10-20% bajo una incidencia directa del sol [17], sin embargo, son paneles sólidos y, por tanto, no es viable implantarlos en una solución portátil como puede ser en la misma ropa del usuario ya que sería incómodo de llevar. También hay que añadir el coste de fabricación tan elevado que tienen este tipo de paneles solares, que hacen difícil su implementación para aplicaciones de este estilo.

Sin embargo, están emergiendo tecnologías de fabricación novedosas que permiten que las células solares no sean rígidas, su fabricación sea mucho menos costosa, pero su rendimiento cae hasta un 5% [18]. En estas condiciones sí que seríamos capaces de implementar estas tecnologías en un dispositivo *wearable*, aunque deberíamos tener en cuenta que, si tenemos un rendimiento tan pequeño, en el caso de que estemos en interior la potencia que suministraría nuestro *energy harvester* sería del orden de los microwatios, es decir, prácticamente despreciable.

Con ello quiero enfatizar el hecho de que este tipo de *harvester* concreto, está enfocado a un usuario que pase mucho tiempo en el exterior que es donde podríamos obtener una mayor exposición a la irradiación solar y por tanto más producción de energía.

2.1.2 Generadores piezoeléctricos.

El efecto piezoeléctrico, del griego *πιέζω estrujar o apretar*, describe el fenómeno por el cual algunos materiales al verse sometidos a un esfuerzo mecánico generan una carga eléctrica, ya que al actuar la fuerza provoca una modificación en la estructura microscópica creando dipolos donde se acumula una tensión [19]. También es posible deformar dichos materiales aplicando una tensión sobre ellos obteniendo así el efecto inverso.

Existen varios materiales que presentan la propiedad de ser piezoeléctricos, cada uno de ellos con distintas propiedades piezoeléctricas diferentes que tendremos que estudiar en profundidad para analizar cuál es el más conveniente para nuestra aplicación concreta. Hemos elegido el PZT [20], como material para nuestro *harvester*, que en comparación a otros materiales como las cerámicas piezoeléctricas como puede ser el PVDF [21], muestran muy buena compatibilidad ambiental, cuentan con mucha más flexibilidad y también son más resistentes al impacto mecánico [22].

Los parámetros más característicos de este material son los que se exponen en la Tabla 2:

PARÁMETROS	UNIDADES	VALOR
CONSTANTE DE TENSIÓN PIEZOELÉCTRICO d_{33}	$\frac{pC}{N}$	650
CONSTANTE DE TENSIÓN PIEZOELÉCTRICO g_{33}	$\frac{V \cdot m}{N}$	$19 \cdot 10^{-3}$
FACTOR DE CALIDAD MECÁNICO		32
COEFICIENTE DE ACOPLAMIENTO		0.75
LÍMITE ELÁSTICA	$\frac{N}{m^2}$	$4.9 \cdot 10^{10}$
DENSIDAD	$\frac{kg}{m^3}$	$1.78 \cdot 10^3$
RATIO DE POISSON		0.31
RANGO DE OPERACIÓN DE TEMPERATURA	°C	-40 a 80
GROSOR	μm	30

Tabla 2: Parámetros del PZT [23].

2.1.3 Generadores termoeléctricos.

El funcionamiento de los generadores termoeléctricos se fundamenta en el efecto Seebeck [24], descubierto por el físico alemán Seebeck T.J en 1821 al observar que en un circuito formado por dos conductores distintos que se encuentran a temperaturas distintas aparece una diferencia de potencial [25].

El cuerpo humano genera entre 100 y 525 W de calor [26], sin embargo, el organismo tiene algunos mecanismos de evacuación de calor (sudor) que disipan una gran parte de este calor y, por tanto, actualmente los generadores termoeléctricos no resultan competitivos a gran escala con otras formas de termo generación convencionales.

Sin embargo, para nuestro caso en concreto, este generador podría suministrar suficiente potencia como para alimentar la bomba de insulina.

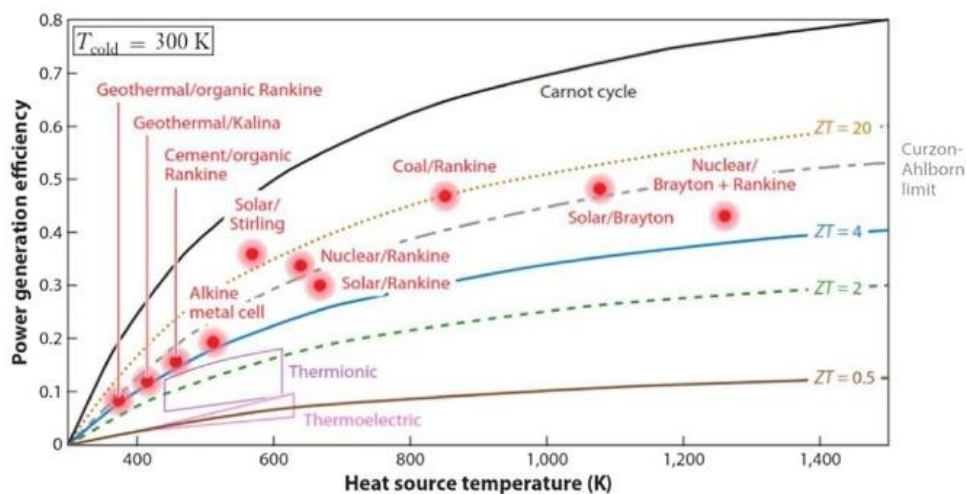


Figura 5: Comparación de generadores termoeléctricos [26].

2.2 Patentes y artículos recientes.

Actualmente se están desarrollando muchas formas distintas de aprovechar la energía que producen el cuerpo humano con su actividad diaria, sin embargo, este campo aún se encuentra en una fase muy primitiva ya que es imperativo que el *harvester* no afecte a las actividades de la vida diaria del usuario, además gran parte de la energía que produce el cuerpo se disipa dejando una pequeña proporción que se puede aprovechar [27].

Aun así, existen aplicaciones concretas con baja demanda energética para las cuales estos dispositivos resultan una solución viable a la problemática de un suministro sostenible y respetuoso con el medio ambiente, por ello existen varios proyectos de investigación y patentes actuales relacionados con este tema:

- Un generador termoeléctrico reciclable y reconfigurable [28].

Es un artículo de investigación acerca de un nuevo diseño de generador termoeléctrico que tiene el formato que se muestra en la Figura 6:

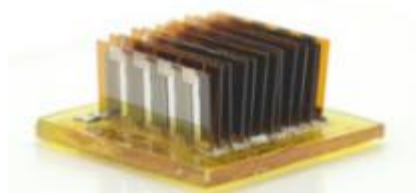


Figura 6: Generador termoeléctrico flexible [28].

Se describe como un diseño de tipo Lego ya que se pueden unir varios módulos para obtener una mayor producción de energía, también es un diseño autorreparable ya que se basa en un metal líquido para hacer las conexiones así que en caso de que se rompa alguna conexión la fluidez de dicho material permite que se restablezca la conexión.

Este dispositivo proporciona un máximo, récord hasta la fecha, de 1 V/cm^2 a circuito abierto con una diferencia de temperaturas de 95 K.

- Nano generadores piroeléctricos para convertir energía térmica en eléctrica [29].

En este artículo de investigación se analizan diversos nano generadores con materiales piroeléctricos que permitan una producción de potencial tal que se puedan tener IOT's autoalimentados:

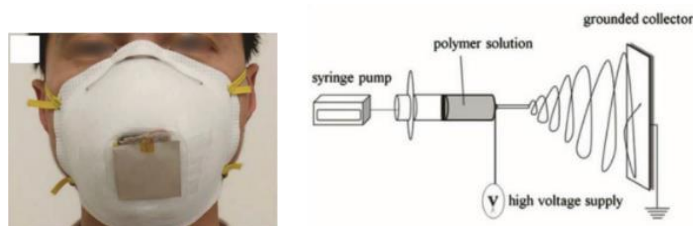


Figura 7: Imagen real del generador implantado en mascarilla [29].

En este caso se implantó una película flexible de PVDF para obtener energía a partir de la respiración humana. Se comprobó que era capaz de alimentar a un sensor que monitorizaba la respiración del usuario, alcanzando un máximo de producción de potencia con $8.31 \mu\text{W}$

- Nano generador triboeléctrico multimodo para monitorización biomédica [30].

Este dispositivo está formado por un metal líquido (EGaIn) y de silicón, donde el metal actúa como electrodo conductor que se encuentra con la unidad de silicón para formar una estructura tipo sándwich.



Figura 8: Nano generador triboeléctrico [30].

El nano generador se utiliza para cargar capacidades con un puente rectificador siendo capaz de cargar una capacidad de $1 \mu F$ sobre los 2V en 200 segundos. Su pico máximo de potencia es de $15 \mu W$.

- Célula de biocombustible enzimático implantada en aves [31].

En algunas aplicaciones, el uso de animales para el reconocimiento aéreo es mejor que el uso de vehículos autónomos voladores y para ello se requiere controlar la conducta de dichos animales mediante neuroestimulación. Hasta ahora se hacía uso de baterías de litio para alimentar los dispositivos de control remoto, aunque requerían de mantenimiento (operaciones quirúrgicas). La solución que propone este artículo es aprovechar la energía química presente en el cuerpo del animal.

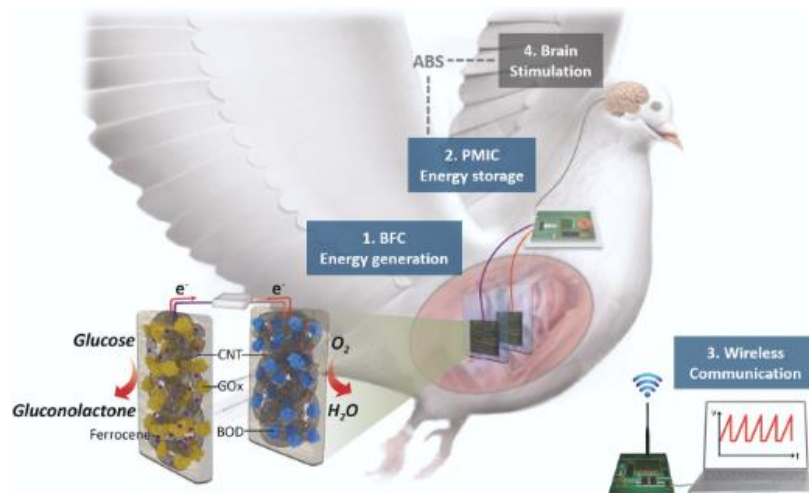


Figura 9: Célula de biocombustible implantada en una paloma [31].

Hoy en día estos dispositivos se han implementados en otros animales como ratones y langostas obteniendo potencias máximas del orden del centenar de microwatios por centímetro cuadrado. Gracias a la implementación de convertidores elevadores de baja tensión de entrada, los dispositivos que se insertaron en las palomas proporcionaron potencias de hasta 0.3 W.

3 MODELOS ANALÍTICOS

3.1 Generador Solar.

Para la realización de las simulaciones, nos hemos basado en los parámetros reales de células solares de la marca DFRobot [32]. Los parámetros característicos de este modelo de célula solar que tenemos que introducir en la simulación son los que se exponen en la Tabla 3:

PARÁMETRO	VALOR [UNIDADES]
CORRIENTE DE CORTO CIRCUITO (I_{sc})	420 [mA]
TENSIÓN DE CIRCUITO ABIERTO (V_{oc})	2 [V]
CORRIENTE EN EL PUNTO DE MÁXIMA POTENCIA (I_{MPP})	250 [mA]
TENSIÓN EN EL PUNTO DE MÁXIMA POTENCIA (V_{MPP})	1.5 [V]

Tabla 3: Parámetros característicos de la célula solar.

