

CARACTERIZACIÓN EXPERIMENTAL DE UNA PMU (POWER MANAGEMENT UNIT) PARA APLICACIONES DE ENERGY HARVESTING (EH)

Damien Lahire Gomez-Martinho

Proyecto Final de Grado de Ingeniería Electrónica y Automática Industrial,
Escuela Politécnica Superior de Ingeniería de Vilanova i la Geltrú (EPSEVG)

Resumen

En este proyecto se define el objetivo de caracterizar y realizar un diseño adaptado de una unidad de gestión de la energía (PMU) para aplicaciones de cosecho de energía o Energy Harvesting, e implementarla en captadores oceánicos de energía cinética del grupo de investigación SARTI (Sistemas de Adquisición Remota y Tratamiento de la Información de la Universidad Politécnica de Cataluña). La finalidad es poder testear y comparar esta placa (BQ25505), con otra de las mismas características (ADP5092), en simulaciones semi-reales. Estas simulaciones se harán con una mesa de vibraciones y posteriormente con un robot articulado.

1. Introducción

El incremento en la demanda de la energía a nivel mundial junto a la disminución de fuentes convencionales de energía como los combustibles fósiles y la preocupación por el medio ambiente son aspectos que nos impulsan hacia las energías renovables. Recursos energéticos como el petróleo, el carbón o el gas, están siendo masivamente agotados y no serán suficientes para su futura explotación. Además, el aspecto más importante a tener en cuenta es que estos combustibles fósiles no son nada beneficiosos para el planeta, teniendo una huella ecológica muy elevada, debido a sus altas emisiones en gases y otros contaminantes.

Nos encontramos entre tantas otras, el tipo de energía renovable, cosecho de energía o Energy Harvesting (EH). Esta se basa en el proceso de capturar energía residual que se encuentra en el ambiente de forma natural, acumularla y, almacenarla para su posterior uso.

Por otro lado, en este proyecto se estudiara un tipo en concreto de Sensor Autónomo (SA), el cual se está desarrollando en la actualidad por el equipo de investigación SARTI. Este SA es llamado drifter de deriva oceánica. Este drifter se alimenta mediante EH para ser autosuficiente y poder prolongar su vida útil durante años, mientras va tomando medidas y enviándolas para la vigilancia del medio marino.

Estas boyas de deriva son utilizadas en aplicaciones de bajo consumo, por lo tanto, tienen la peculiaridad de activarse cuando es posible, tomando así medidas y enviándolas, para después volver a desactivarse y mantenerse en reposo.

En la actualidad, uno de los principales proyectos en los que está implicado el equipo de investigación SARTI, es el denominado proyecto Meloá.

El proyecto Meloá [1] (Multi-purpose/Multi-sensor Extra Light Oceanography Apparatus, está llamado a

desarrollarse entre Diciembre de 2017 y Febrero de 2021. Es un proyecto H2020 que está desarrollando una innovadora familia de productos, llamadas unidades de deriva WAVY, que permiten un sistema de bajo coste, fácil de desplegar, con gran versatilidad, un bajo mantenimiento y la posibilidad de mejorar el actual sistema de monitorización del medio marino.

Este trabajo consistirá en el estudio de una parte de las boyas de deriva, en concreto del dispositivo que gestiona la energía producida por el Kinetic energy harvester (KEH). Este dispositivo llamado Power Management Unit (PMU) se encuentra ubicado entre el KEH, las baterías de almacenamiento y la carga del drifter.

Por lo tanto, el objetivo del proyecto es la caracterización experimental de un modelo concreto de PMU aplicado a un sistema de EH que obtiene energía a partir del movimiento que se induce en un pequeño micro generador (Motor DC miniatura), que se ubica en el interior del drifter.

Para la generación del movimiento de manera sistemática y parametrizable, se propone el uso de un robot industrial que permita aplicar al sistema de EH unas aceleraciones y desplazamientos conocidos, con el fin de poder evaluar correctamente diferentes PMU bajo las mismas condiciones de test, sin la necesidad de acudir al mar.

La ruta que seguirá este artículo será la siguiente. En el capítulo 2 se dará una breve explicación sobre el sistema de captación de energía de los drifters. En el capítulo 3 se analizan las funciones de las PMU enfocadas a las boyas de deriva y se introduce la PMU utilizada en este TFG. El capítulo 4 describe el diseño adaptado de la nueva PMU. Los capítulos 5 y 6 describen los diseños de los test y los resultados finales, respectivamente. El capítulo 7 concluye el trabajo.

2. Sistema de captación de energía (KEH)

Como introducción a la parte que nos concierne en este TFG, se debe explicar de forma resumida como es la composición interna del drifter y como se produce la captación de energía en estos dispositivos autónomos basándose en el artículo científico [2].

La figura 1 muestra la composición del drifter. En primer lugar, tendríamos la parte de captación de energía que recibe el nombre de KEH Device. Se encarga de transformar el movimiento generado por el oleaje marino en electricidad. En segundo lugar, tendríamos lo que denominamos como PMU, esta desarrolla la gestión entre la potencia que recibe y la potencia que requiere la electrónica del drifter. En tercer lugar, tendríamos el ESE, que vendría a ser el dispositivo donde se almacena la energía transferida

por la PMU o, también cabría la posibilidad de retorno de energía hacia la PMU para alimentar la carga, si el KEH no generase suficiente energía. Estos tres componentes forman lo que es denominado como sistema de captación de energía cinético. Y finalmente LOAD, que sería la electrónica restante que compondría el drifter marino.

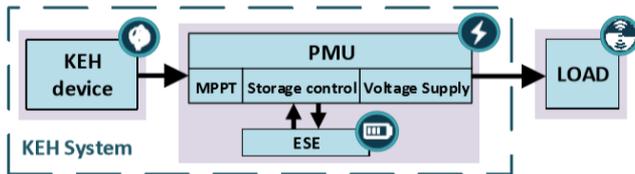


Fig.1. Sistema de captación de energía, compuesto por el dispositivo KEH, la PMU, el ESE y LOAD. Estos se describen en el diagrama de bloques.

