

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

Damien Lahire



Escola Politècnica Superior  
d'Enginyeria de Vilanova i la Geltrú

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

# TRABAJO FINAL DE GRADO

**TÍTULO: CARACTERIZACIÓN EXPERIMENTAL DE UNA PMU (POWER MANAGEMENT UNIT) PARA APLICACIONES DE ENERGY HARVESTING (EH).**

**AUTOR: LAHIRE GOMEZ-MARTINHO, DAMIEN**

**DATA DE PRESENTACIÓN: Julio, 2020**

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

Damien Lahire

<b>APELLIDOS:</b>	<b>LAHIRE GOMEZ-MARTINHO</b>	<b>NOMBRE:</b>	<b>DAMIEN</b>
<b>TITULACIÓN:</b>	<b>Grado en Ingeniería Electrónica Industrial i Automática</b>		
<b>PLAN:</b>			
<b>DIRECTOR:</b>	<b>DEL RIO FERNANDEZ, JOAQUIN</b>		
<b>CODIRECTOR:</b>	<b>CARANDELL WIDMER, MATIAS</b>		
<b>DEPARTAMENTO:</b>	<b>EEL - Departamento de ingeniería Electrónica</b>		

<b>QUALIFICACIÓN DEL TFG</b>
------------------------------

<b><u>TRIBUNAL</u></b>		
<b>PRESIDENTE</b>	<b>SECRETARIO</b>	<b>VOCAL</b>
<b>DATA DE LECTURA:</b>		

Este proyecto tiene en cuenta aspectos ambientales:  Sí  No

## 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. La finalidad es poder testear y comparar esta placa, con otra de las mismas características, en simulaciones semireales. Estas simulaciones se realizaron con una mesa de vibraciones y posteriormente con un robot articulado.

En primer lugar, se estudió y se caracterizó el funcionamiento de los dispositivos BQ25505, BQ25505EVM-218 y se realizó una comparativa teórica con la placa ADP5092. Posteriormente se creó una PCB adaptada (BQ25505-DL) del modelo BQ25505EVM-218 en EasyEDA, para ser implementada en los captadores de energía del equipo de investigación SARTI.

En segundo lugar se enumeran las características de las simulaciones con mesa de vibraciones y con robot de la empresa KUKA. Los equipos de medida que se utilizaron, cuáles son las metodologías de estos análisis y para el caso de las simulaciones en robot, como ha sido el tratamiento de los datos hasta concluir con los programas creados para realizar los movimientos del robot. Para estas simulaciones en robot se podrán comprobar los resultados de dos tipos de mar, Airy y Ochi-Hubble. Para todas estas simulaciones, mediante un sistema de medidas gobernado por un NodeMCU, se envían datos como tensiones y corrientes de entrada y salida, aceleraciones lineales y velocidades angulares. Estos datos sirven para observar la eficiencia energética de las PMU y la dinámica del movimiento del drifer.

En tercer lugar, tras realizar las simulaciones, se presentan los resultados por separado de los ensayos con mesa de vibraciones y los ensayos con brazo robótico articulado, para poder realizar una comparativa entre las placas BQ25505-DL y ADP5092. Los datos expuestos en estos resultados son tratados con la herramienta Matlab.

En último lugar, se puede concluir en que ambas placas tienen unas dinámicas y comportamientos muy semejantes. No obstante la ADP5092 tiene una eficiencia energética ligeramente superior a la BQ25505-DL. Sobre el diseño de la BQ25505-DL se realizó una comprobación en relación a la eficiencia energética proporcionada por el fabricante. Este resultado es de un valor muy aproximado al teórico.

### Palabras clave (máximo 10):

COSECHO DE ENERGÍA	UNIDAD DE GESTIÓN DE ENERGÍA	BOYA DE DERIVA	ROBOT INDUSTRIAL
MATLAB	CAPTADOR DE ENERGÍA CINÉTICA	BQ25505	EasyEDA
ADP5092	EFICIENCIA ENERGÉTICA		

**ABSTRACT**

This project defines the objective of characterizing and performing an adapted design of a power management unit (PMU) for energy harvesting applications, and implementing it in oceanic kinetic energy harvesters. The purpose is to test and compare this board, with another one of the same characteristics, in semi-realistic simulations. These simulations were carried out in a vibration table and later with an articulated robot arm.

First, the operation of the devices BQ25505 and BQ25505EVM-218 was studied and characterized, and a theoretical comparison with the board ADP5092 was made. Subsequently, an adapted PCB (BQ25505-DL) of the model BQ25505EVM-218 was created in EasyEDA, to be implemented in the energy harvesters of the SARTI research team.

Secondly, the features of the vibration table and robot simulations from KUKA are listed. The measurement equipment used, the methodologies used for these analyses and, in the case of the robot simulations, how the data was processed up to the development of the programs to carry out the robot motions. For these robot simulations, the results of two types of sea, Airy and Ochi Hubble, can be tested. For all these simulations, by means of a measurement system governed by a NodeMCU, data such as input and output voltages and currents, linear accelerations and angular velocities are sent to a PC. This data is used to observe the energy efficiency of the PMU and the dynamics of the drifter motion.

Thirdly, after the simulations have been carried out, the results of the vibration table tests and the articulated robot arm tests are presented separately in order to make a comparison between the BQ25505-DL and ADP5092 boards. The data presented in these results are processed with the Matlab tool.