También determinamos los valores de la temperatura ambiente y de irradiación solar que son las entradas de nuestro sistema. Para ello usamos los datos reales en Sevilla [33], obteniendo los resultados expuestos en la Figura 10:

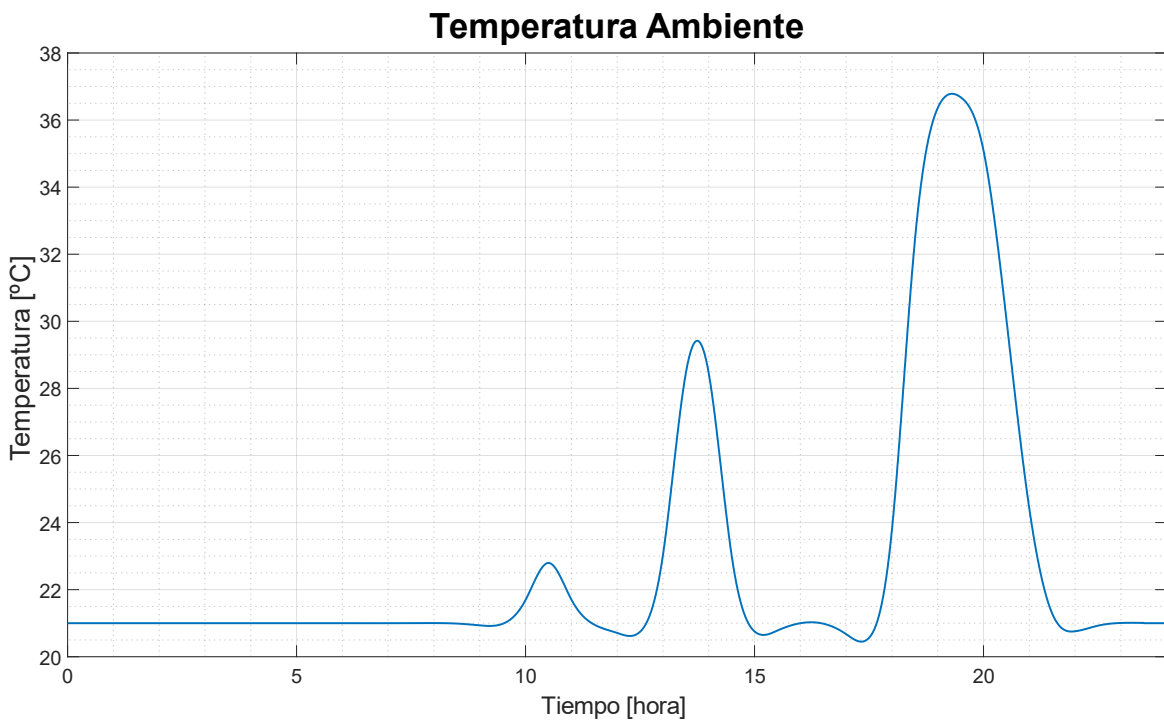


Figura 10: Temperatura ambiente en el caso de uso.

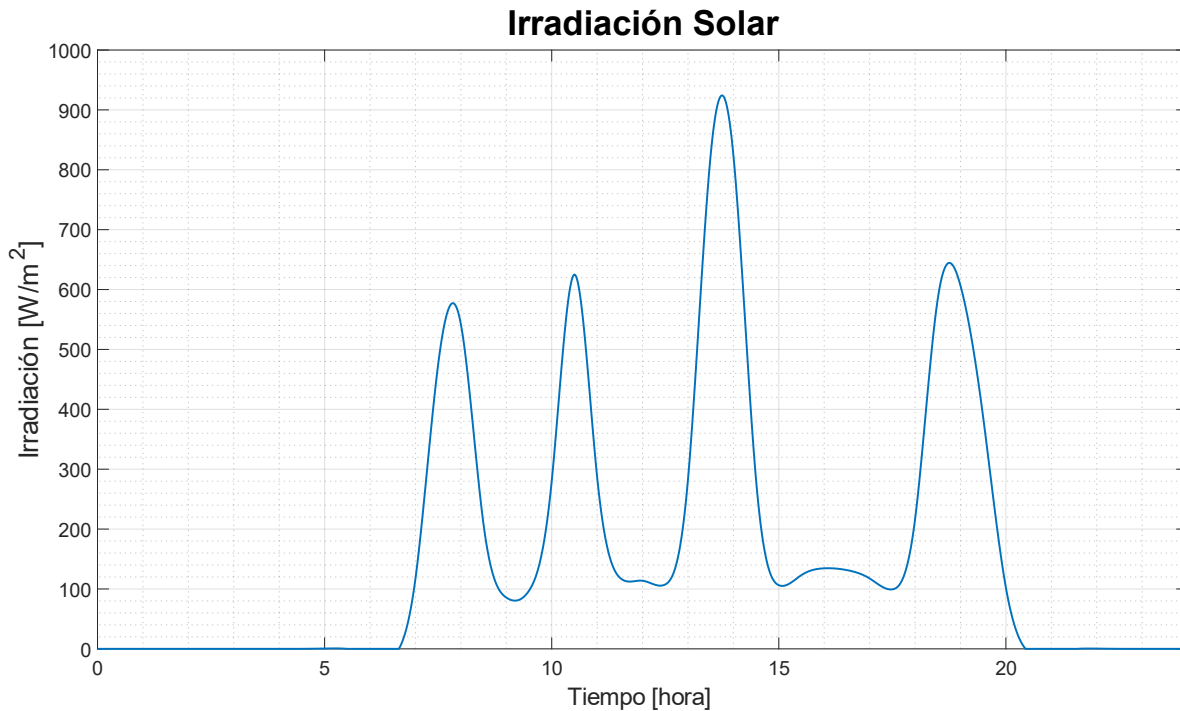


Figura 11: Irradiación solar en el caso de uso.

Con estos resultados hemos supuesto que el usuario permanecerá en la calle durante algunas horas del día y que en el resto permanece o bien en su puesto de trabajo o en su casa (con una temperatura más o menos constante y una irradiación solar muy reducida debido a que se encuentra en el interior de un edificio).

Los resultados que obtendríamos en el caso de un usuario que pase mucho más tiempo al exterior sería mejores, en el sentido de que produciría más energía. Al igual que un usuario que pase mucho tiempo en el interior de edificios obtendría mucha menos energía.

3.1.1 Introducción teórica y ecuaciones de comportamiento.

Para la simulación de una celda solar hemos usado el modelo ya existente en MATLAB. El circuito que implementa es el que se muestra en la Figura 12 [34]:

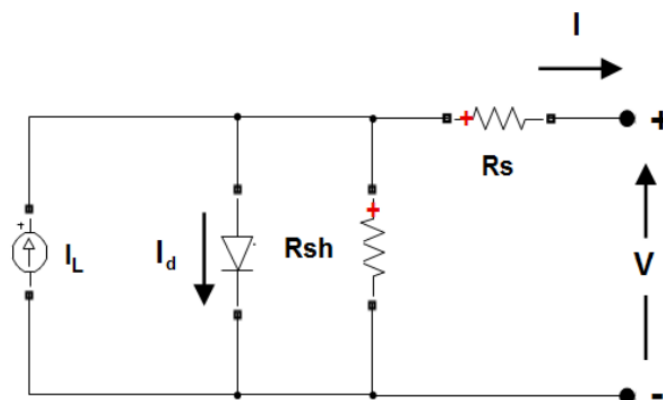


Figura 12: Modelo eléctrico de una placa solar [34].

Este modelo está definido por el conjunto de ecuaciones {1} que relacionan todos los parámetros con la característica I-V del diodo:

$$\begin{cases} I_d = I_0 \cdot \left[\exp\left(\frac{V_d}{V_t}\right) - 1 \right] \\ V_t = \frac{k \cdot T}{q} \cdot nI \cdot N_{cell} \end{cases} \quad \{1\}$$

Donde, I_d es la corriente que pasa por el diodo con unidades de Amperios, I_0 es la corriente de saturación del diodo con unidades de Amperios, V_d es la tensión del diodo con unidades de Voltios, k es la constante de Boltzman con valor de $1.3806 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$, T es la temperatura de la célula en Kelvin, q es la carga de un electrón con valor de $1.6022 \cdot 10^{-19} \text{ C}$, nI es el factor de idealidad del diodo y N_{cell} es el número de células conectadas en serie en un módulo, que para nuestro caso específico es una única célula.

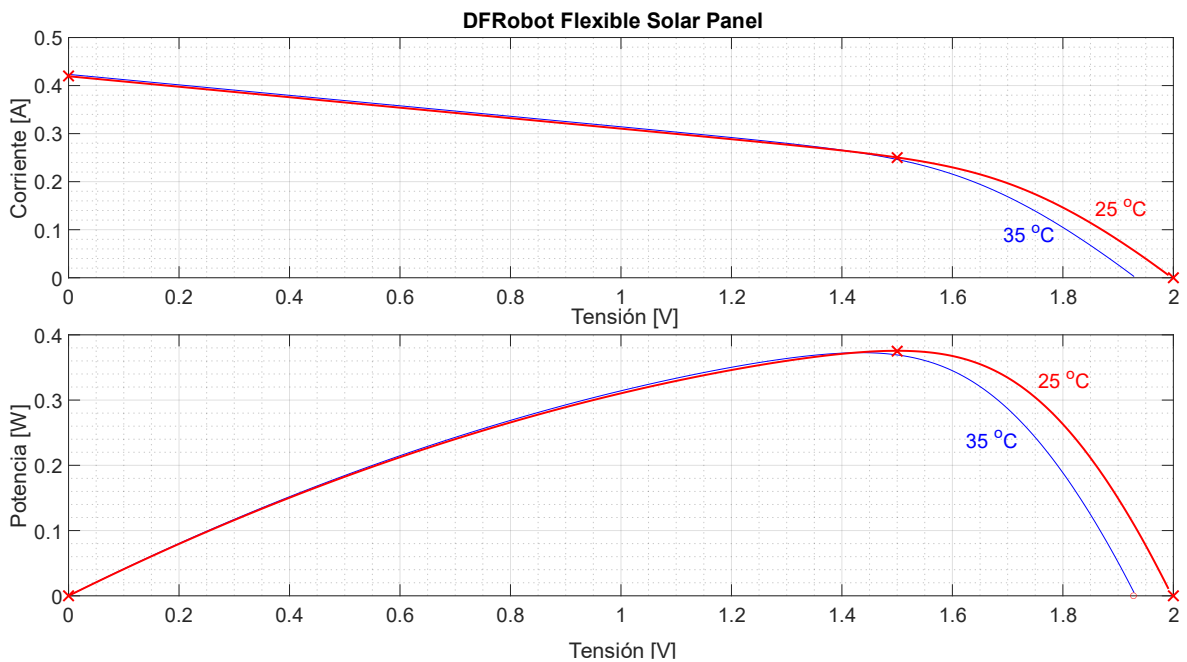


Figura 13: Característica I-V y P-V de la célula solar.

En la Figura 13 podemos observar la característica estática de la célula solar elegida y la potencia suministrada en función de la tensión a la salida. Estos gráficos están generados para una celda solar expuesta a una irradiación constante de 1000 w/m^2 a dos temperaturas diferentes (25°C y 35°C). Como vemos en la gráfica el punto de máxima potencia de nuestra célula se sitúa cercano al 1.5 V por lo que trataremos de regular la tensión para que esté en ese punto el máximo tiempo posible.

3.1.2 Simulación del modelo.

Nuestro modelo de simulación se basa en el diagrama de bloques de la Figura 14, en el que básicamente encontramos a la entrada los datos que presentamos en el caso de uso, a continuación, el modelo matemático que emula la célula fotovoltaica, posteriormente un convertidor elevador que controla la tensión de entrada al elemento final que es la batería recargable que tendría conectada la bomba de insulina:

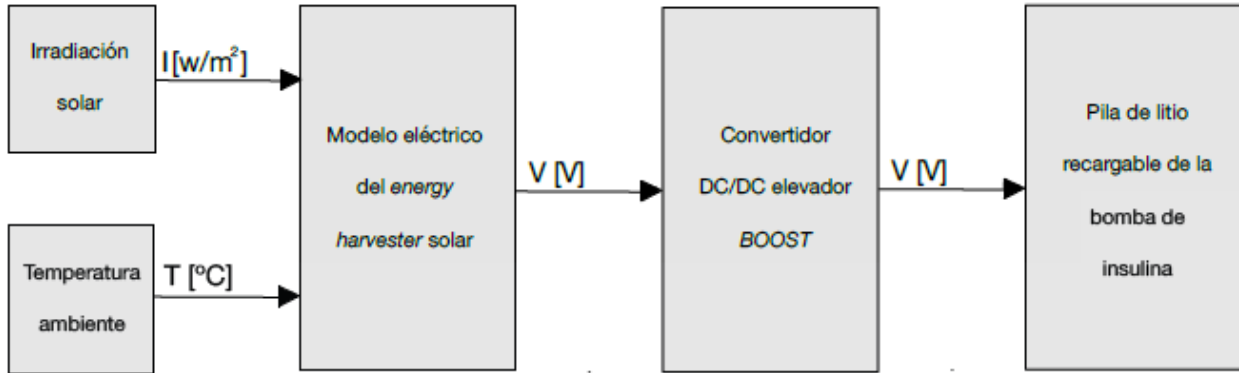


Figura 14: Diagrama de bloques del generador solar.