La figura 2 muestra la composición del KEH device. La recolección de la energía de las ondas en dispositivos autónomos no anclados suele realizarse mediante sistemas inerciales. La última versión diseñada por el grupo SARTI del dispositivo KEH, se basa en una masa en forma de péndulo, que se mueve en relación con el cuerpo principal realizando un movimiento pendular, debido al oleaje marino. Este movimiento relativo impulsa un generador eléctrico (Motor DC en miniatura) que convierte la energía mecánica en energía eléctrica.

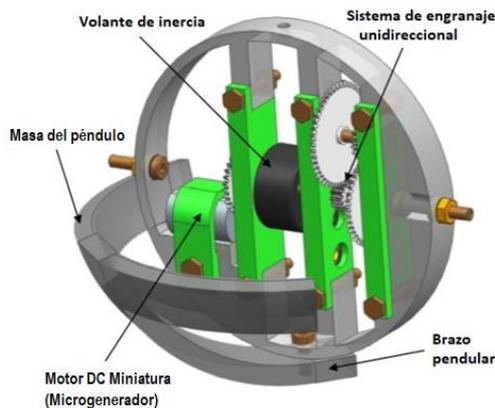


Fig.2. Modelo 3D del dispositivo KEH junto a la descripción de sus componentes.

A través de un sistema de engranajes, la energía se acumula en un volante de inercia. El sistema de engranajes también aumenta la velocidad de rotación con una relación positiva de 35 y, gracias a un mecanismo de engranajes unidireccional, el volante de inercia sólo gira en una dirección angular, en la que se acumula la energía. Esto hace girar el motor DC el cual genera corriente para alimentar la PMU.

3. Power Management Unit (PMU)

Estos dispositivos son circuitos integrados (CI) que incluyen múltiples vías de propagación de energía y funciones de gestión de energía en un solo chip. A menudo se utilizan en SA, ya que, al integrar múltiples funciones en un solo chip, da como resultado un uso más eficiente del espacio y de la energía del sistema. Por lo tanto, son los encargados de transferir potencia de entrada a salida del sistema de la forma más eficiente posible.

Los dispositivos PMU disponen de tres funciones principales para gestionar la energía internamente. La gestión de la energía de entrada se realiza mediante un convertidor DC-DC. Un segundo convertidor DC-DC regula la energía en la salida de la PMU. Y en tercer lugar la gestión intermedia de esta energía se realiza mediante comparadores. Estas tres funciones principales que se nombran en la figura 1 son las siguientes:

Storage Control (Control de almacenamiento de energía). Esta función gestiona la transferencia interna del dispositivo mediante comparadores de tensión. Según la comparación del nivel de tensión en la entrada y en la batería, el sistema se encuentra en un modo de funcionamiento u otro. Estos comparadores están conectados a la unidad de control de energía del circuito integrado.

Voltage Supply (Suministrador de voltaje). El convertidor DC-DC situado en la salida de la PMU, tiene la función de suministrar el voltaje requerido por la carga, por ejemplo, 3.3 V en microcontroladores y sensores. Este voltaje de salida es adecuado para dar un voltaje constante en la electrónica del drifter.

En último lugar tendríamos la función de **MPPT**. Esta técnica gestionada por el convertidor DC-DC de entrada, se caracteriza por seguir el punto máximo de voltaje en la entrada para así, poder generar la máxima potencia en la salida del sistema.

En la actualidad existe cantidad de PMU para incorporar en drifters de deriva. Para este TFG se ha utilizado la BQ25505 como CI y también se ha estudiado el módulo de evaluación BQ25505EVM-218. Todos ellos del fabricante Texas Instruments.

Esta PMU se basa en un convertidor boost, el cual permite comenzar a transferir potencia a partir de 100 mV de tensión de entrada de la PMU, gracias a su modo de arranque en frío. Por otro lado, esta PMU dispone de una salida principal regulada (V_{STOR}) y un terminal que puede hacer de entrada/salida (V_{BAT_SEC}), en el cual se conecta una batería recargable para almacenar la tensión de salida del sistema. Esta batería se conectaría en el lugar del ESE.

Para prevenir sobrecargas y descargas en la batería, el CI incorpora dos umbrales de tensión, V_{BAT_OV} y V_{BAT_UV} , respectivamente.

En la figura 3 se muestra el diseño de la nueva placa adaptada llamada BQ25505-DL.

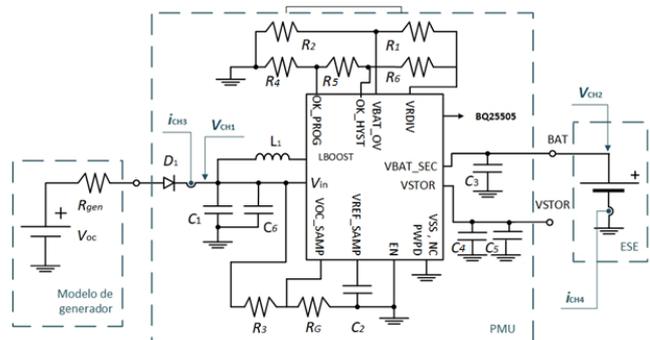


Fig.3. Composición de pines y componentes de la BQ25505-DL. También aparece el microgenerador de entrada y el terminal ESE.

La tensión de entrada producida por el generador de entrada es almacenada mediante los condensadores C_1 y C_6 conectado en el pin V_{IN} . El diodo D_1 se incorpora para evitar la corriente de retorno hacia la entrada. El ESE se conecta al terminal V_{BAT_SEC} , ya que será la única salida del sistema. No obstante, en V_{STOR} se conectaría la carga del sistema y se cargaría mediante los condensadores C_4 y C_5 .

Como técnica MPPT, este CI emplea la técnica de voltaje de circuito abierto fraccionado (FOCV). Esta técnica consiste en abrir cada 16 segundos el circuito eléctrico en su entrada, durante un tiempo de 256 ms. Durante este tiempo se mide la tensión de entrada en circuito abierto (V_{IN_OC}).