Finally, it can be concluded that both boards have very similar dynamics and behaviour. However, the ADP5092 has a slightly higher energy efficiency than the BQ25505-DL. The design of the BQ25505-DL was checked against the energy efficiency provided by the manufacturer. This resulted in a value very close to the theoretical one.

**Keywords (10 maximum):**

ENERGY HARVESTING	POWER MANAGMENT UNIT (PMU)	DRIFTER	INDUSTRIAL ROBOT
MATLAB	KINETIC ENERGY HARVESTER (KEH)	BQ25505	EasyEDA
ADP5092	ENERGY EFFICIENCY		

## SUMARIO

<b>PREFACIO</b> .....	<b>10</b>
<b>1 INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>11</b>
1.1 ENERGY HARVESTING.....	11
1.2 PROYECTO MELOA .....	12
1.3 MOTIVACIÓN.....	13
1.4 OBJETIVOS .....	14
1.5 METODOLOGÍA .....	15
<b>2 POWER MANAGMENT UNIT (PMU)</b> .....	<b>16</b>
2.1 DEFINICIÓN Y CONCEPTO DE PMU .....	18
2.1.1 FUNCIONES PRINCIPALES DE LA PMU .....	18
2.2 BQ25505 .....	20
2.2.1 DESCRIPCIÓN GENERAL .....	20
2.2.2 CONEXIONES DE ENTRADAS/SALIDAS DE LA PLACA BQ25505 .....	22
2.2.3 DEFINICIÓN DE LAS TENSIONES UMBRALES Y RESISTENCIAS CARACTERISTICAS DEL BQ25505 .....	24
2.2.4 POSICIÓN RELATIVA DE LOS DISTINTOS UMBRALES DE VOLTAJE EN VSTOR Y DEFINICION DE MODOS DE FUNCIONAMIENTO .....	26
2.3 ADP5092 .....	30
<b>3 DISEÑO DE LA NUEVA PMU ADAPTADA</b> .....	<b>33</b>
3.1 EASYEDA .....	33
3.2 VALORES DE LOS COMPONENTES DE LA BQ25505-DL Y MODIFICACIONES APLICADAS EN EL ESQUEMÁTICO DEL BQ25505EVM-218 .....	34
3.3 SOLDADURA DE LA BQ25505-DL .....	37
<b>4. DISEÑO DE LOS TEST Y EQUIPOS DE MEDIDA</b> .....	<b>38</b>
4.1 TEST EN MESA DE VIBRACIÓN.....	38
4.1.1 DISEÑO DE LA HERRAMIENTA .....	39
4.1.2 EQUIPOS DE MEDIDA Y TRATAMIENTO DE DATOS .....	40
4.1.3 METODOLOGÍA DEL ENSAYO CON MESA DE VIBRACIÓN .....	43
4.2 TEST EN BRAZO ROBOTICO .....	45
4.2.1 SIMULACION EN SOFTWARE KUKA.Sim Pro Y OBTENCION DE COORDENADAS CON OrcaFlex .....	46
4.2.2 SOFTWARE WORKVISUALS Y SIMULACIÓN EN ROBOT .....	48
4.2.3 METODOLOGÍA DEL ENSAYO EN BRAZO ARTICULADO .....	50

<b>5. RESULTADOS Y COMPARATIVAS.....</b>	<b>51</b>
5.1 RESULTADOS DEL TEST CON MESA DE VIBRACIÓN .....	51
5.2 RESULTADOS DEL TEST CON BRAZO ROBOTICO.....	56
5.2.1 RESULTADOS CASO AIRY.....	57
5.2.2 RESULTADOS CASO OsHu.....	59
5.3. LIBRERÍA MULTIMEDIA DE LA TOTALIDAD DE LAS SIMULACIONES REALIZADAS.....	63
<b>CONCLUSIONES .....</b>	<b>63</b>
<b>AGRADECIMIENTOS.....</b>	<b>65</b>
<b>BIBLIOGRAFIA .....</b>	<b>65</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>67</b>
A. ESQUEMÁTICO COMPLETO DEL BQ25505EVM-218.....	68
B. GUÍA DE USO DE EASYEDA.....	69
B.1 FUNCIONALIDADES INTERNAS DE EASYEDA PARA LA CREACIÓN DE NUEVAS PCB .....	69
B.2 PASOS SEGUIDOS HASTA LA FABRICACIÓN DE LA PCB .....	74
C. ESQUEMÁTICO OPTIMIZADO DEL BQ25505EVM-218, GENERADO DESDE EASYEDA .....	78
D. CARAS DE LA PCB UNA VEZ FINALIZADAS EN EL PROGRAMA EASYEDA... ..	79
E. PLANOS 2D DE DIFERENTES VISTAS DE LA HERRAMIENTA.....	80
F. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS ROBOT KR8R1620 .....	81
G. MANUAL DE EJECUCION DEL ROBOT Y PROGRAMACIÓN DE CASO OSHU. ..	85