3.1.3 Modelos SIMULINK.

3.1.3.1 Control Automático Duty Cycle.

Con el lazo de control de la *Figura 15* podremos regular el *duty cycle* del convertidor DC/DC de forma autónoma simplemente teniendo en cuenta la tensión a la salida del *harvester* y cuál es la que nosotros hemos impuesto en el diseño que sea. De esta forma el control varía en función de las condiciones a las cuales se vea expuesto el generador.

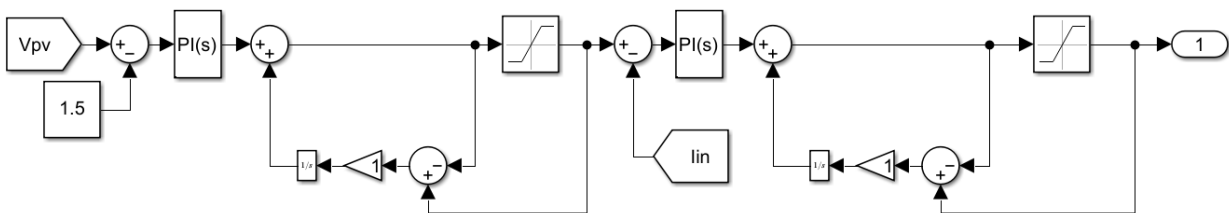


Figura 15: Lazo de control del Duty Cycle.

3.1.3.2 Convertidor DC/DC elevador.

En la *Figura 16* hemos implementado el bloque de SIMULINK del convertidor DC/DC ya que nos permite realizar una simulación promediada del convertidor con el objetivo de obtener una simulación más dinámica.

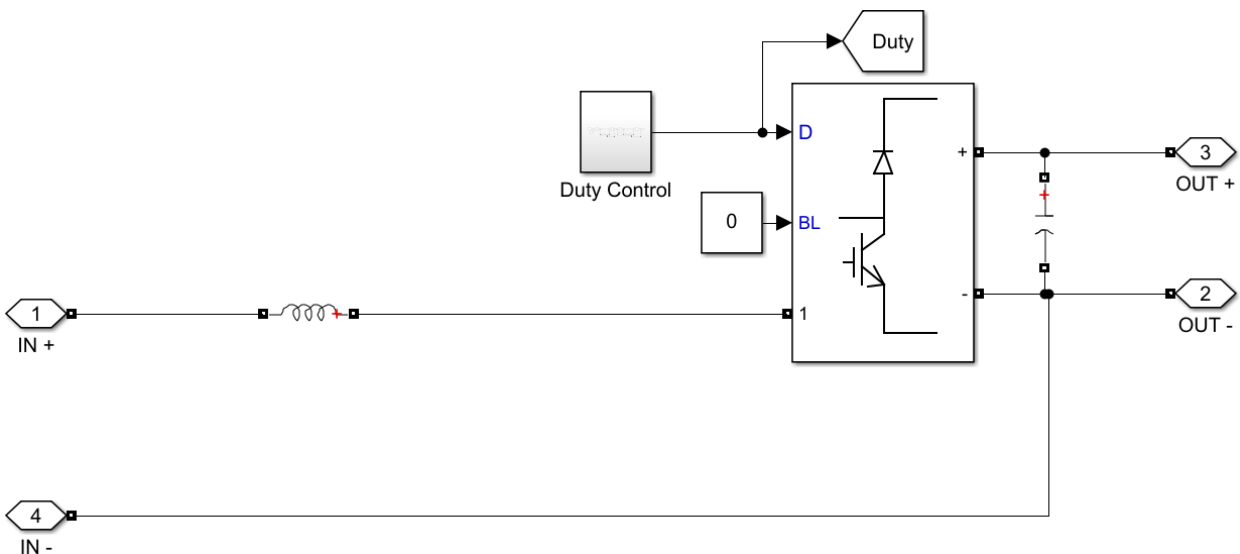


Figura 16: Esquema SIMULINK para convertidor DC/DC elevador.

3.1.3.3 Modelo solar.

En la *Figura 17* se muestra el modelo completo con el cual se han obtenido los resultados de la simulación de dicho *harvester*.

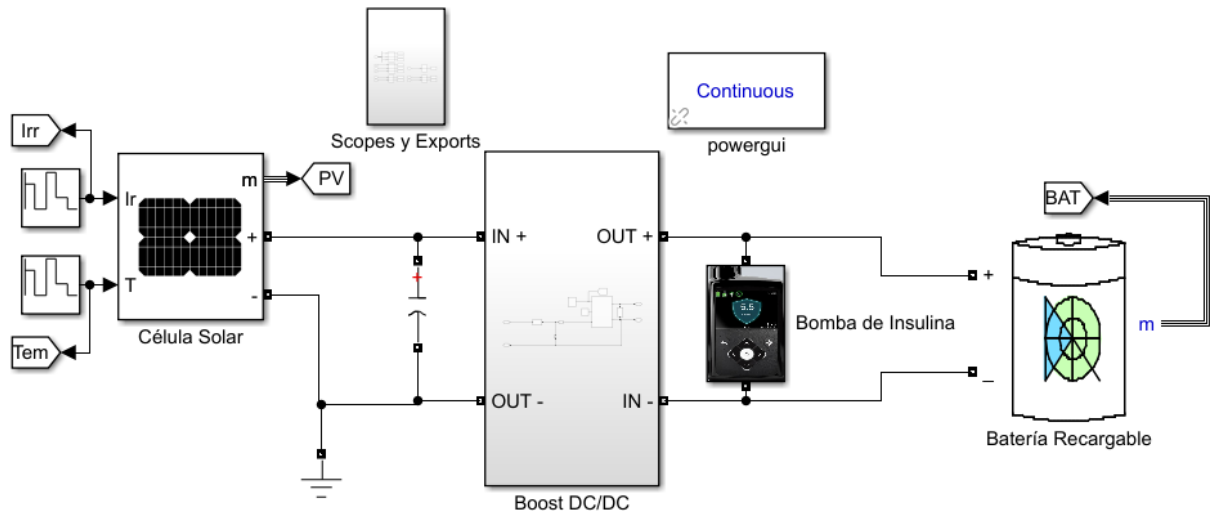


Figura 17: Modelo SIMULINK del harvester solar.

3.2 Generador Piezoeléctrico.

Para este generador hemos supuesto otro caso de uso donde los parámetros del usuario que resultan relevantes para la simulación son el peso del usuario (90 kg), el tiempo que pasa andando y el número de pasos por segundo que da durante el tiempo que anda. En la *Figura 18* se ilustra el número de pasos que da el usuario a lo largo del día, obtenidos de un caso real con una pulsera de actividad que ha registrado el número de pasos a cada media hora y por simplicidad hemos supuesto que se reparte uniformemente en dicho intervalo de tiempo:

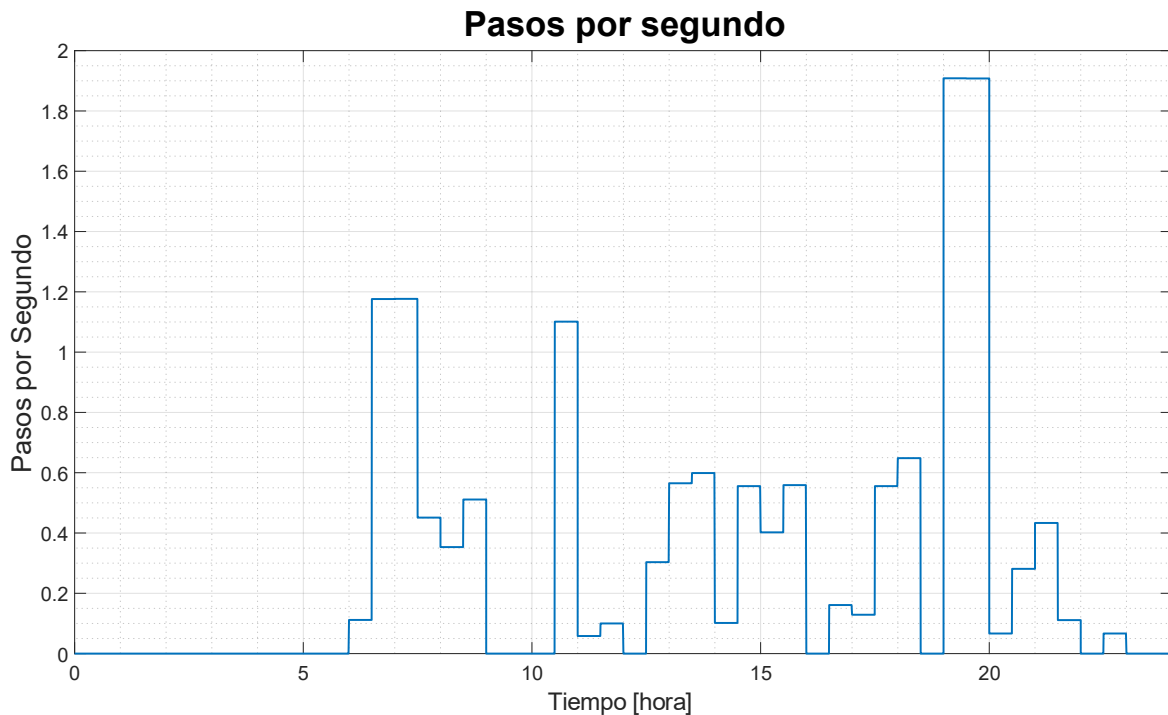


Figura 18: Pasos por segundo en el caso real.

En la Figura 18 observamos cómo evoluciona la cantidad de pasos por segundo que da el usuario, suponiendo un reparto uniforme a lo largo de intervalos de media hora. En el momento más alto que se alcanzan los 1.9 pasos por segundo, esto se corresponde con un entrenamiento (correr) en el resto del día solo camina a un ritmo más bajo.

3.2.1 Introducción teórica y ecuaciones de comportamiento.

El modelo de piezoeléctrico podría ser dividido en dos partes, la primera es la que modelo el comportamiento físico del material y cómo se comporta al deformarse. Y luego la segunda parte del modelo analiza la conversión de esta deformación a energía eléctrica. El primer modelo fue propuesto por Katz H.W. y es el que se usa de forma general para estudiar los piezoeléctricos:

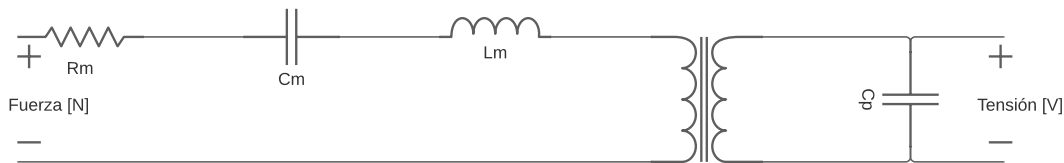


Figura 19: Modelo electromecánico de un piezoeléctrico [35].

En este modelo de la Figura 19 tenemos a la entrada la fuerza equivalente que deforma el material en nuestro caso la pisada que tiene unidades de Newton, una resistencia equivalente, R_m , que representa el amortiguamiento mecánico y tiene unidades de Ohmio, una capacidad equivalente, C_m , que modela la rigidez recíproca del material con unidades de Faradio y una inductancia equivalente, L_m , que modela la inercia del generador con unidades de Henrio. Y en la parte eléctrica del modelo tenemos un transformador con una relación de transformación n que represente el coeficiente de acoplamiento del piezoeléctrico y por último la capacidad equivalente a la salida, C_p , que modela la capacitancia inherente de las capas de PZT [36] que conforman el generador.

Dado este modelo el conjunto de ecuaciones {2} describe su comportamiento dinámico:

$$\begin{cases} R_m \cdot \ddot{x} + L_m \cdot \dot{x} = F - n \cdot V \\ V = \frac{n}{C_p} \cdot x - \frac{q}{C_p} \end{cases} \quad \{2\}$$

En el conjunto de ecuaciones {2} podemos ver como aparecen los parámetros del circuito equivalente R_m , n , C_p y L_m además de F que es la fuerza en unidades de Newton y V que es la tensión en Voltios, q es la carga de un electrón con valor de $1.6022 \cdot 10^{-19} C$, x es la deformación sufrida por el piezoeléctrico y \ddot{x} es la segunda derivada de dicha deformación.