Posteriormente, la técnica MPPT calcula el 50% de V_{IN_OC} y la fija en la entrada de la PMU durante un periodo de tiempo establecido. A su vez esta tensión regulada se sitúa en bornes del microgenerador y se almacena en el condensador C_2 . El porcentaje MPPT es fijado por las resistencias R_3 y R_G .

De este modo se alcanza el punto de máxima potencia en la entrada (MPP). El hecho de que la máxima potencia se consiga en un 50% de V_{IN_OC} es debido a que el microgenerador de entrada sigue el modelo Thevenin.

No obstante, se podrá observar en los resultados del proyecto la posibilidad de incorporar una técnica MPPT fija y ver qué efectos tiene en la salida de la PMU. Esta técnica consiste en introducir un voltaje de entrada fijo en la PMU. Con esta técnica se consigue evitar el riesgo de que, en el momento de muestrear la señal de entrada, esta sea nula debido a que le KEH no logra generar energía. Sin embargo, se deberán ver todos sus pros y contras al concluir este TFG.

Con referencia a los modos de funcionamiento, la BQ25505 dispone de cuatro. Estos modos de funcionamiento son Arranque en Frío, Cargador boost principal activado, Cargador boost principal desactivado y apagado térmico.

En función de la tensión en los terminales V_{STOR} Y V_{BAT_SEC} , el CI se encuentra en un modo u otro. Los dos principales modos de funcionamiento se ilustran en la figura 4. En esta podemos ver la evolución temporal del modo de arranque en frío, hasta que se habilita el cargador principal. En el modo cargador boost principal activado, los terminales V_{STOR} y V_{BAT_SEC} quedan unidos internamente, pudiendo ser cargados simultáneamente. Este es el modo más eficiente.

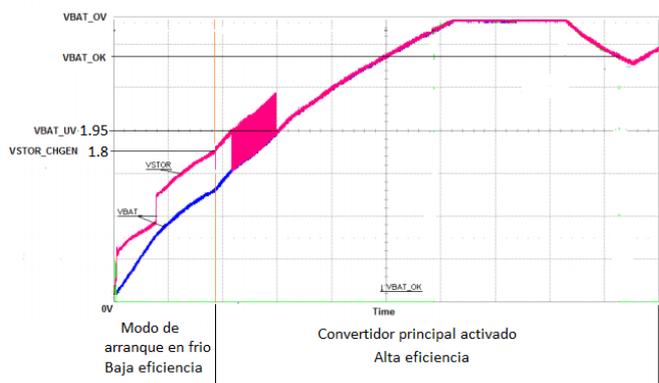


Fig.4. Análisis temporal de los dos principales modos de funcionamiento del BQ25505.

Para finalizar con este apartado, en la memoria de este TFG se realiza una comparativa teórica de pines, umbrales de tensiones y otros parámetros más, entre las placas BQ25505 y la ADP5092.

4. Diseño de la PMU adaptada

Tras caracterizar de forma teórica la placa BQ25505, se dispuso a adaptar una de sus placas de evaluación, la BQ25505EVM-218. Esta adaptación se realizó mediante la herramienta EasyEDA.

EasyEDA es un paquete de herramientas EDA (Automatización de diseño electrónico), que permite su utilización de forma gratuita, en la que no se requiere instalación, basada en página Web y en la Nube. Integra un potente diseño de esquemas, un simulador de circuitos online, y el diseño de circuito impreso en un entorno multiplataforma para ingenieros, estudiantes, profesorado y aficionados a la electrónica.

Como bien se ha comentado antes, la placa BQ25505-DL, dispondrá de una única entrada (V_{in}) y una única salida (BAT). El ESE, el cual se conecta en el terminal BAT, es una batería recargable (LP-402025-IS-3), que dispone de una tensión nominal de 3.7 V.

En la tabla 1.1 se pueden observar los valores de los componentes utilizados para el diseño de la BQ25505-DL. Todos los componentes tienen el valor y huella que propone el fabricante a excepción de los condensadores C_1 y C_3 , los cuales pudieron ser aprovechados unos de mayor valor que se encontraban en el laboratorio.

Nombre	Valor	Nombre	Valor
R_1	7.5 M Ω	R_G	Variable
R_2	5.76 M Ω	C_1, C_2	10 μ F
R_3	20 M Ω	C_3	220 μ F
R_4	887 K Ω	C_4, C_6	0.1 μ F
R_5	6.98 M Ω	C_5	4.7 μ F
R_6	5.36 M Ω	L_1	22 μ H

Tabla 1.1: Tabla con los valores de los componentes utilizados para la creación de la BQ25505-DL

Tras finalizar el proceso de soldadura de la placa, se puede observar en la figura 5, el aspecto que presenta la PMU BQ25505-DL.

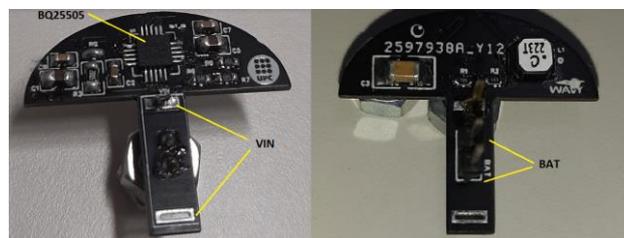


Fig.5. Aspecto de la cara delantera y trasera de la BQ25505-DL.

5. Diseño de las simulaciones

A continuación, se explicaran de una forma resumida, como se caracterizan cada uno de los ensayos y cuáles son los parámetros de la boya. En primer lugar se expondrán los datos de interés de la boya. En segundo lugar, se explicara como es el sistema de medición de datos y como se realiza el tratamiento de estos datos desde Matlab ya que se utilizan para los dos tipos de simulaciones. En tercer y cuarto lugar se expondrán las caracterizaciones de las

simulaciones con mesa de vibraciones y con robot articulado respectivamente. Para estas últimas simulaciones con brazo robótico se simularán dos tipos de mares, Airy y Ochi-Hubble (OsHu).