## SUMARIO DE FIGURAS

FIGURA 1.1: CLASIFICACIÓN DE LOS DIFERENTES ÁMBITOS DEL ENERGY HARVESTING. FUENTE: [2].....	11
FIGURA 1.2: DRIFTERS WAVY. FUENTE: PAGINA MELOA .....	13
FIGURA 2.1: SISTEMA CINÉTICO DEL ENERGY HARVESTER: COMPUESTO POR EL KEH DEVICE, PMU, ESE. POR OTRO LADO TENEMOS LA CARGA DEL SISTEMA COMO LOAD. FUENTE: [6] .....	16
FIGURA 2.2: MODELO 3D DEL CAPTADOR CINÉTICO DEL DRIFTER CON LA DESCRIPCIÓN DE SUS ELEMENTOS. FUENTE: [4].....	17
FIGURA 2.3: RESULTADOS DE LA CARACTERIZACIÓN DEL MICRO GENERADOR DE ENTRADA. FUENTE: [6] .....	19
FIGURA 2.4: SUMARIO DE PINES DE LA BQ25505 REPRESENTADOS MEDIANTE UN BLOQUE SIMPLE Y SU CONEXIONADO A LOS DISPOSITIVOS KEH, ESE Y LOAD. ....	20
FIGURA 2.5: COMPOSICIÓN DE ENTRADAS Y SALIDAS DE LA BQ25505. FUENTE: MANUAL BQ25505 .....	22
FIGURA 2.6: GESTIÓN DE LOS UMBRALES DE $V_{BAT\_OV}$ , $OK\_PROG$ Y $OK\_HYST$ MEDIANTE RESISTENCIAS EXTERNAS Y LA TENSIÓN $VRDIV$ . FUENTE: MANUAL BQ25505 (DEBIDAMENTE ADAPTADO POR EL AUTOR).....	25
FIGURA 2.7: SUMARIO DE LOS UMBRALES DE TENSIÓN EN $V_{STOR}$ . FUENTE: MANUAL BQ25505 .....	27
FIGURA 2.8: COMPARATIVA DE LOS MODOS DE CS Y CARGADOR PRINCIPAL ACTIVO. FUENTE: MANUAL BQ25505 (DEBIDAMENTE MODIFICADO POR EL AUTOR) .....	29
FIGURA 2.9: SUMARIO DE PINES DEL ADP5092 Y LOS COMPONENTES DE REFERENCIA QUE SE CONECTAN A CADA UNO DE ESTOS TERMINALES. FUENTE: [6].....	30
FIGURA 3.1: COMPOSICIÓN DE LA PMU TRAS ANALIZAR LOS PINES Y COMPONENTES APROPIADOS PARA ESTA NUEVA PCB, EL ESE Y EL MICRO GENERADOR DE ENTRADA. . ....	34
FIGURA 3.2: COMPARATIVA DE LAS TÉCNICAS UTILIZADAS PARA OBTENER EL PORCENTAJE MPPT.....	35
FIGURA 3.3: ASPECTO DE LA PLACA BQ25505-DL TRAS REALIZAR LA SOLDADURA DE SUS COMPONENTES. ....	37
FIGURA 4.1: REPRESENTACIÓN DE LOS TEST EN MESA DE VIBRACIÓN MEDIANTE DIAGRAMA DE BLOQUES. ....	38
FIGURA 4.2: VISTA 3D DE LA HERRAMIENTA DEFINITIVA.....	39
FIGURA 4.3: DIAGRAMA DE BLOQUES DE LA CONFIGURACIÓN EXPERIMENTAL QUE INCLUYE EL TEST DE PRUEBA A LA IZQUIERDA Y EL RECEPTOR DE SEÑAL A LA DERECHA. FUENTE: [6].....	40