3.2.2 Simulación del modelo.

El modelo implementado para simular este *harvester* sigue el diagrama de bloques de la Figura 20. Como podemos observar el circuito de acondicionamiento de la señal es bastante similar al del generador solar que expusimos en la Figura 14, con la salvedad de que en este caso tendremos un puente de diodos para rectificar a la salida del generador piezoeléctrico.

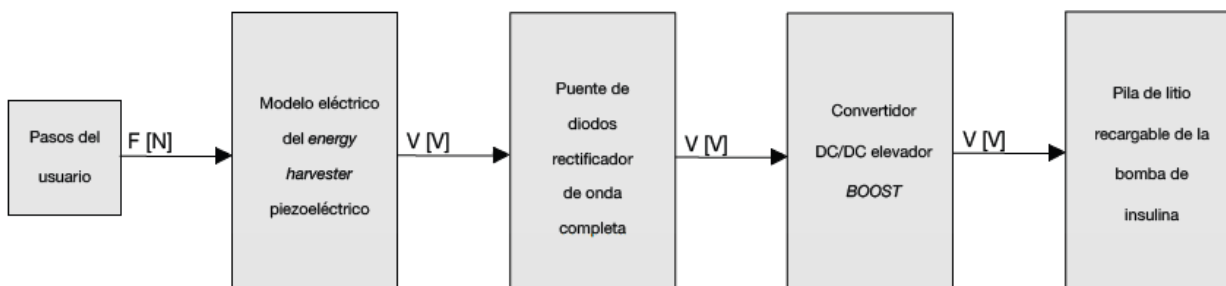


Figura 20: Diagrama de bloques del harvester piezoeléctrico.

3.2.3 Modelos de SIMULINK.

En esta simulación se vuelven a incluir los modelos de control automático del *duty cycle* y del convertidor elevador expuestos previamente en la *Figura 15* y *Figura 16* respectivamente, pero por simplicidad no se han vuelto a poner. Además, incluimos el puente de diodos y el modelo del piezoeléctrico.

3.2.3.1 Puente de diodos.

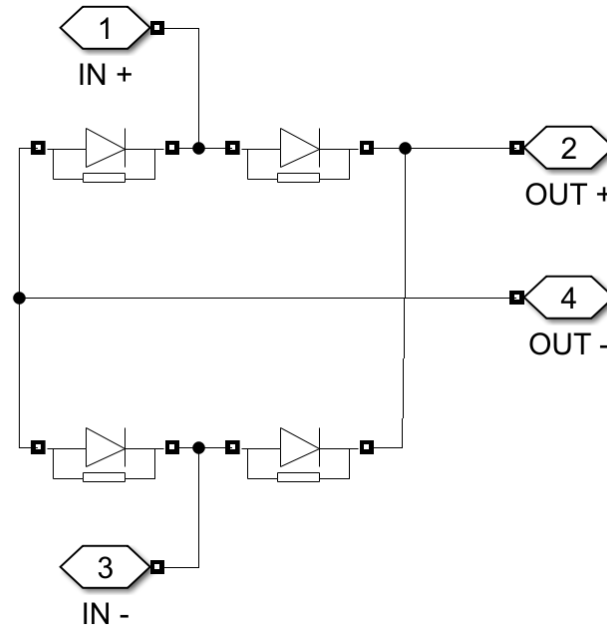


Figura 21: Puente de diodos rectificador de onda completa.

3.3 Modelo piezoeléctrico.

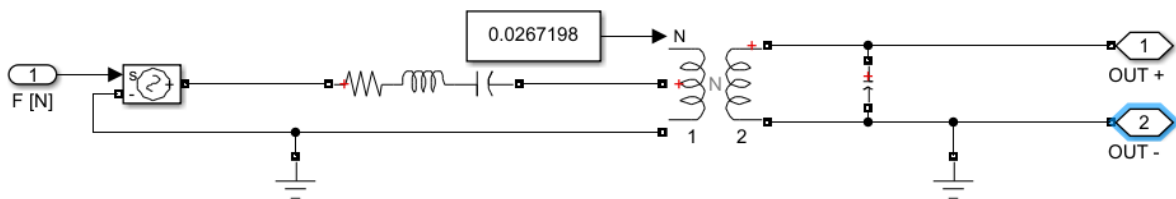


Figura 22: Modelo electromecánico del piezoeléctrico en SIMULINK.

Este es el modelo que hemos implementado en SIMULINK tal y como explicamos en el Apartado 3.2, luego en la simulación hemos colocado 3 de estos modelos con su respectivo rectificador de onda completa por cada zapatilla:

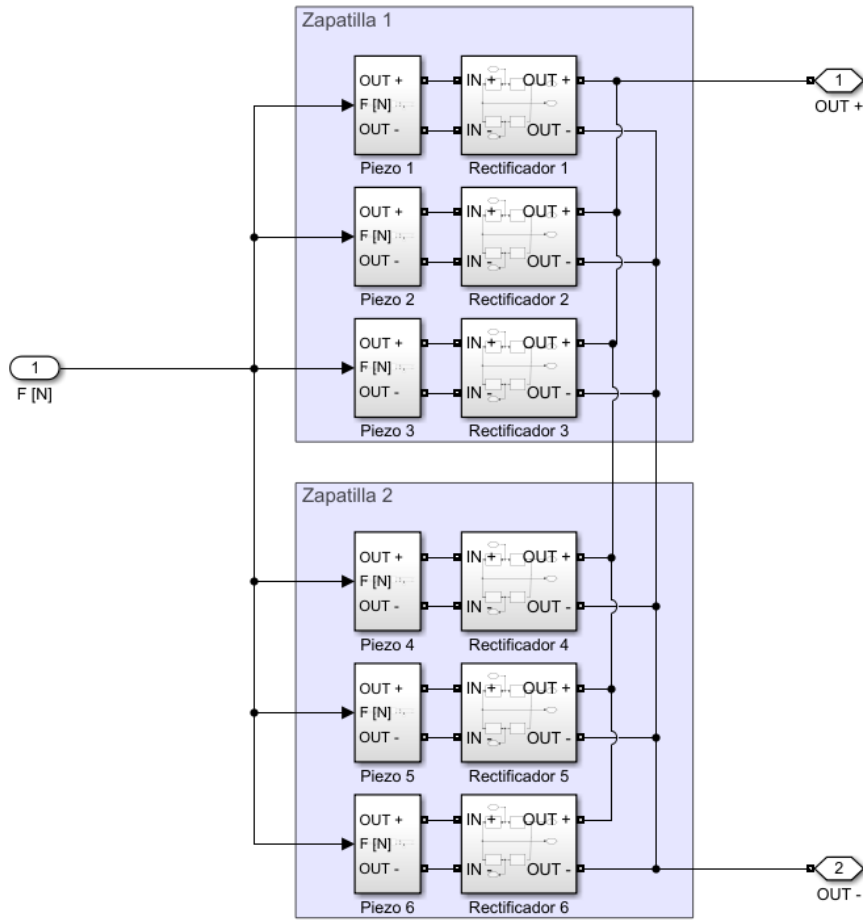


Figura 23: Montaje del harvester piezoeléctrico en SIMULINK.

Y, por último, el montaje del dispositivo completo se muestra en la Figura 24

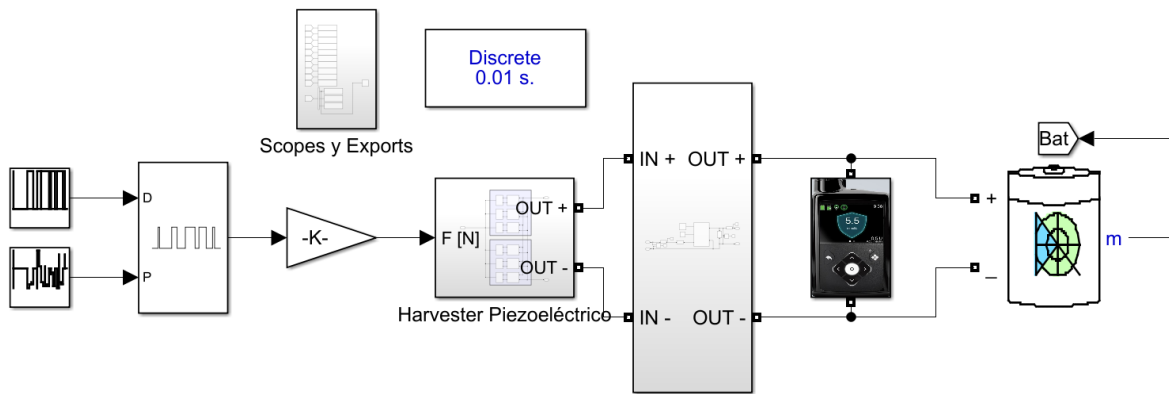


Figura 24: Montaje completo del harvester piezoeléctrico en SIMULINK.

3.4 Generador Termoeléctrico.

Para este modelo de generador el parámetro que resulta más relevante es el de la diferencia de temperatura entre el usuario y el ambiente, para ello hemos tomado una temperatura constante para el usuario (36.2°C) y la temperatura del ambiente se corresponde con la real de Sevilla a 17 de Mayo suponiendo que el usuario pasa ciertas horas del día en el interior de un recinto que cuenta con aire acondicionado y mantiene la sala en torno a 21°C, a continuación, en la Figura 25, representamos la evolución de temperaturas:

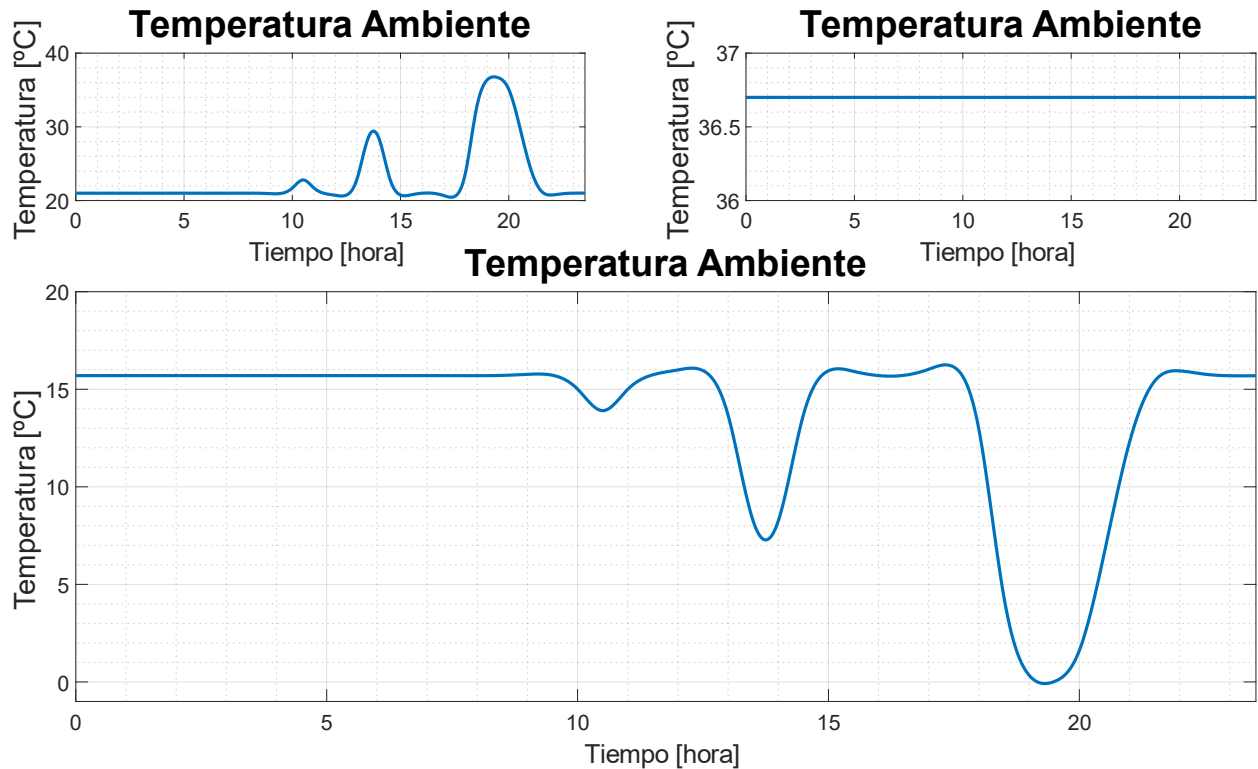


Figura 25: Evolución de la temperatura y la diferencia térmica.