A. Parámetros de la boya

Para este trabajo se ha utilizado una boya diseñada por el grupo SARTI, como ya se ha comentado con anterioridad. El drifter dispone de un diámetro de 200 mm y su centro de masas está desplazada de su base 60 mm en el eje Z. La masa total de la boya estaría en torno a 3.7 Kg. Estos parámetros son importantes a la hora de escoger un robot para las simulaciones, ya que cada robot tiene unas cargas máximas, las cuales no deben superarse.

B. Sistema de medida y tratamiento de datos

En la figura 6 se muestran todos los componentes que forman el sistema de medidas del drifter y el receptor de datos mediante un PC.

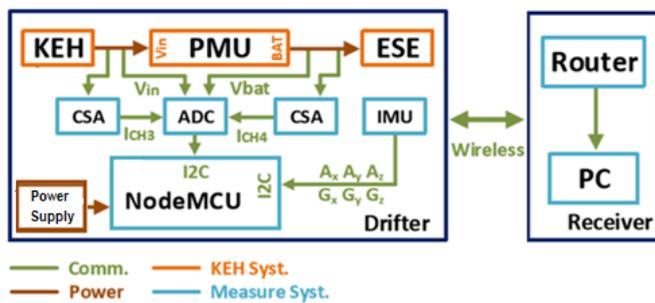


Fig.6. Diagrama de bloques de la configuración experimental que incluye el test de prueba a la izquierda y el receptor de señal a la derecha.

En la parte izquierda disponemos del drifter y a la derecha el receptor de datos por parte del usuario. El receptor dispone de un rúter Wi-Fi para la transferencia inalámbrica de datos medidos hacia un PC, mediante módulos UDP, que los grafica en tiempo real. El sistema KEH se representa en naranja, el sistema de medida en azul, las líneas de comunicación en verde y las líneas de potencia en marrón [2].

El modulo que controla el sistema de medición del dispositivo de deriva, es un kit de desarrollo NodeMCU de bajo consumo de energía. Se basa en el módulo ESP8266, que contiene un módulo de comunicación Wi-Fi.

El IMU proporciona los datos de aceleración lineal (Ax,Ay,Az) y velocidades angulares (Gx,Gy,Gz) mediante un bus I2C al NodeMCU, obteniendo así el comportamiento dinámico y determinar la frecuencia natural del movimiento del drifter.

Para medir la potencia de entrada y salida de la PMU, se utiliza un módulo convertidor analógico-digital (ADC) ADS1115 de Texas Instruments. Sus principales características son: 4 canales analógicos, velocidad máxima de datos 860 muestras/s, 16 bits y comunicación I2C. Los canales 1 y 2 (A0 y A1) se utilizan para medir la tensión de la entrada VIN y la tensión de salida VBAT. En el tercer y cuarto canal (A2 y A3) se miden los voltajes referidos a las corrientes de entrada y salida de las PMU.

Las mediciones de corriente se realizan con un sensor de corriente (CSA) colocado antes del ADC. La figura 7 muestra el circuito del CSA. Este incluye un resistor de

derivación (RSENSE), por el que pasa la corriente a medir (ISENSE), y un resistor de salida (ROUT). El terminal de salida VOUT está conectado al canal del CSA. El CSA está basado en un chip MAX9934 con una ganancia de transconductancia de 25 $\mu\text{A}/\text{mV}$.

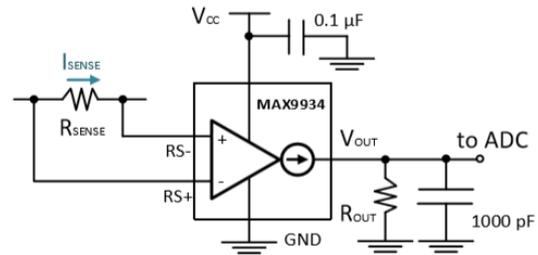


Fig.7. Circuito del amplificador sensor de corriente basado en el MAX9934

Según las corrientes a medir, en casos de niveles bajos o altos dependiendo de la cantidad de energía que el KEH pueda generar, las ganancias de los CSA son las siguientes. Para el CSA de entrada podemos tener una ganancia de 275 V/A o 27.5 V/A. En cambio, para el CSA de salida tendremos siempre una ganancia de 990 V/A. Esto es así debido a que las corrientes de entrada son mayores que las de salida, en consecuencia, también de los propios valores de los voltajes de entrada y salida

En definitiva, los datos recolectados mediante el NodeMCU que son enviados al PC son los siguientes:

Voltaje de entrada (VCH1), voltaje de salida (VCH2), corriente de entrada (ICH1), corriente de salida (ICH2) y aceleraciones lineales y velocidades angulares (Ax,Ay,Az,Gx,Gy,Gz)

Estos datos son enviados al PC mediante un fichero CSV. Una vez generado este fichero se debe realizar el tratamiento mediante MATLAB de los datos, utilizando tres scripts diferentes.

El primer script se encarga de importar todas las variables del fichero .csv y guárdalas en el Workspace de Matlab. El segundo script realiza el cambio de coma a punto, ya que Matlab trabaja con puntos. En el tercer script se inicializan las variables y se grafican algunas de ellas, como ahora bien, las aceleraciones lineales, las tensiones y corrientes de entrada y salida, las potencias de entrada y salida y las eficiencias de las PMU. En el apartado de resultados finales se podrán observar las gráficas de interés para comparar la BQ25505-DL y la ADP5092.

Tanto la herramienta de medición y envío de datos, como la programación en Matlab, fueron creadas con anterioridad. No obstante, algunos de los scripts de Matlab fueron adaptados según las necesidades de este TFG.

También se tuvo que diseñar y fabricar una herramienta para poder acoplar el KEH y el sistema de medida a la mesa de vibraciones y al robot articulado.

C. Simulaciones con mesa de vibraciones

En primer lugar, se ejecutó la caracterización de la BQ25505-DL, utilizando una mesa de vibraciones para excitar el KEH. El objetivo de esta primera simulación es comparar la placa creada en este TFG con la ADP5092 que utiliza SARTI en sus ensayos.

Se muestra en la figura 8, el proceso de la simulación completa desde el generador de funciones hasta el recibimiento final de datos en el PC.