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

Damien Lahire

FIGURA 4.4: CIRCUITO DEL AMPLIFICADOR SENSOR DE CORRIENTE BASADO EN EL MAX9934. FUENTE: [6] .....	41
FIGURA 4.5: ENTORNO DE SIMULACIÓN DEL KEH, LA PMU Y EL SISTEMA DE MEDICIÓN ANCLADO A LA MESA DE VIBRACIONES. ....	44
FIGURA 4.6: REPRESENTACIÓN DE LOS TEST CON BRAZO ROBÓTICO MEDIANTE DIAGRAMA DE BLOQUES. ....	45
FIGURA 4.7: DISTRIBUCIÓN EN SOFTWARE KUKASIM.PRO DEL ROBOT KR8R1620, LA HERRAMIENTA Y EL DRIFTER. ....	46
FIGURA 4.8: SERIE TEMPORAL DEL DESPLAZAMIENTO DE LA SUPERFICIE MARINA. FUENTE: [6] .....	47
FIGURA 4.9: INTERFAZ DEL CONTROL REMOTO DE LA SMARTPAD DEL ROBOT KR8R1620. ....	49
FIGURA 4.10: ENTORNO DE SIMULACIÓN DEL KEH Y EL SISTEMA DE MEDICIÓN ANCLADO AL BRAZO ROBÓTICO DE KUKA. ....	51
FIGURA 5.1: ACELERACIÓN LINEAL DEL DRIFTER A LO LARGO DEL EJE Y, Y SU DENSIDAD ESPECTRAL DE POTENCIA. ....	52
FIGURA 5.2: COMPARATIVA DE LAS TENSIONES DE ENTRADA Y SALIDA, Y EFICIENCIAS DE LAS PLACAS BQ25505-DL Y ADP5092-VAR. . ....	53
FIGURA 5.3: GRAFICAS DE POTENCIA DE ENTRADA Y SALIDA DE LA BQ25505-DL PARA LA SIMULACIÓN OCHO. ....	54
FIGURA 5.4: EXTRACCIÓN DE LOS VALORES DE EFICIENCIA TEÓRICAS, FIJANDO 1V Y 0.5V A LA ENTRADA. FUENTE: MANUAL BQ25505 (MODIFICADO ADECUADAMENTE POR EL AUTOR) .....	55
FIGURA 5.5: DIAGRAMA DE DISPERSIÓN DONDE SE PUEDE OBSERVAR LA MEDIA DE LAS TENSIONES DE SALIDA Y EFICIENCIAS EN LAS PMU, PARA LAS SEIS PRIMERAS SIMULACIONES EN MESA DE VIBRACIÓN.56	
FIGURA 5.6: TENSIONES DE ENTRADA PARA LAS PLACAS BQ25505-DL Y ADP5092-VAR, PARA EL CASO AIRY. ....	57
FIGURA 5.7: COMPARATIVA DE LAS VELOCIDADES ANGULARES ENTRE LOS CASOS AIRY Y OSHU. ....	57
FIGURA 5.8: DEMOSTRACIÓN MEDIANTE PSD DE LA ACELERACIÓN ANGULAR EN EL EJE Z, DE LA FRECUENCIA NATURAL DEL DRIFTER Y LA FRECUENCIA DE LA OLA PARA EL CASO AIRY. ....	58
FIGURA 5.9: COMPARATIVA DE LAS AMPLITUDES DE LAS ACELERACIONES LINEALES Y VELOCIDADES ANGULARES EN LOS EJES X E Y, GENERADAS A PARTIR DEL IMU Y ORCAFLEX.....	59
FIGURA 5.10: COMPARATIVA DE LAS PSD DE LAS ACELERACIONES LINEALES AX Y AY, MEDIDA DESDE EL IMU Y ORCAFLEX. ....	59



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

Damien Lahire

FIGURA 5.11: COMPARATIVA DE LAS TENSIONES DE ENTRADA DE LAS PLACAS BQ25505-DL Y ADP5092. ....	60
FIGURA 5.12: GRAFICAS DE LAS TENSIONES Y CORRIENTES DE ENTRADA Y SALIDA DE LAS PLACAS BQ25505 Y ADP5092-VAR. ....	61
FIGURA 5.13: GRAFICAS DE TENSIÓN DE ENTRADA Y EFICIENCIA. ....	62
FIGURA 5.14: DIAGRAMA DE DISPERSIÓN DONDE SE PUEDE OBSERVAR LA MEDIA DE LAS TENSIONES DE SALIDA Y EFICIENCIAS EN LAS PMU, PARA LAS SIMULACIONES DEL CASO OSHU. ....	63
FIGURA ANEXO A.1: ESQUEMÁTICO DE LA PLACA DE EVALUACIÓN BQ25505EVM-218 .....	68
FIGURA ANEXO B.1: INTERFAZ DE DISEÑO 3D DEL PROGRAMA EASYEDA . FUENTE: EASYEDA.....	69
FIGURA ANEXO B.2: FUNCIONALIDADES DE LA PÁGINA EASYEDA. FUENTE: EASYEDA.....	70
FIGURA ANEXO B.3: ATRIBUTOS DEL SOFTWARE EASYEDA PARA EL DISEÑO 3D DE ESQUEMAS ELÉCTRICOS Y PCB. ....	71
FIGURA ANEXO B.4: INTERFAZ DE DISEÑO DE LA PCB, Y SUS FUNCIONALIDADES. FUENTE: EASYEDA.....	72
FIGURA ANEXO B.5: CARACTERÍSTICAS PARAMETRIZABLES DE LOS COMPONENTES EN LA FASE DE DISEÑO DEL ESQUEMÁTICO. EN ESTE CASO SE MUESTRAN LOS PARÁMETROS DEL CONDENSADOR QUE GESTIONA LA BATERÍA. ....	75
FIGURA ANEXO B.6: INTERFAZ DE DISEÑO 3D REFERENTE A LA PCB. ....	76
FIGURA ANEXO B.7: VISTA AMPLIADA DE LA PLACA. EN ELLA SE OBSERVAN COMPONENTES, PISTAS, ÁREAS COMPARTIDAS Y AGUJEROS DE CONEXIONES. . ....	77
FIGURA ANEXO C.1: ESQUEMÁTICO OPTIMIZADO DE LA PLACA DE EVALUACIÓN BQ25505-EVM218. FUENTE: EASYEDA .....	78
FIGURA ANEXO D.1: EN LA PARTE SUPERIOR APARECEN LAS VISTAS DESDE EASYEDA DE LAS DOS CARAS DE LA PCB. EN LA PARTE INFERIOR SE VISUALIZA EL ASPECTO REAL DE LA PLACA TAMBIEN DESDE EASYEDA. ....	79
FIGURA ANEXO.E1: PLANOS 2D DE LA HERRAMIENTA QUE ACOPLA EL KEH CON LA MESA DE VIBRACIONES Y EL ROBOT ARTICULADO .....	80
FIGURA ANEXO F.1: MANIPULADOR ROBÓTICO. FUENTE: LIBRO PROGRAMACIÓN 1 KUKA.....	81
FIGURA ANEXO F.2: ESPACIO DE TRABAJO DEL ROBOT KR8R1620. FUENTE: FICHA TÉCNICA KR8R1620. ....	82
FIGURA ANEXO F.3: SISTEMA DE COORDENADAS CARTESIANO DEL ROBOT KUKA. FUENTE: LIBRO PROGRAMACIÓN 1 KUKA .....	83