Como comprobaremos en la simulación cuando la diferencia de temperaturas es muy pequeña, el dispositivo no genera la suficiente corriente como para cargar la batería, así que como hemos comentado anteriormente este dispositivo está pensado para un caso de uso donde el usuario no permanezca en ambientes con temperaturas altas, por encima de 30°C, durante períodos muy prolongados ya que en ese caso la producción es casi nula.

3.4.1 Introducción teórica y ecuaciones de comportamiento.

Como comentamos anteriormente, la simulación del modelo termoeléctrico se basa en el efecto de Seebeck por el cual dos materiales diferentes unidos que se encuentren a distintas temperaturas generan una diferencia de potencial que depende de dichos materiales. En nuestro caso hemos elegido una unión de hierro y constantán. La ecuación {3} que determina el voltaje generado por un termogenerador:

$$V = \alpha \cdot \Delta T \quad \{3\}$$

Donde α es un parámetro llamado coeficiente de Seebeck y sus unidades son $V/^{\circ}C$ en nuestro caso particular $\alpha = 0.000053 \frac{V}{^{\circ}C}$. Como podemos comprobar cada termopar genera una tensión muy pequeña por cada grado de diferencia entre las dos placas, por tanto, tenemos que colocar varios termopares en serie para poder tener una producción significativa.

Existen dispositivos comerciales como el MPG-D751 que alcanzan densidades de hasta 100 termopares por mm^2 [37], esto significa que, aunque generen poco de forma individual, también se pueden conectar muchos en poco espacio. En concreto en nuestra simulación hemos considerado que tendremos 800 termopares conectados en serie.

3.4.2 Simulación del modelo.

Para la construcción del modelo en Simulink, hemos seguido el diagrama de bloques que se expone en la Figura 26:

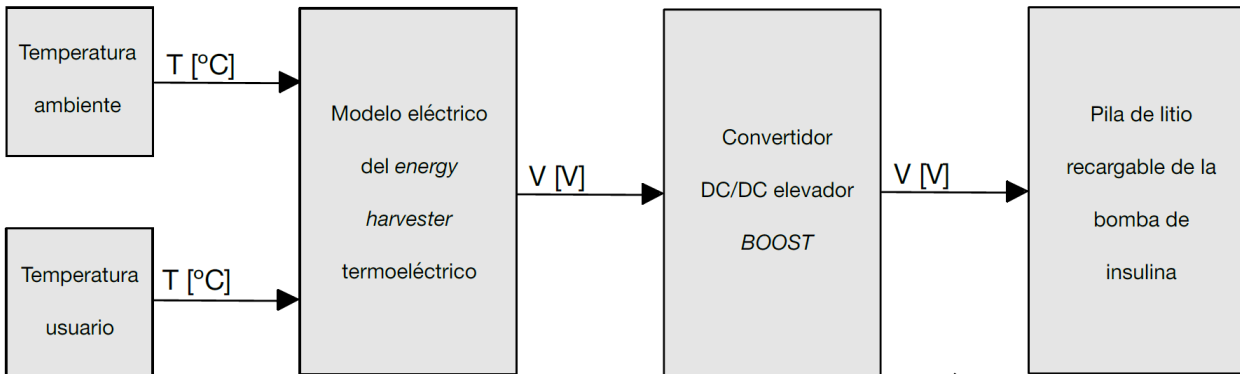


Figura 26: Diagrama de bloques del generador termoelectrico.

3.4.3 Modelo de SIMULINK.

Tal y como en el caso del generador piezoeléctrico, los modelos de convertidor elevador y control automático del *duty cycle* vuelven a ser idénticos a los del generador solar del Apartado 3.1.3, así que no se vuelven a añadir.

3.4.3.1 Modelo termoelectrico.

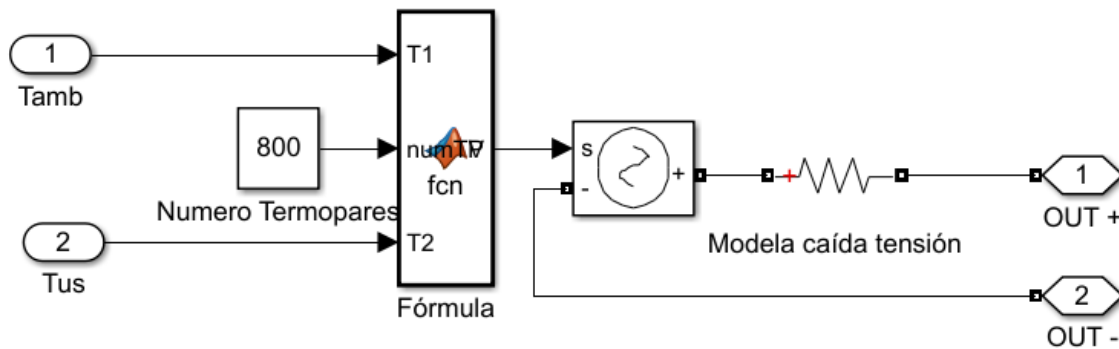


Figura 27: Modelo matemático del harvester termoelectrico en SIMULINK.

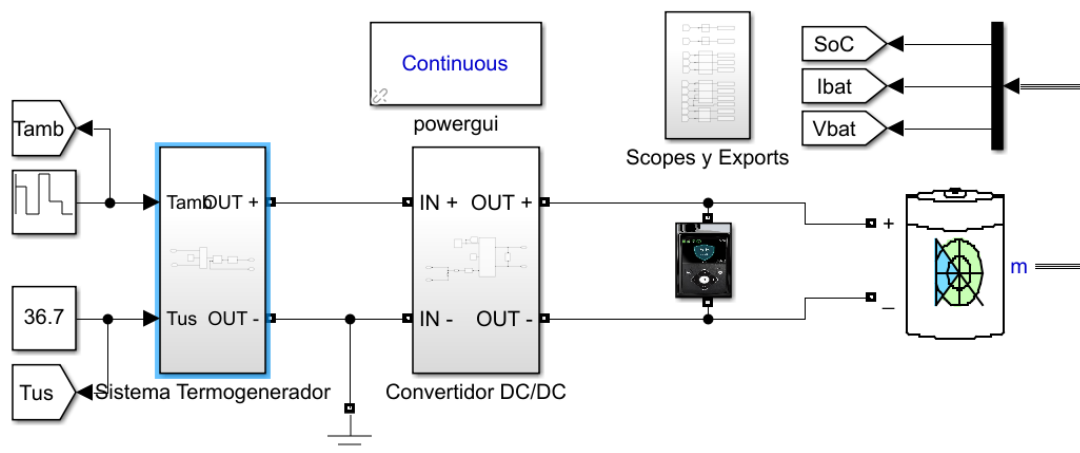


Figura 28: Modelo completo del harvester termoelectrico en SIMULINK.

4 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

Tal y como hemos hecho en el apartado anterior realizamos un análisis individual para cada uno de los diferentes tipos de *harvesters* propuestos:

4.1 *Harvester* Solar.

La celda solar elegida de DFRobot [32] expuesta a la temperatura ambiente e irradiación solar que se muestran en la Figura 10 y Figura 11 respectivamente se obtiene la salida tanto de tensión como de corriente que se muestra en la Figura 29:

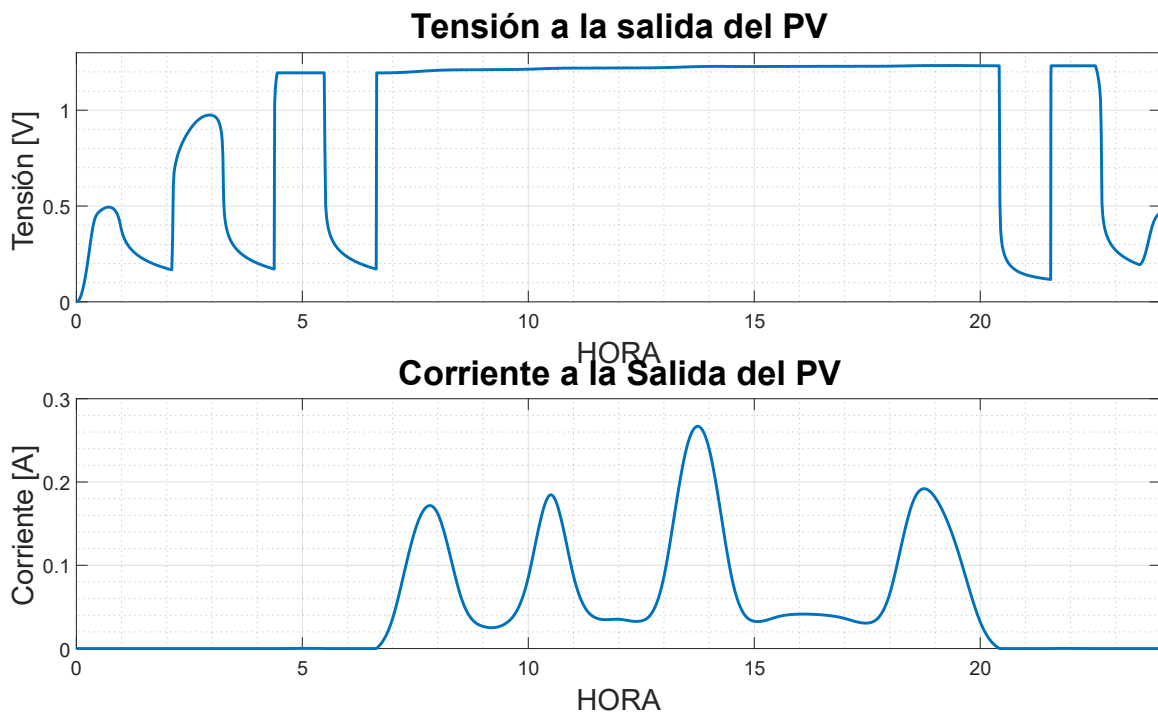


Figura 29: Salida de la celda solar.

Como podemos comprobar en la Figura 29 la corriente a la salida depende exclusivamente de la irradiación solar a la cual se ve expuesta la celda, por ello en los momentos en los que la irradiación se reduce también lo hace la corriente y por tanto la producción de energía.

Para controlar el convertidor elevador que regula la tensión de alimentación de la batería hacemos uso de un control automático del *duty cycle* o ciclo de trabajo, que es el tiempo que se mantiene en estado activo una señal PWM que regula el funcionamiento del convertidor DC/DC. En este caso, como podemos apreciar en la Figura 30, se establece en torno al 0.76 que quiere decir que la señal se mantiene activa un 76 por ciento del tiempo.

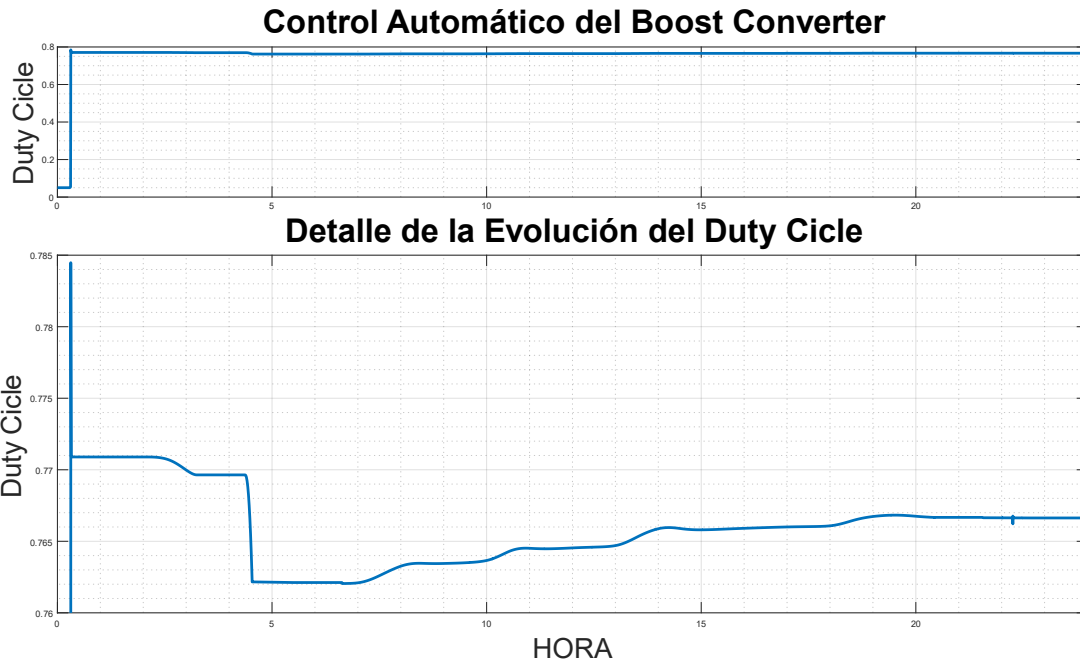


Figura 30: Duty Cycle del convertidor DC/DC.