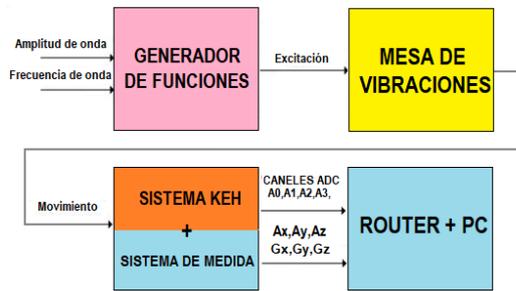


Fig.8. Representación de los test en mesa de vibraciones mediante diagrama de bloques simples.

Podemos observar como a partir de un generador de funciones que controla la mesa de vibraciones, se genera un movimiento lineal en el eje Y de la mesa. Con esto conseguimos excitar al KEH, pudiendo así, transmitir los datos de interés hacia el PC, mediante el sistema de medida.

Para estos ensayos se realizan test continuos, en los que la amplitud y frecuencia del generador de funciones es constante, excepto para dos casos en que se realiza un decremento en la amplitud (Escalón).

El IMU se alinea con el eje de movimiento en la mesa. De los datos de aceleración angular, se podrán ver claramente el efecto del escalón. Otros parámetros serán analizados en los resultados finales.

Para ellos se realizaron ocho simulaciones. La siguiente tabla enumera las características de cada uno de los ensayos.

Simulación	Placa	Diodo (D ₁)	MPPT
1	BQ25505-DL	Si	Variable
2	BQ25505-DL	No	Variable
3	ADP5092-Variable	Si	Variable
4	ADP5092-Fijo	Si	Fijo
5	ADP5092-Variable	No	Variable
6	ADP5092-Fijo	No	Fijo
7	ADP5092-Variable	No	Variable
8	BQ25505-DL	No	Variable

Tabla 2. Sumario de aspectos característicos en las simulaciones con mesa de vibraciones.

Con referencia a las placas ADP5092-Variable y ADP5092-Fijo su única diferencia es que la técnica MPPT utilizada es variable, para el primer caso y fija, para el segundo caso. Esto se verá reflejado en la tensión de entrada, donde en el caso fijo se ha elegido una tensión de referencia cercana a los 400 mV.

El sistema de medida se alimentó mediante una pequeña batería. La batería recargable conectada en VBAT_SEC, se cargó con un nivel de tensión de aproximadamente 3.3 V para realizar estos ensayos.

D. Simulaciones con brazo robótico

La simulación con brazo robótico de la empresa Kuka Iberia, sigue el proceso de figura 9. Se puede apreciar en la figura que el sistema de medida para obtener los datos finales es el mismo que en las anteriores simulaciones. La herramienta (Matlab) que se utiliza para el tratamiento de

datos también es la misma que para las simulaciones en mesa de vibraciones. En este caso el robot es quien excita al KEH mediante sus movimientos punto a punto.

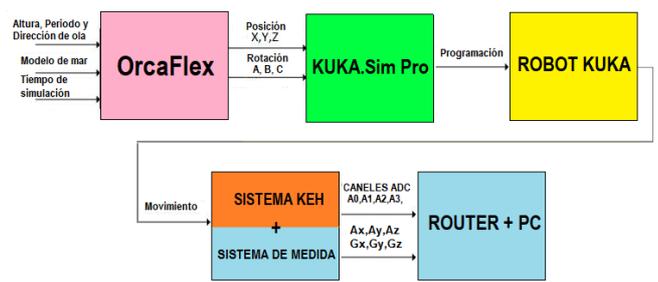


Fig.9. Representación de los test en brazo articulado mediante diagrama de bloques simples.

Partiendo de los parámetros de altura, periodo y dirección de ola, el modelo de mar y el tiempo de simulación, que se introducen en el programa OrcaFlex, se obtienen los datos requeridos por el simulador KUKA.Sim Pro, para la programación que se introducirá en el robot KUKA. Estos datos son la posición X, Y y Z y rotación A, B y C que tenga el drifter. En la tabla 3 podemos ver los diferentes parámetros de simulación para los casos Airy y OsHu.

Parámetro de simulación	Caso Airy Valor	Caso OsHu Valor
Dirección de ola	45 °	45 °
Altura de ola	0.3 m	0.35 m
Periodo de ola	3 s	3.25 s
Velocidad de viento	0 m/s	4 m/s
Dirección de viento	0	60 °

Tabla 3: Características de los diferentes tipos de mares utilizados para la simulación en brazo robótico

OrcaFlex es un software de la compañía Orcina. Este software permite el análisis dinámico de sistemas marinos en alta mar.

KUKA.Sim Pro permite visualizar el entorno de trabajo en el que se situara el robot de forma totalmente real. El robot utilizado para las simulaciones es un KR8R1620. Su carga máxima es 8 Kg y su alcance máximo es 1620 mm.

Tras obtener los datos de posición y rotación, se transformaron estos para poder ser incorporados en el simulador virtual. Estos cambios se hicieron mediante la opcionalidad de concatenar en Excel.

Finalmente, tras exportar los programas desde el simulador y comprobar todos sus puntos, se obtuvieron los archivos completos de las simulaciones Airy y OsHu. Estas constan de un fichero DAT global donde se guardan las coordenadas de los puntos, 11 subprogramas SRC con llamadas a 100 puntos por cada subprograma, y un fichero SRC principal con llamada a los 11 subprogramas. Esto para cada simulación. Una vez obtenidos los programas fueron enviados al robot Kuka para comprobar la validez de sus movimientos.

Cada simulación tiene una duración de 110 segundos, siendo los primeros 10 segundos de estabilización. Para poder analizar simulaciones más largas, cada simulación se repitió en bucle 3 veces.

La gestión del envío de programas, compilación y detección de posibles errores se realizó mediante el software

WorkVisuals. A su vez, se trabajó con la herramienta control remoto del robot, desde el PC.

WorkVisuals dispone de una interfaz de usuario orientada a estándares y una amplia capacidad de diagnóstico. Una de las características más utilizadas fue la posibilidad de editar cómodamente y de forma independiente todos los programas de control directamente en la plataforma.