## SUMARIO DE TABLAS

TABLA 2.1: SUMARIO DE PINES DE INTERÉS DE LA BQ25505.....	23
TABLA 2.2: FUNCIONALIDADES DE LA BQ25505 CONFORME LA TENSIÓN DE $V_{STOR}$ CRECE .....	27
TABLA 2.3: FUNCIONALIDADES DE LA BQ25505 CONFORME LA TENSIÓN DE $V_{STOR}$ DECRECE .....	28
TABLA 2.4: COMPARATIVA DE PINES QUE REALIZAN FUNCIONES SEMEJANTES TANTO EN LA BQ25505 COMO EN LA ADP5092. ....	31
TABLA 2.5: COMPARATIVA DE LOS UMBRALES DE TENSIÓN Y OTROS PARÁMETROS CARACTERÍSTICOS DE AMBAS PLACAS.....	32
TABLA 2.6: COMPARATIVA DE PRECIOS Y DIRECTIVA ROHS ENTRE LA BQ25505 Y LA ADP5092. ....	32
TABLA 3.1: TABLA CON LOS VALORES DE LOS COMPONENTES UTILIZADOS PARA LA CREACIÓN DE LA BQ25505-DL Y LA REFERENCIA CON LOS COMPONENTES DE LA BQ25505EVM-218. ....	36
TABLA 3.2: VALORES NOMINALES DE LAS TENSIONES UMBRALES Y SUS HISTÉRESIS INTERNAS.....	37
TABLA 4.1: DEFINICIÓN DE LOS VALORES DE LOS COMPONENTES DE AMBOS CSA.....	41
TABLA 4.2: VALORES DE TENSIÓN Y CORRIENTES DE ENTRADA Y SALIDAS PARA LAS PMU SEGÚN LAS ESPECIFICACIONES DESCRITAS. ....	42
TABLA 4.3: SUMARIO DE ASPECTOS CARACTERÍSTICOS EN LAS SIMULACIONES CON MESA DE VIBRACIONES.....	44
TABLA 4.4: CARACTERÍSTICAS DE LOS DIFERENTES TIPOS DE MARES UTILIZADOS PARA LA SIMULACIÓN EN BRAZO ROBÓTICO .....	47
TABLA 4.5: SUMARIO DE ASPECTOS CARACTERÍSTICOS EN LAS SIMULACIONES CON BRAZO ROBÓTICO DEL CASO AIRY.....	50
TABLA 4.6: SUMARIO DE ASPECTOS CARACTERÍSTICOS EN LAS SIMULACIONES CON BRAZO ROBÓTICO DEL CASO OSHU.....	50
TABLA 5.1: RESULTADOS OBTENIDOS DEL ANÁLISIS EXPERIMENTAL CON MESA DE VIBRACIONES. EN ESTA SE MUESTRA UNA COMPARATIVA ENTRE LAS PLACAS BQ25505-DL Y ADP5092.....	56
TABLA 5.2: RESULTADOS OBTENIDOS DEL ANÁLISIS EXPERIMENTAL CON BRAZO ROBÓTICO. EN ESTA SE MUESTRA UNA COMPARATIVA ENTRE LAS PLACAS BQ25505-DL Y ADP5092. ....	62

## **GLOSARIO DE SIGNOS, SÍMBOLOS, ABREVIATURAS, ACRÓNIMOS I TERMINOS**

### **ABREVIATURAS**

**EH-** Energy Harvesting

**SA-** Sensor autónomo

**PMU-** Power Management Unit (Unidad de Gestión de Energía)

**ESE-** Energy Storage Element (Elemento almacenador de energía)

**KEH-** Kinetic Energy Harvester (Captador de energía cinética)

**MPPT-** Maximum Power Point Tracker (Seguimiento del punto de máxima potencia)

**MPP-** Maximum Power Point (Punto de máxima potencia)

**ADC-** Analog-to-digital converter (Conversión analógica-digital)

**IMU-** Inertial measurement unit (Unidad de medición inercial)

**GND-** Terminal de masa del circuito integrado

**CI-** Circuito integrado

**CS-** Cold Start-Up (Arranque en frío)

**OC-** Open circuit (Circuito abierto)

**BOM-** Bill of Materials (Listado de materiales detallado del dispositivo)

### **GLOSARIO**

**Tool-** Es un sistema de coordenadas móvil de libre definición que se usa para la definición de herramientas. Las tools van definidas respecto una base.

**Base-** Es un sistema de coordenadas fijo de libre definición. En este caso servirá para definir el movimiento en coordenadas del drifter de deriva.

**Punto PTP-** El robot se desplaza de punto a punto de la forma más rápida posible. La velocidad y aceleración con estos tipos de puntos es parametrizable.

**Punto LIN-** El robot se desplaza de punto a punto de forma lineal, con un máximo de 2 m/s.

**Fichero DAT-** En este fichero el robot almacena las coordenadas y orientación de los puntos, y las coordenadas de los ejes del robot.