En la *Figura 31* podemos apreciar la corriente que demanda la carga, en nuestro caso, la bomba de insulina y la corriente que carga a la pila recargable. En el gráfico inferior observamos que en los momentos que hay baja exposición a la irradiación solar, disminuye el estado de carga de la batería ya que la célula solar no suministra energía, sin embargo, en los momentos en los que se expone al sol aumenta dicho porcentaje. Como podemos comprobar el estado de carga aumenta un 14% a lo largo del día, además de estar alimentando a la bomba de insulina.

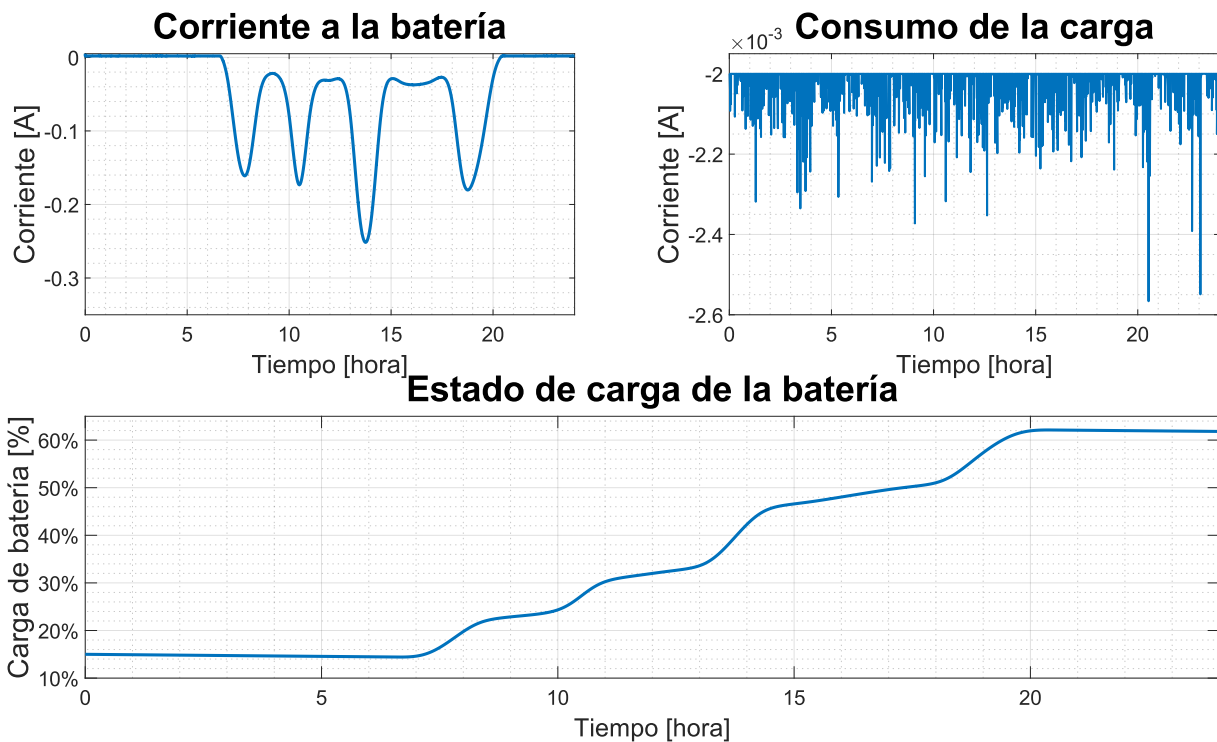


Figura 31: Evolución del estado de carga de la batería.

4.2 Harvester termoeléctrico.

En el caso de uso que hemos tomado como ejemplo para la realización de las simulaciones de este generador tenemos las temperaturas previamente expuestas en la Figura 25:

Como podemos comprobar en dicha figura la mayor parte del tiempo la diferencia de temperaturas es de entorno a las 16°C aunque en los momentos en los que el usuario sale a la calle o abandona el entorno con una temperatura más fresca se produce una disminución de esta diferencia térmica y como cabe pensar, esta diferencia determina la cantidad de energía que generamos con el uso del *harvester* así que como podemos comprobar en la Figura 32 la potencia será mayor en los momentos en los que la diferencia de temperaturas sea mayor:

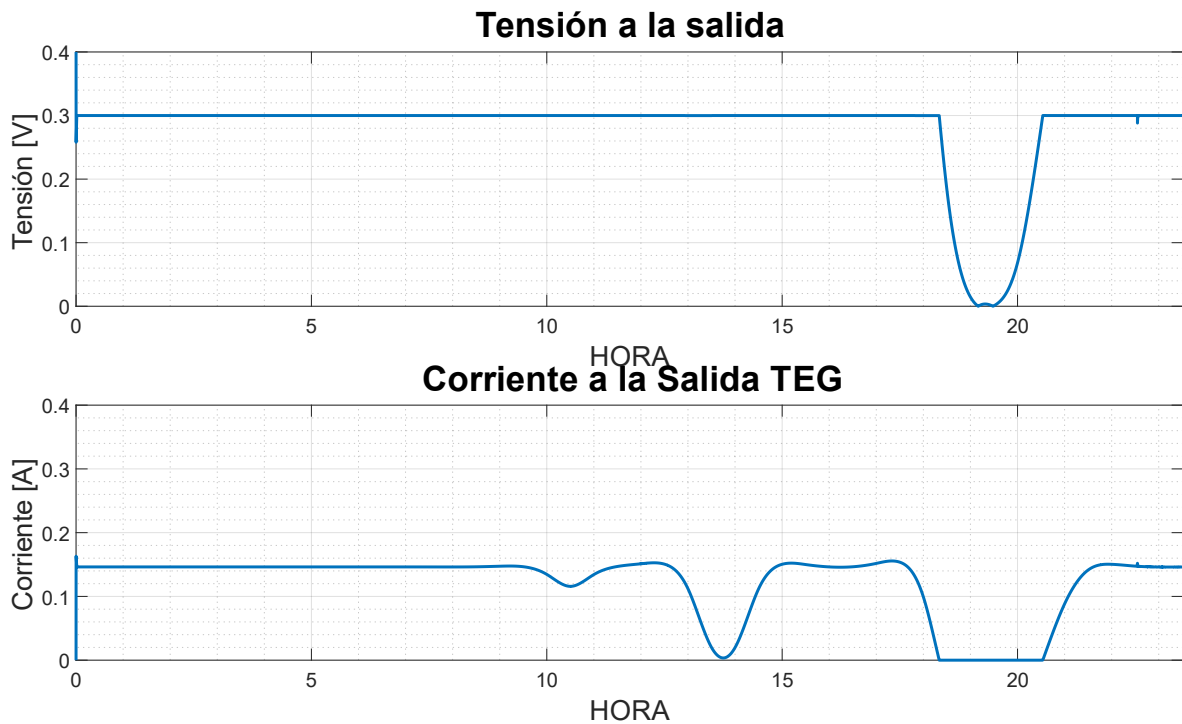


Figura 32: Salida del harvester termoeléctrico.

Como podemos observar en la salida del TEG, la corriente disminuye en los momentos en los que la diferencia de temperaturas baja de los 10°C hasta prácticamente rozar el cero. Como se puede verificar la tensión se mantiene constante gracias al control que hemos establecido para ello, sin embargo, en el momento en que la diferencia de temperaturas disminuye hasta un punto en el que no podemos mantener la tensión constante a la entrada del convertidos DC/DC y se observa que coincide justo con el momento donde la diferencia de temperaturas baja de los 10°C .

Para el control del convertidor DC/DC elevador volvemos a utilizar un control automático del duty cycle como en el apartado anterior, en la Figura 33 podemos comprobar cómo ha sido la evolución de esta de señal de control a lo largo de la simulación.

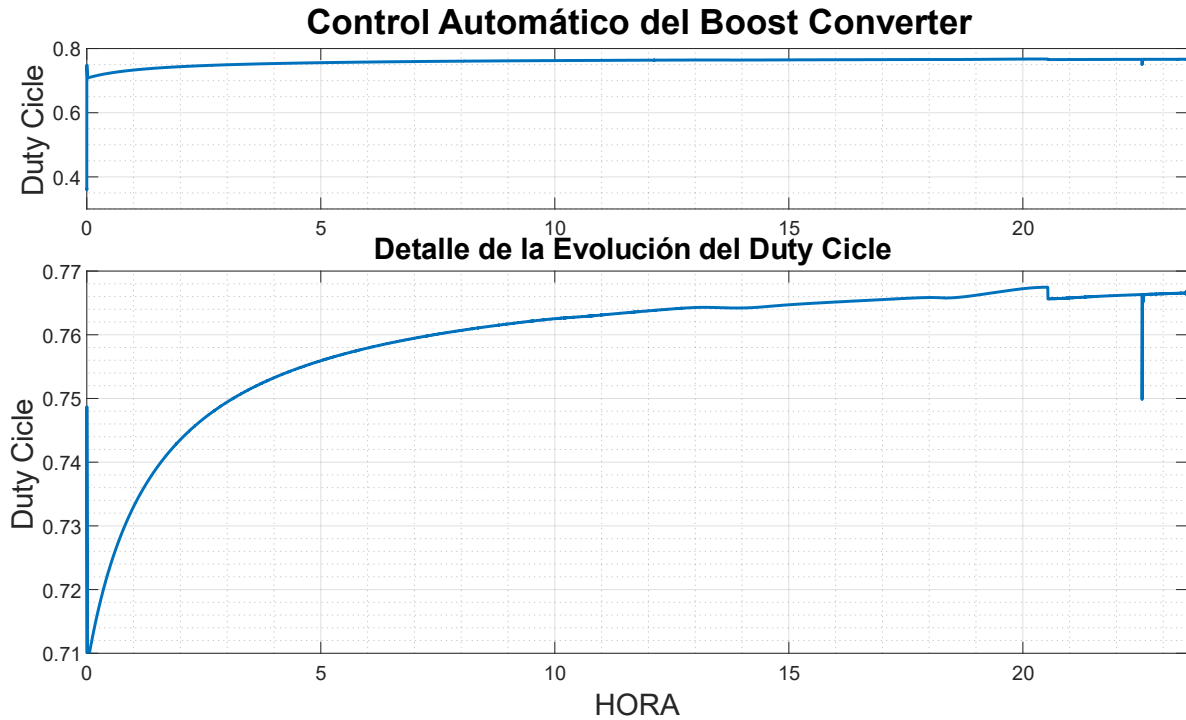


Figura 33: Duty Cycle del convertidor DC/DC.

Por último, analizamos el estado de la batería y la cantidad de carga conseguimos almacenar a lo largo de un día de uso:

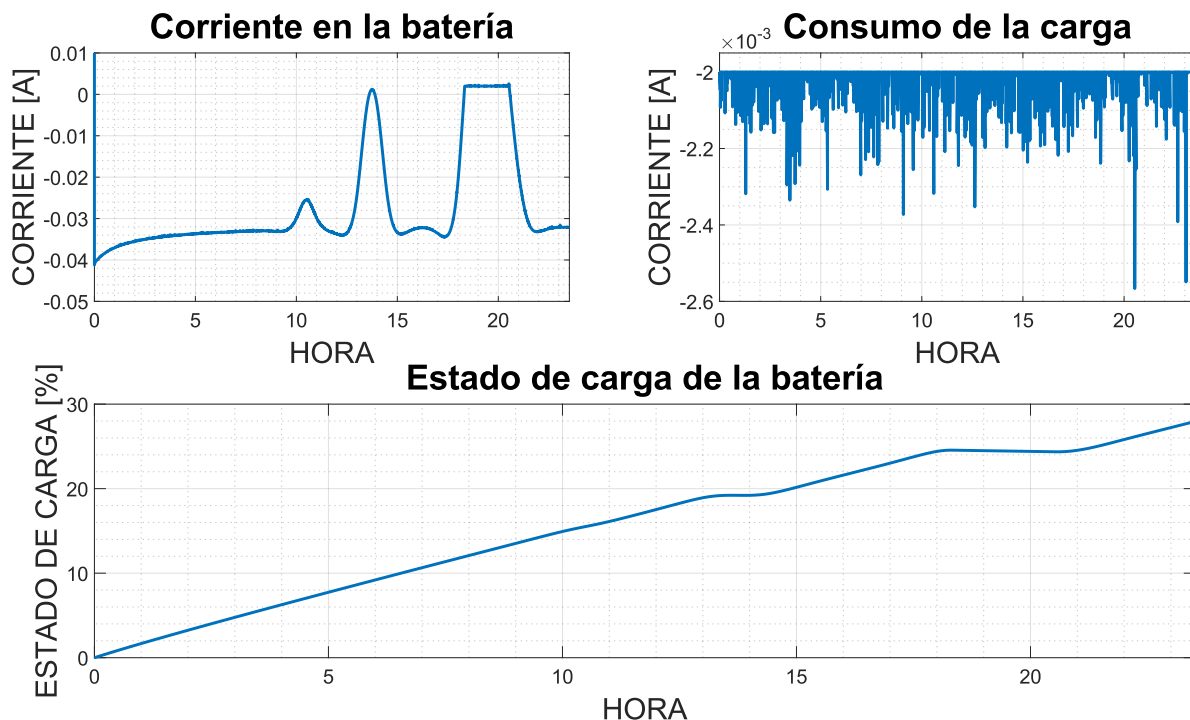


Figura 34: Evolución del estado de carga de la batería.