Para estas simulaciones, al igual que para los ensayos con mesa de vibración, se realizarán comparaciones entre las placas BQ25505-DL y ADP5092. Para ellos se llevaron a cabo seis simulaciones para cada caso. Las tablas 2 y 3 muestran la composición de las simulaciones Airy y OsHu respectivamente. Hay que destacar de estos dos tipos de mares que Airy es un mar tranquilo, de oscilación sinusoidal, en cambio OsHu representa un mar más dinámico, con mayores movimientos en rotación que Airy. Esto será importante y se podrá ver reflejado en los resultados finales.

Simulación	Placa	Diodo (D ₁)	MPPT
1	BQ25505-DL	Si	Variable
2	BQ25505-DL	No	Variable
3	ADP5092-Variable	No	Variable
4	ADP5092-Variable	Si	Variable
5	ADP5092-Fijo	Si	Fijo
6	ADP5092-Fijo	No	Fijo

Tabla 3: Sumario de aspectos característicos en las simulaciones con brazo robótico del caso Airy.

Simulación	Placa	Diodo (D ₁)	MPPT
1	BQ25505-DL	Si	Variable
2	BQ25505-DL	No	Variable
3	ADP5092-Variable	Si	Variable
4	ADP5092-Variable	No	Variable
5	ADP5092-Fijo	No	Fijo
6	ADP5092-Fijo	Si	Fijo

Tabla 4: Sumario de aspectos característicos en las simulaciones con brazo robótico del caso OsHu.

En el siguiente apartado se graficarán los resultados obtenidos tanto en las simulaciones con mesa de vibración, como en estas últimas simulaciones con brazo robótico.

6. Resultados finales

A. Resultados simulaciones con mesa de vibración

La figura 10 muestra la aceleración lineal A_y registrada en el drifter, en las dos primeras gráficas, y la densidad espectral de potencia (PSD), en la tercera gráfica. Esta PSD se obtuvo aplicando la transformada rápida de Fourier (FFT) en Matlab. La primera de las gráficas corresponde a las primeras seis simulaciones realizadas, donde la amplitud pico a pico es de 0.3 g constantemente. En cambio, para las simulaciones seis y siete, la aceleración lineal corresponde a la segunda gráfica. En esta podemos observar el escalón que se genera al reducir la amplitud de la onda. Durante el segundo 160, el valor pico a pico de esta amplitud pasa de 0.35 g a 0.21 g (3.43 m/s² a 2.06 m/s²).

La última de las gráficas proporciona el valor de la frecuencia configurada. En todas las simulaciones es constate y tiene un valor de 1.88 Hz.

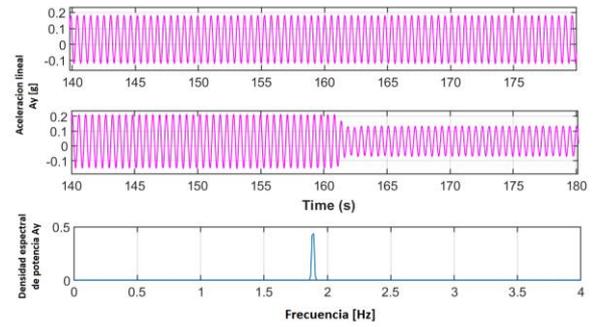


Figura 10: Aceleración lineal del drifter a lo largo del eje Y, y su densidad espectral de potencia.

La figura 11 muestra las tensiones de entrada (Rojo) y salida (Azul) y la eficiencia, de las simulaciones siete y ocho. Para ambas simulaciones las dinámicas de estos parámetros son semejantes.

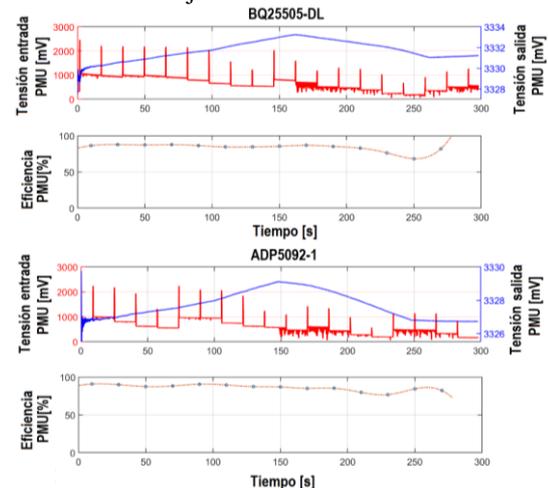


Figura 11: Comparativa de las tensiones de entrada y salida, y eficiencias de las placas BQ25505-DL y ADP5092-Variable.

Las tensiones de entrada medias de la BQ25505-DL y ADP5092-Variable, para el nivel alto de A_y , es de aproximadamente 810 mV. Tras rebajar el valor de la amplitud de A_y , esta tensión baja hasta los 415 mV aproximadamente.

De la tensión de salida, que a su vez es la carga que tiene la batería, se puede apreciar que tiene un incremento de tensión, por lo que la batería se va cargando. Al llegar al escalón aplicado en la aceleración lineal A_y , se produce un cambio de tendencia y la batería empieza a descargarse.

En referencia a las eficiencias de las placas para estos ensayos, se aprecia que conforme mayor es la energía generada a la entrada de las PMU, la eficiencia también se ve afectada positivamente. En los primeros 150-160 segundos de simulación se dispone de eficiencias más elevadas, en cambio para el siguiente intervalo hasta concluir las simulaciones, la eficiencia baja ligeramente su valor.

Para finalizar el análisis de eficiencia energética, la figura 12 muestra los valores de las eficiencias teóricas para tensiones de entrada de 1 V y 0.5 V para la BQ25505. Se han escogido estos valores ya que las simulaciones 1 y 2 tienen tensiones de entrada dentro de este intervalo, y así podrán ser comparadas con los datos de la siguiente figura.