**Fichero SRC-** En este fichero se realizan llamadas a los puntos que contiene el DAT y también de subprogramas. También se inicializan todas las variables.

## PREFACIO

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.

Haciendo un balance de otras fuentes, la energía nuclear tiene un gran coste de establecimiento y una serie de problemáticas en lo que se refiere a seguridades. Por otro lado las centrales hidroeléctricas son baratas, pero tienen una vida útil limitada y en gran parte de estas, no pueden ser utilizadas debido a razones geopolíticas y a la irregularidad estacional del agua disponible. Todos estos aspectos hacen que el recurso de las energías renovables este en alza.

En cuanto a las energías renovables más importantes a gran escala dispondríamos de energía solar, eólica, mareomotriz e hidroeléctrica. Estas nos permiten generar grandes cantidades de energía con un impacto ambiental nulo en ocasiones o muy bajo.

Por otro lado disponemos de energías renovables a menor escala. Antes de enfatizar en este tipo de energía, se deben introducir unos tipos de componentes que actualmente están en auge, los sensores autónomos (SA). Estos sensores se pueden integrar en diversidad de ámbitos como pueden ser la domótica, el control y la monitorización del medio ambiente.

Tiempo atrás, estos SA funcionaban con baterías primarias, por lo cual para sistemas destinados a funcionar durante mucho tiempo, estos debían tener un bajo consumo y permanecer inactivos durante la mayor parte del tiempo [1]. No obstante se pudo observar que las baterías debían ser cambiadas con frecuencia, ya que eran fuentes de energía que se agotaban en el tiempo y en algunos casos suponían una tarea difícil de realizar, en casos de difícil acceso como por ejemplo, cuando la boya se encuentra en medio del océano.

Por lo tanto, los SA pedían una fuente de energía a largo plazo. Aquí es donde entra en juego la captación de energía o **Energy Harvesting** (EH). El drifter marino o boya deriva es un tipo de SA que será objeto de estudio durante el actual proyecto, el cual es alimentado a partir de la EH.

# 1 INTRODUCCIÓN

## 1.1 ENERGY HARVESTING

El EH 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. Cabe recalcar que esta energía es utilizada en dispositivos autónomos electrónicos de bajo consumo. Al no poder recolectar grandes cantidades de energía, estos sensores permanecen apagados hasta el momento en que, pueden activarse al disponer de suficiente energía captada, momento en el que realizan las medidas oportunas y se transmiten, para después reposar de nuevo. A esta función de permanecer apagado hasta su posterior activación, recibe el nombre de sleep mode (modo dormido).

Este tipo de generación de energía tiene diferentes campos de aplicación referenciados al uso de SA inalámbricos. En la figura 1.1 podemos observar la clasificación de EH a nivel mundial donde se diferencia entre del tipo medio ambiental y del tipo fuentes externas. [2]

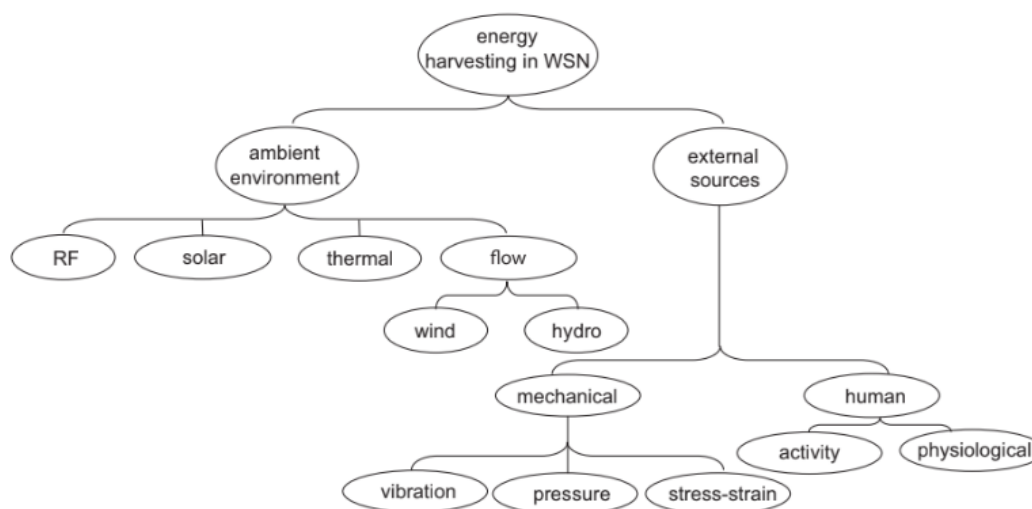


Figura 1.1: Clasificación de los diferentes ámbitos del Energy Harvesting. Fuente: [2]

Esta clasificación que se muestra en la figura anterior sería de ámbito más general. En el artículo científico [3] se resumen los diferentes mecanismos de captación de energía disponibles para utilizarse en el ámbito marino. En la parte superior se presentan las diferentes fuentes de energía y en la parte inferior sus posibles aplicaciones. Las fuentes se dividen en tipos no cinéticos y cinéticos. Este TFG se clasifica dentro de fuente de energía del tipo cinética y su implementación es del tipo oscilación inercial pendular y se desarrolla debido al oleaje marino en su superficie.