Como podemos comprobar en este caso alcanzamos un 28.1% de carga en la batería lo cual supone un incremento de casi el doble con respecto al *harvester* solar y esto se debe principalmente a que el *harvester* funciona en la mayor parte del día debido a que la temperatura de una habitación cualquiera y el cuerpo humano tienen una diferencia de temperaturas tal que puede generar energía y en el caso del solar si se encuentra en interiores apenas genera nada.

4.3 *Harvester* piezoeléctrico.

En este caso los datos de entrada al generador son los pasos del usuario que representamos anteriormente en la *Figura 18*, para los parámetros del generador hemos utilizado unos parámetros obtenidos mediante un análisis de elementos finitos en LTSpice [38], los valores que hemos utilizado son:

$R_m = 6.9366 \Omega$	$C_m = 5.874 \mu F$	$C_p = 80 nF$
$L_m = 1 H$	$n = 0.0267198$	

Tabla 4: Parámetros obtenidos con FEA del piezoeléctrico [38].

Con estos parámetros, y suponiendo que hemos colocado 3 piezoeléctricos en serie en cada zapatilla, obtenemos a la salida del generador los resultados que se muestran en la *Figura 35*.

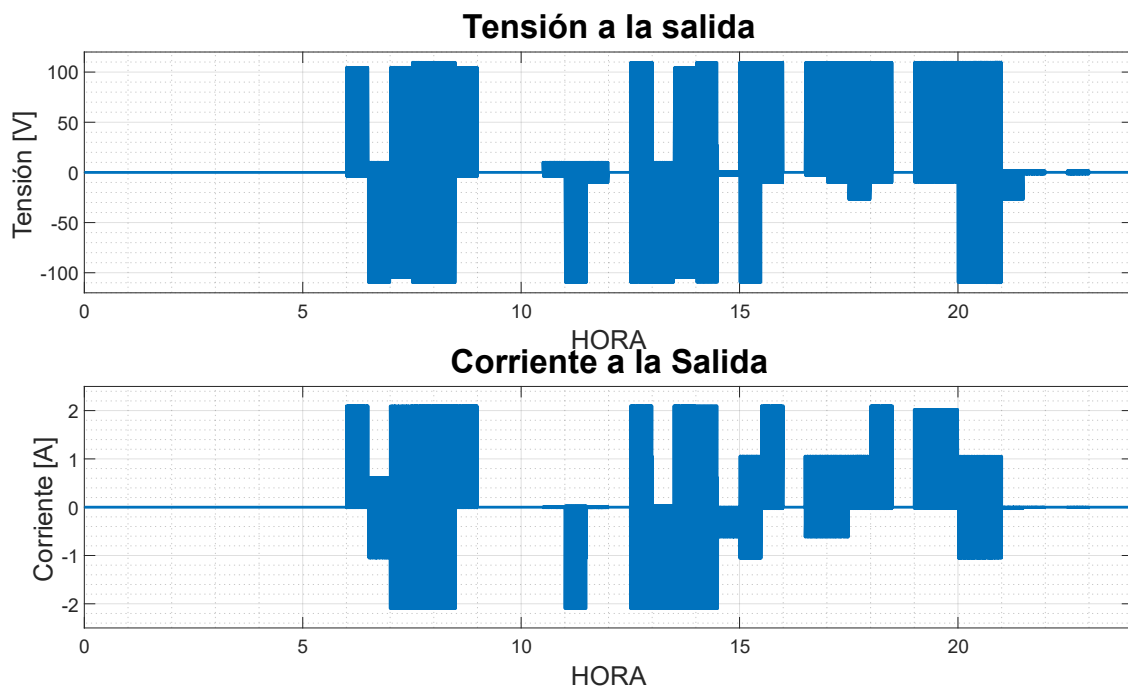


Figura 35: Tensión y corriente a la salida del piezoeléctrico.

Como se puede observar el generador da picos de tensión y de corriente muy elevados pero que no tienen mucha duración, aproximadamente la misma que la duración que hemos considerado para cada pisada, es decir, genera tensión en el momento que se deforma. Esto lo podemos verificar en los resultados que se representan en la *Figura 36*:

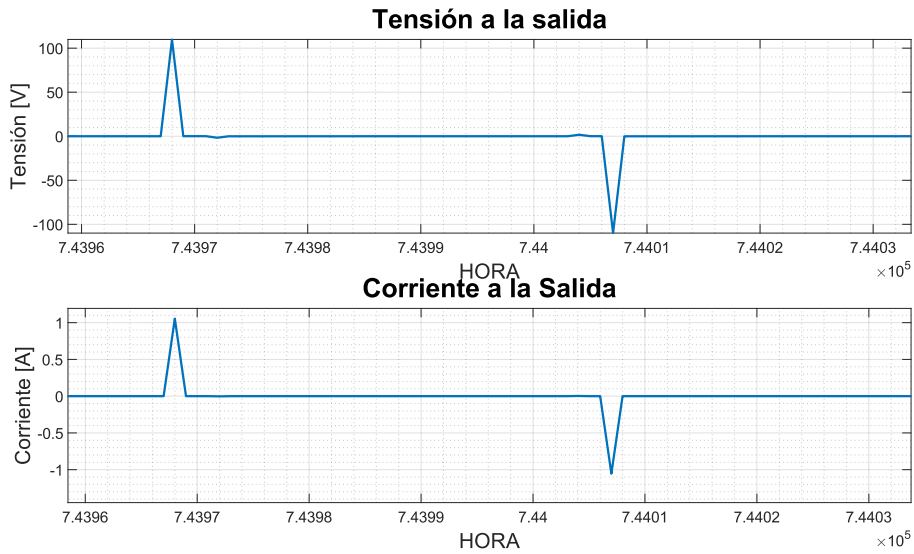


Figura 36: Detalle de los picos de tensión y corriente en el piezoeléctrico.

Como se puede observar en la Figura 36, los picos tanto de tensión como de corriente que ocurren cuando el piezoeléctrico recibe la pisada del usuario son de un valor muy elevado, del orden de 100 V en el caso de la tensión y de 2 A en el caso de la corriente. También vemos que la corriente tiene picos de tensión positivos y negativos así que para intentar evitar los picos negativos introducimos un rectificador de onda completa con un puente de diodos, obteniendo el resultado que se muestra en la Figura 37:

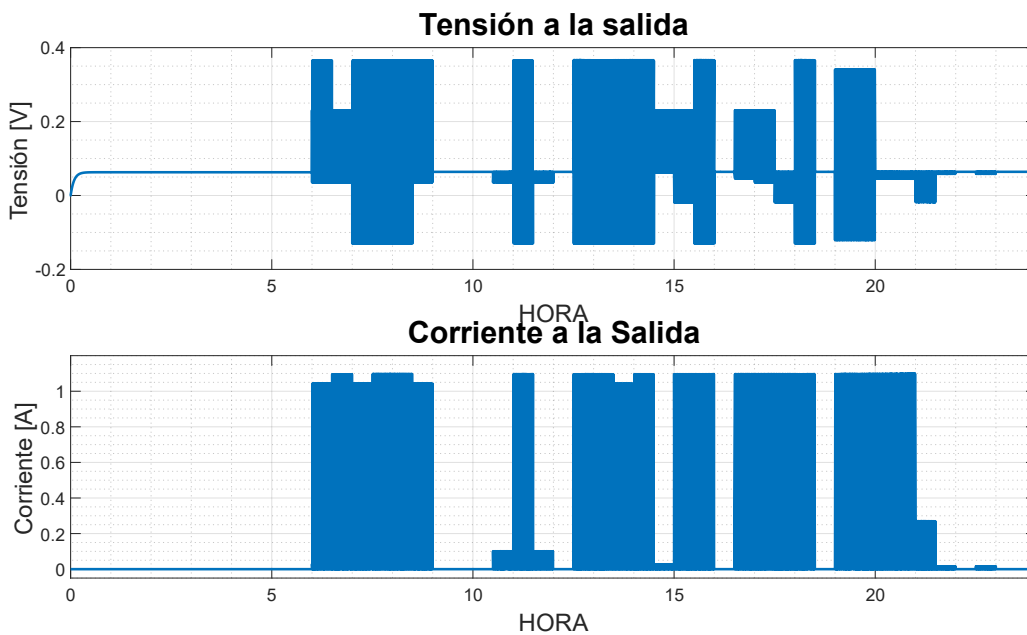


Figura 37: Tensión y corriente a la salida del rectificador.

Como se observa en la Figura 37, ahora tenemos picos de corriente positiva tal y como buscábamos, a continuación, en la Figura 38 cómo ha evolucionado a lo largo del día el estado de carga de la batería:

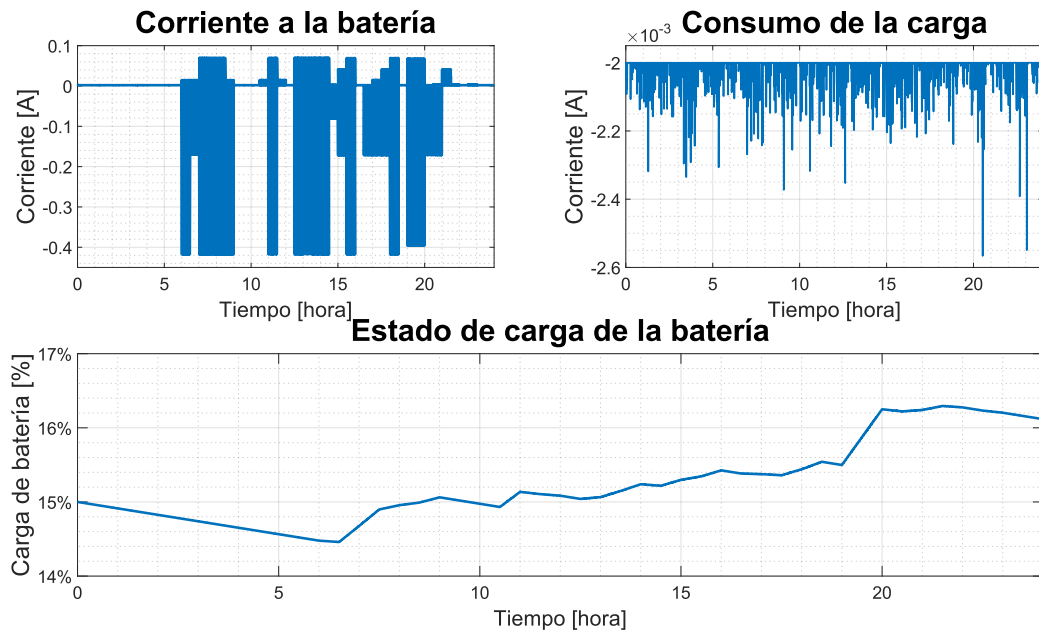


Figura 38: Evolución del estado de carga de la batería.

5 CONCLUSIONES

5.1 Conclusiones generales.

En general las conclusiones que podemos sacar de las simulaciones realizadas es que en todos los casos podremos generar suficiente energía como para alimentar una bomba de insulina con su uso normal sin problema y además cargar una pila para los momentos en los que, por cualquier motivo, no se pueda generar potencia.

Aunque sí que es cierto que estos generadores cumplen más o menos con su función dependiendo del estilo de vida del usuario, es decir, una persona que no ande mucho y se pase gran parte del día sentada no podrá aprovechar la producción de energía del piezoeléctrico, sin embargo, si está persona que está mucho tiempo sentada se encuentra en una sala aclimatada podrá exprimir la producción de un generador termoeléctrico ya que mantendrá una diferencia de temperaturas elevada constante durante un período prolongado de tiempo.