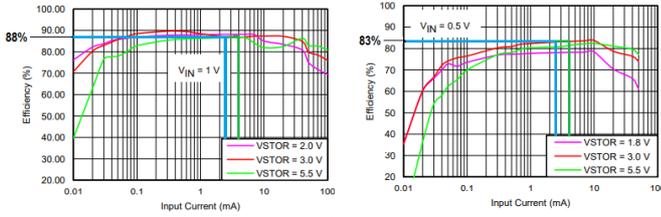


Fig. 12. Extracción de los valores de eficiencia teóricas, fijando 1V y 0.5V a la entrada.

Mediante interpolación lineal, las eficiencias energéticas para estas simulaciones uno y dos, son de 85.3% y 84.6% respectivamente.

B. Resultados simulaciones con brazo robótico

Tras analizar las simulaciones del caso Airy y OsHu, se pudo comprobar que en el caso Airy, al ser un movimiento tan lineal sin prácticamente movimientos de rotación, el movimiento de la masa del péndulo que excita la rotación del microgenerador era prácticamente nulo. El KEH no era capaz de generar energía suficiente para transmitir energía a la PMU. No obstante, a continuación se mostraran algunas graficas del caso Airy.

B.1 Caso airy

La figura 13 muestra las tensiones de entradas para tres de las simulaciones realizadas del caso Airy.

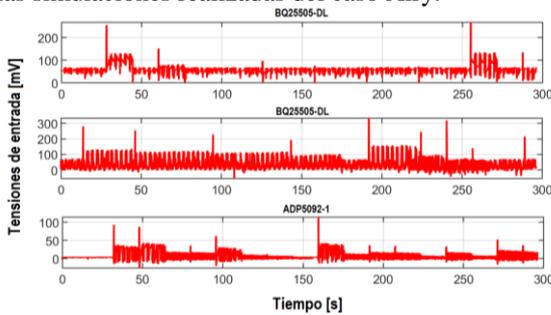


Figura 13: Tensiones de entrada para las placas BQ25505-DL y ADP5092-Variable, para el caso Airy. Fuente: Autor.

Sacando los valores medios de estas tensiones de entrada en todas las simulaciones, sus valores se encuentran por debajo de 80 mV. Si recordamos los modos de funcionamiento de las placas, para valores inferiores a 100 mV de tensión de entrada, el CI se encuentra en modo de arranque en frío. Por lo tanto, la PMU deshabilita el cargador principal y no consigue transmitir potencia útil hacia la salida.

También se puede observar en las velocidades angulares (G_x y G_y), como para el caso Airy se notifican unos valores pico a pico de $\pm 10^\circ/s$. En cambio, para el caso OsHu se notifican unos valores pico a pico de $\pm 200^\circ/s$. Esto hace que para el caso Airy no se dispongan de variaciones bruscas en cuanto a rotación en sus ejes, por lo cual el péndulo que excita el KEH no tiene prácticamente movimiento.

El IMU no consiguió alinearse de forma correcta tanto en el caso Airy como en el caso OsHu, por lo cual sus resultados son muy difíciles de analizar. No obstante, en la PSD de algunas de sus aceleraciones lineales y velocidades angulares para el caso airy, si podía distinguirse la frecuencia natural en 1 Hz y la frecuencia de la ola en 0.34 s (periodo aproximado de 3s).

B.2 Caso Ochi-Hubble

El primer aspecto característico en los resultados del caso OsHU, se puede observar en las entradas de las PMU. La figura 14 muestra las tensiones de entrada para las simulaciones uno, dos, tres, cuatro y seis respectivamente. En las cuatro primeras graficas se puede ver como cada 16 segundos la PMU activa la red de muestreo MPPT y ajusta esta tensión en un 50 % de su valor. En cambio, para la última gráfica, la PMU intenta ajustar esta tensión al 50 % de su valor máximo, no consiguiéndolo ya que la tensión de entrada es constante, al utilizar la técnica de MPPT fijo.

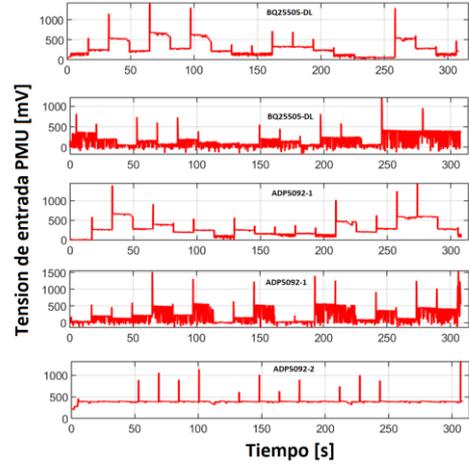


Figura 14: Comparativa de las tensiones de entrada de las placas BQ25505-DL y ADP5092

Otro aspecto característico es la diferencia que se aprecia en estas graficas cuando se incorpora el diodo D_1 . En la primera y tercera grafica el diodo está incorporado, logrando que el único sentido en el que circula la corriente sea desde el dispositivo KEH hacia la PMU, trabajando así la entrada como generador de energía en todo momento. En cambio, para la segunda y la cuarta grafica en que no se incorpora este diodo D_1 , podemos apreciar como la entrada tiene momentos en que cae hacia 0 V. Esto se da en el momento en el que el dispositivo KEH no genera energía y se produce un retorno de energía hacia la entrada, que seguiría el modelo de una bobina.

Para la última de las gráficas, se puede observar el efecto del MPPT fijo, donde la entrada se fija entorno a los 400 mV durante el transcurso de toda la simulación.

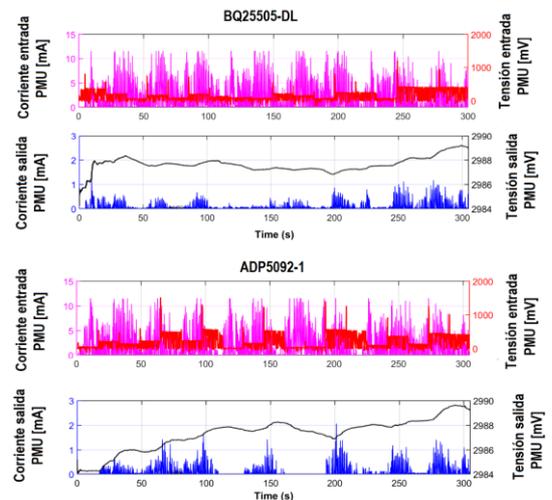


Figura 15: Graficas de las tensiones y corrientes de entrada y salida de las placas BQ25505 y ADP5092-Variable.