Estos sistemas se encargan de convertir la energía cinética y potencial contenida en las oscilaciones naturales del oleaje marino en electricidad.

El equipo de investigación de la UPC, SARTI, que desarrolla sus funciones en el centro tecnológico de la Universidad Politécnica de Catalunya en Vilanova i la Geltru, se encarga del desarrollo científico y tecnológico de equipos y sistemas de adquisición de datos, enfatizando su actividad en instrumentación virtual i oceanográfica. Muchos de sus proyectos están sumergidos en el ámbito de EH. Se puede apreciar en el siguiente artículo [4], un proyecto de uno de sus investigadores donde se desarrolla un dispositivo captador de energía cinética para aplicaciones de deriva oceánica.

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 las cargas. Las PMU son esenciales para extraer, transmitir y regular la energía para maximizar la transferencia de potencia del sistema.

## **1.2 PROYECTO MELOA**

Uno de los principales proyectos en los que está implicado el equipo de investigación SARTI, es el denominado proyecto Melo a [5].

El proyecto Melo a (Multi-purpose/Multi-sensor Extra Light Oceanography Apparatus), se desarrolla 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 y un bajo mantenimiento.

El consorcio MELOA está integrado por 10 entidades europeas que trabajan en estrecha colaboración con las comunidades marinas para elaborar soluciones que permitan hacer frente a problemas de la sociedad, en particular a la hora de generar datos in situ para la vigilancia marina.

Centrados en cubrir las lagunas de observación marina, los WAVY proporcionaran más información in situ de datos en las zonas costeras y de alta mar. Actualmente se están desarrollando y probando diferentes tipos de drifters en colaboración con la comunidad marina, para probarlos en diversos entornos marinos, recogiendo y analizando estos datos.



Figura 1.2: Drifters Wavy. Fuente: Pagina Melo

Estos dispositivos flotantes, los cuales aparecen en la figura 1.2, deben tener un tamaño reducido, pero a la vez disponer del suficiente espacio para albergar sensores temperatura y presión, acelerómetros, captador de energía, dispositivo de conexión GPS y otros aparatos electrónicos de pequeña huella.

En definitiva, este proyecto basado en la recopilación de datos en la comunidad marina, integra la energía de cosecho para generar potencia en estos dispositivos autónomos, los drifters de deriva. Estos drifters serán el principal objeto de estudio del proyecto actual, en concreto de las PMU.

### 1.3 MOTIVACIÓN

Tras la realización de asignaturas basadas en el análisis de datos mediante la instrumentación electrónica y sus sistemas integrados, pude contactar con diferentes profesores para la realización del proyecto de final de carrera. Tras varias reuniones, Joaquin del Rio me propuso la realización de dicho proyecto referido a los drifters marinos. Estos dispositivos incorporan un sistema cinético de cosecho de energía que está compuesto por el KEH, la PMU y el elemento almacenador de potencia (ESE). La posibilidad de poder conocer un ámbito desconocido como son las boyas de derivas y en concreto las PMU, que es el objetivo de estudio de este trabajo, me suponía un gran desafío a nivel personal.

Por otro lado, el hecho de poder aportar, aunque sea una porción pequeña, en un proyecto de marco europeo como es Melo y poder trabajar con un equipo de investigación íntegramente cualificado, fue otro de los motivos por el cual me decante por este proyecto. Un proyecto real con el cual seguir formándome y poder desempeñar un buen trabajo.

## 1.4 OBJETIVOS

La obtención de energía eléctrica a partir de energía solar o cinética requiere de componentes electrónicos como una PMU que se encarga de gestionar eficientemente la potencia generada por placas solares o micro generadores y almacenarla en baterías o capacitores. Existen en el mercado diferentes modelos de PMU de diferentes fabricantes. 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. También se realizará el diseño adaptado del convertidor para minimizar su tamaño y poder ser incorporado en drifters de deriva.

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. Se pudo aprovechar que el proyectista de este trabajo estaba realizando prácticas en la empresa Kuka Iberia, para poder realizar esta última parte de simulación en un entorno controlado de los movimientos de la boya.

En definitiva, estos son los objetivos específicos definidos:

- Estudio de los diferentes tipos de PMU existentes y sus funciones
- Caracterización de la PMU escogida para dispositivos de captación de energía cinética marina.
- Diseño y adaptación de una placa PCB siguiendo el modelo de la PMU caracterizada
- Test y comparación con otra PMU en una mesa de vibraciones
- Adaptar los movimientos del drifter para emular su movimiento en un robot Kuka
- Test y comparación con otra PMU en un Robot Kuka



## 1.5 METODOLOGÍA

Para el presente proyecto se han definido y seguido unas fases que a continuación serán nombradas:

- Búsqueda y recolección de información respecto a la captación de energía y los dispositivos PMU.
- Diseño adaptado de una placa PCB de menor dimensión, para ser implementada en una boya de deriva ya definida por el grupo SARTI.
- Evaluación y caracterización mediante una mesa de vibración de la nueva PMU.
- Conversión/Adaptación de los datos extraídos del programa OrcaFlex para ser enviados a un robot Kuka.
- Test en condiciones semireales mediante robot articulado.
- Comparativa final entre las placas BQ25505 y ADP5092.

A modo de introducción, OrcaFlex es el software que se utilizará para la extracción de datos de movimiento de la boya. Estos datos serán implementados en el robot para que represente los movimientos del drifter.