Cabe resaltar una problemática con el planteamiento del proyecto y es de qué forma conectaríamos el *harvester* a la bomba de insulina ya que parece realmente poco práctico el uso de cables para la interconexión de estos dispositivos. Aunque podría plantearse el caso de conectar un termogenerador colocado en el brazo a la bomba de insulina, no es muy lógico intentar conectar un generador piezoeléctrico colocado en la suela del zapato a una bomba de insulina que generalmente se coloca en la cintura.

En vistas de dicho problema aparece una solución que actualmente está siendo muy investigada que es la transmisión inalámbrica de energía, sin necesidad de cables de ningún tipo, mediante resonancia magnética y en un principio de forma teórica sería posible tener una eficiencia suficiente como para que la transmisión fuera efectiva [39], obteniendo un rendimiento del 75% en distancias inferiores a 20 cm.

5.2 Cronograma y presupuesto.

La duración total del proyecto ha sido de 22 semanas, desde la primera semana de febrero hasta la primera semana de julio, la distribución del trabajo a lo largo del proyecto ha sido la que se muestra en la *Figura 39*

ACTIVIDAD	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio
Investigación previa	█					
Estructuración de la información	█					
Estado del Arte		█	█			
Definición de objetivos		█				
Análisis de Resultados					█	
Conclusiones					█	█
Búsqueda modelos analíticos	█	█				
Montajes SIMULINK		█				
Simulación modelo piezoeléctrico			█	█	█	
Simulación modelo termoeléctrico			█	█		
Simulación modelo solar			█	█		
Presentación						█

Figura 39: Diagrama de Gantt del proyecto.

En total, el proyecto ha contado con 220 horas, ya que se han dedicado aproximadamente 10 horas por semana. De acuerdo con el BOE [40] un ingeniero debe cobrar 1799.68€ mensuales, por tanto, las 220 horas invertidas en el proyecto supondrían un coste de 2249.60€.

5.3 Líneas futuras de investigación.

Con los resultados de la simulación y los modelos propuestos tenemos una solución viable al uso de baterías desechables para dispositivos biomédicos como pueden ser las bombas de insulina. Sin embargo, el proyecto tiene mucho por mejorar y existen varias líneas de desarrollo que podrían ser las siguientes:

- 1) Implementación física de los *energy harvester* y comprobación de la veracidad de las simulaciones.

Implementar uno o varios de los *harvester* a la vez y, haciendo un uso real de ellos, poder comprobar de forma experimental si obtuviéramos unos resultados favorables que resulten en la alimentación de un dispositivo biomédico como puede ser una bomba de insulina.

- 2) Investigación y simulación de un *energy harvester* con transmisión de energía sin cables.

Comprobar mediante análisis y simulación que posibilidad existiría de que el *harvester* transmitiese la energía de una forma totalmente libre de cables al dispositivo el cual quisiese alimentar.

REFERENCIAS

- [1] E. Gutiérrez-Torre, A. R. Alconero-Camarero, B. Torres-Manrique, and E. Rodríguez-Martín, “Primer contacto con una bomba de insulina. Caso clínico,” *Enfermería Clínica*, vol. 21, no. 2, pp. 110–114, Mar. 2011, doi: 10.1016/J.ENFCLI.2010.11.006.
- [2] P. Martín Vaquero, A. Fernández Martínez, and L. Felipe Pallardo, “Bombas de insulina,” *Medicina Clínica*, vol. 123, no. 1, pp. 26–30, Jun. 2004, doi: 10.1016/S0025-7753(04)74400-0.
- [3] “Sistema MiniMed™ 780G | Medtronic España.” <https://www.medtronic-diabetes.com/es-ES/sistema-integrado-minimed-780g> (accessed May 05, 2022).
- [4] Y. K. Ramadass and A. P. Chandrakasan, “An Efficient Piezoelectric Energy Harvesting Interface Circuit Using a Bias-Flip Rectifier and Shared Inductor,” *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, vol. 45, no. 1, pp. 189–204, Jan. 2010, doi: 10.1109/JSSC.2009.2034442.
- [5] J. Zhao *et al.*, “Self-Powered Implantable Medical Devices: Photovoltaic Energy Harvesting Review,” *Advanced Healthcare Materials*, vol. 9, no. 17, p. 2000779, Sep. 2020, doi: 10.1002/adhm.202000779.
- [6] T. J. Kázmierski and S. Beeby, *Energy harvesting systems: Principles, modeling and applications*. Springer New York, 2011. doi: 10.1007/978-1-4419-7566-9.
- [7] A. Harb, “Energy harvesting: State-of-the-art,” *Renewable Energy*, vol. 36, no. 10, pp. 2641–2654, Oct. 2011, doi: 10.1016/j.renene.2010.06.014.
- [8] T. Starner, “Human-powered wearable computing,” *IBM Systems Journal*, vol. 35, no. 3.4, pp. 618–629, 1996, doi: 10.1147/sj.353.0618.
- [9] J. P. Thomas, M. A. Qidwai, and J. C. Kellogg, “Energy scavenging for small-scale unmanned systems,” *Journal of Power Sources*, vol. 159, no. 2, pp. 1494–1509, Sep. 2006, doi: 10.1016/j.jpowsour.2005.12.084.
- [10] N. S. Shenck and J. A. Paradiso, “Energy scavenging with shoe-mounted piezoelectrics,” *IEEE Micro*, vol. 21, no. 3, pp. 30–42, 2001, doi: 10.1109/40.928763.
- [11] A. E. Ronald Pelrine, “Heel-Strike Generator Using Electrostrictive Polymers,” Aug. 2002.
- [12] “Thermo Life® Technical Data.” <http://www.poweredbythermolife.com/techdata.htm> (accessed Apr. 27, 2022).
- [13] J. M. Gilbert and F. Balouchi, “Comparison of energy harvesting systems for wireless sensor networks,” *International Journal of Automation and Computing*, vol. 5, no. 4, pp. 334–347, Oct. 2008, doi: 10.1007/s11633-008-0334-2.
- [14] “Global Solar Atlas.” <https://globalsolaratlas.info/detail?c=36.129002,-6.921387,6&r=ESP> (accessed Apr. 27, 2022).
- [15] “Global Solar Atlas.” <https://globalsolaratlas.info/map?c=40.157885,-2.548828,7&r=ESP> (accessed May 26, 2022).
- [16] “Radiación solar.” <http://www.agenciaandaluzadelaenergia.es/Radiacion/radiacion3.php> (accessed Apr. 27, 2022).
- [17] U. Alvarado, A. Juanicorena, I. Adin, B. Sedano, I. Gutiérrez, and J. de Nó, “Energy harvesting technologies for low-power electronics,” *Transactions on emerging telecommunications technologies*, vol. 23, no. 8, pp. 728–741, 2012, doi: 10.1002/ETT.2529.
- [18] W. Ma, C. Yang, X. Gong, K. Lee, and A. J. Heeger, “Thermally Stable, Efficient Polymer Solar Cells with Nanoscale Control of the Interpenetrating Network Morphology,” *Advanced Functional Materials*, vol. 15, no. 10, pp. 1617–1622, Oct. 2005, doi: 10.1002/adfm.200500211.
- [19] “Efecto piezoeléctrico | Kistler.” <https://www.kistler.com/es/glosario/termino/efecto-piezoelctrico/> (accessed May 04, 2022).

- [20] Md. M. Likhon, S. I. Shawan, Md. N. S. bin Alam, and S. Siddique, "Characterizing Piezoelectric Properties of PZT-4, PZT-5A, PZT-5J, PZT-7A and Lithium Tantalate Material-based Transducers," in *2021 International Conference on Green Energy, Computing and Sustainable Technology (GECOST)*, Jul. 2021, pp. 1–4. doi: 10.1109/GECOST52368.2021.9538753.
- [21] P. Ueberschlag, "PVDF piezoelectric polymer," *Sensor Review*, vol. 21, no. 2, pp. 118–125, 2001, doi: 10.1108/02602280110388315/FULL/PDF.
- [22] J. Song, G. Zhao, B. Li, and J. Wang, "Design optimization of PVDF-based piezoelectric energy harvesters," *Heliyon*, vol. 3, no. 9, p. e00377, Sep. 2017, doi: 10.1016/j.heliyon.2017.e00377.
- [23] "Material Properties - Piezo Support." <https://support.piezo.com/article/62-material-properties> (accessed Jul. 04, 2022).
- [24] A. Y. Faraji, A. Date, R. Singh, and A. Akbarzadeh, "Base-load Thermoelectric Power Generation Using Evacuated Tube Solar Collector and Water Storage Tank," *Energy Procedia*, vol. 57, pp. 2112–2120, 2014, doi: 10.1016/j.egypro.2014.10.178.
- [25] "Introducción a la Termoelectricidad." [http://www.unavarra.es/ets02/Introduccion%20a%20TE\(c\).htm](http://www.unavarra.es/ets02/Introduccion%20a%20TE(c).htm) (accessed May 04, 2022).
- [26] Z. Soleimani, S. Zoras, B. Ceranic, S. Shahzad, and Y. Cui, "A review on recent developments of thermoelectric materials for room-temperature applications," *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 37, p. 100604, Feb. 2020, doi: 10.1016/j.seta.2019.100604.
- [27] Y. Zou, L. Bo, and Z. Li, "Recent progress in human body energy harvesting for smart bioelectronic system," *Fundamental Research*, vol. 1, no. 3, pp. 364–382, May 2021, doi: 10.1016/J.FMRE.2021.05.002.
- [28] W. Ren *et al.*, "High-performance wearable thermoelectric generator with self-healing, recycling, and Lego-like reconfiguring capabilities," *Science Advances*, vol. 7, no. 7, Feb. 2021, doi: 10.1126/sciadv.abe0586.
- [29] H. Ryu and S. Kim, "Emerging Pyroelectric Nanogenerators to Convert Thermal Energy into Electrical Energy," *Small*, vol. 17, no. 9, p. 1903469, Mar. 2021, doi: 10.1002/smll.201903469.
- [30] Y. Wu *et al.*, "A multi-mode triboelectric nanogenerator for energy harvesting and biomedical monitoring," *Nano Energy*, vol. 92, Feb. 2022, doi: 10.1016/J.NANOEN.2021.106715.
- [31] D. Lee *et al.*, "Totally implantable enzymatic biofuel cell and brain stimulator operating in bird through wireless communication," *Biosensors and Bioelectronics*, vol. 171, Jan. 2021, doi: 10.1016/J.BIOS.2020.112746.
- [32] "Flexible Solar Panel (1.5v 250mA)-DFRobot." <https://www.dfrobot.com/product-999.html> (accessed Jun. 19, 2022).
- [33] "Solcast API Toolkit." <https://toolkit.solcast.com.au/world-api> (accessed May 18, 2022).
- [34] "Implement PV array modules - Simulink - MathWorks España." https://es.mathworks.com/help/physmod/sps/powersys/ref/pvarray.html?searchHighlight=pv%20array&s_tid=srchtitle_pv%20array_1 (accessed May 19, 2022).
- [35] Katz H.W., *Solid State Magnetic and Dielectric Devices*. John Wiley & Sons, 1959.
- [36] Y. Wang, D. J. Inman, D. Viehland, M. Kasarda, S. Priya, and A. Leonessa, "Simultaneous Energy Harvesting and Vibration Control via Piezoelectric Materials," 2012.
- [37] MicroPelt, "ThermoGenerator-Package (TGP)." http://www.micropelt.com/fileadmin/user_upload/_PDF_TGP_UK.pdf (accessed May 27, 2022).
- [38] Y. Yang and L. Tang, "Equivalent Circuit Modeling of Piezoelectric Energy Harvesters," *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, vol. 20, no. 18, pp. 2223–2235, Dec. 2009, doi: 10.1177/1045389X09351757.
- [39] Jaewon Choi, Jun-Kyung Cho, and Chulhun Seo, "Analysis on transmission efficiency of wireless

energy transmission resonator based on magnetic resonance,” in *2011 IEEE MTT-S International Microwave Workshop Series on Innovative Wireless Power Transmission: Technologies, Systems, and Applications*, May 2011, pp. 199–202. doi: 10.1109/IMWS.2011.5877128.

- [40] M. de Trabajo and Y. Economía, “Disposición 4477 del BOE núm. 69 de 2021,” 2021, Accessed: Jun. 27, 2022. [Online]. Available: <https://www.boe.es>