En la siguiente figura 15, se puede observar las características de las tensiones de entrada (Rojo) y salida (Negro), y de las corrientes de entrada (Rosa) y salida (Azul) de ambas placas. En ellas se ven ondas semejantes tanto en corrientes como en voltajes. El intervalo de valores en tensión y corriente están dentro de los intervalos teóricos dados con anterioridad.

De estas figuras se puede justificar que el estudio de eficiencia en la totalidad del ensayo no es algo que sea muy razonable en la simulación con brazo robótico, ya que podemos ver en las gráficas correspondientes a la ADP5092-Variable, que la corriente que pasa hacia la salida es nula en dos intervalos de tiempo. Esto se da debido a que la tensión de entrada fijada por el circuito MPPT en esos intervalos es cero. Por lo cual la PMU no consigue transferir potencia hacia la salida, incluso si el KEH comenzase a generar energía.

No obstante, en la figura 16 si se puede observar, según la dinámica en la tensión de entrada de la BQ25505-DL, el crecimiento o decrecimiento en pequeños intervalos de tiempo de la eficiencia energética. Como bien se ha comentado en el apartado anterior, conforme la tensión de entrada incrementa, la eficiencia de la placa también se ve aumentada.

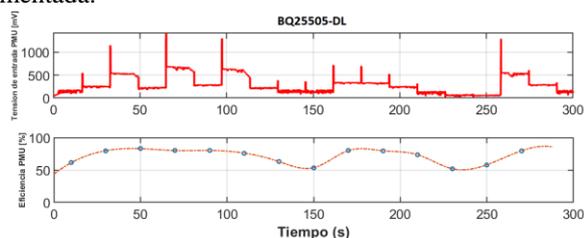


Figura 16: Gráficas de tensión de entrada y eficiencia.

7. Librería multimedia de la totalidad de las simulaciones realizadas

En este apartado adjunto un link que servirá como librería multimedia de las simulaciones con mesa de vibraciones y con robot articulado (casos Airy y Ochi-Hubble). Esta podrá ser consultada por alumnos y cualquier persona interesada en conocer más sobre el ámbito de los captadores oceánicos de energía, y también podrá servir de apoyo en la presentación del autor del TFG.

Link Google Drive:

<https://drive.google.com/drive/folders/1OcQofgdF6OuSUiEbNpSMn3AMvCinW8fv?usp=sharing>

8. Conclusiones

Durante el proyecto actual se ha podido trabajar en el ámbito de los drifter oceánicos, en concreto de los dispositivos PMU, marcándose como objetivos principales el estudiar una placa totalmente desconocida y poder implementarla en los captadores de energía del grupo SARTI.

Otro de los objetivos importantes ha sido el poder realizar simulaciones controladas por un robot con diferentes tipologías de mar, sin tener que ir al mar in situ.

Tras las simulaciones en mesa de vibraciones, se puede concluir en que la eficiencia de la placa ADP5092 tiene valores ligeramente superiores a las de la placa BQ25505-

DL. También se ha podido observar que, para estos análisis, la placa ADP5092 con un MPPT fijo no es realmente efectiva. Esto se debe a que las tensiones de entrada que se fijaron, para este tipo de MPPT, fueron menores a las que fijaron las placas ADP5092 y BQ25505-DL en sus simulaciones con un MPPT variable.

En cambio, para las simulaciones en brazo robótico, al no disponer de tensiones de entrada tan elevadas y tener momentos en que el KEH no genera energía, el dispositivo ADP5092 con MPPT fijo, sí que tiene mayor eficiencia ya que logra mantener una tensión de entrada constante y mayor que en los otros casos simulados.

No obstante, para futuros TFG se podrían analizar estas técnicas MPPT en simulaciones más largas, donde se pudiera ver realmente el alcance de la técnica MPPT fija.

Quiero destacar en estas conclusiones el error humano a la hora de posicionar el IMU para los ensayos que se realizaron con robot industrial. Al no disponer de una colocación fija para este dispositivo, y tener que desmontar y montar para cada uso que se hace de él, esto resultó en unos resultados erróneos y con posibilidades escasas de ser analizados.

Sobre el dispositivo BQ25505-DL, placa adaptada y diseñada con la herramienta EasyEda, se puede decir que la eficiencia experimental comparada con los valores de eficiencia teórica que aparecen en el datasheet del componente, resultó ser valores muy próximos. Por lo tanto, se puede afirmar que esta placa cumple con las especificaciones del diseño original (BQ25505EVM-218).

Sobre el efecto de incorporar el diodo entre el KEH y la PMU, se pueden sacar dos conclusiones diferentes. En los casos en que se incorpora el diodo, la eficiencia se ve aumentada debido a que las tensiones de entrada son mayores. En contra, si no se incorpora el diodo, la eficiencia es menor, pero se consigue que la potencia transmitida hacia la salida del sistema aumente respecto a los otros casos. Por lo tanto, concluyo que sería conveniente el poder estudiar otros tipos de diodos con menores pérdidas y analizar los resultados.

9. Agradecimientos

Me gustaría agradecer la oportunidad que me dio el profesor, Joaquín del Río Fernández, para realizar este trabajo de investigación.

También me gustaría agradecer todo el trabajo y seguimiento desempeñado por el Cotutor de este TFG, Matias Carandell Wilmer. Fue un gran apoyo en los momentos más difíciles del trabajo.

Agradecer también a la empresa Kuka Iberia por cederme un robot de sus instalaciones para la ejecución de las simulaciones con brazo articulado.

Referencias

- [1] "About MELOA." <https://www.ec-meloa.eu/pages/the-project> (accessed Apr. 23, 2020).
- [2] M. Carandell, D. M. Toma, M. Carbonell, J. del Río, and M. Gasulla, "Design and Testing of a Kinetic Energy Harvester Embedded into an Oceanic Drifter," 2020.