## 2 POWER MANAGMENT UNIT (PMU)

El principal objetivo del capítulo es analizar los dispositivos PMU que desempeñan la función de gestionar la transferencia de energía en dispositivos autónomos. En concreto se estudiarán las PMU que se incorporan en la captación de energía embarcada en drifters de deriva. No obstante antes de entrar en este detalle, es conveniente explicar de una forma genérica como se compone el sistema de captación de energía en estos drifters.

La composición interna de la boya de deriva vendría dispuesta según lo descrito en la figura 2.1. 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.

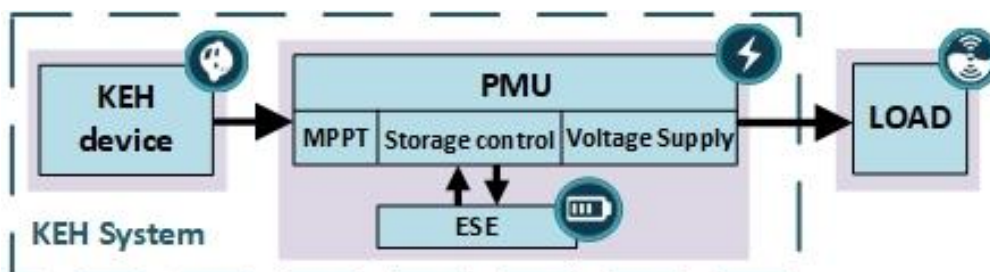


Figura 2.1: Sistema cinético del Energy Harvester: Compuesto por el KEH Device, PMU, ESE. Por otro lado tenemos la carga del sistema como LOAD. Fuente: [6]

En este capítulo se realizara una explicación extendida del dispositivo de manejo de potencia. No obstante antes de avanzar hacia dicha materia, se debe explicar el funcionamiento interno del KEH, para entender cómo se genera la energía a la entrada de la PMU, fundamentándose en el siguiente artículo científico [6].

El cosechador de energía del drifter ha tenido varios cambios en el tiempo. Diferentes trabajos de final de grado han reportado modificaciones, siendo el grupo SARTI, los encargados de realizar su diseño y fabricación final. La figura 2.2 muestra la composición interna del dispositivo KEH con sus partes detalladas.

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

Damien Lahire

La recolección de la energía de las ondas en dispositivos autónomos no anclados suele realizarse mediante sistemas inerciales. La última versión diseñada 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.

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.

La energía recogida depende de las características físicas del KEH, logrando niveles de potencia más altos con tamaños y pesos más elevados. Además, esta energía es directamente proporcional a la frecuencia y amplitud de la onda.

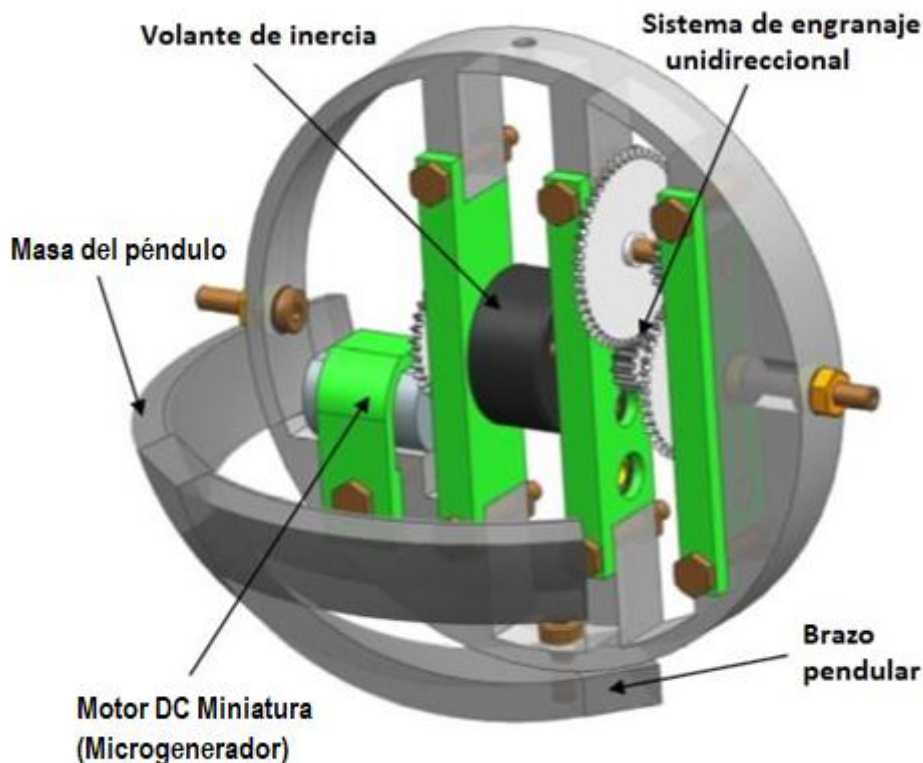


Figura 2.2: Modelo 3D del captador cinético del drifter con la descripción de sus elementos.  
Fuente: [4]

## 2.1 DEFINICIÓN Y CONCEPTO DE PMU

Estos dispositivos son circuitos integrados 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 [7]. Por lo tanto son los encargados de transferir potencia de entrada a salida del sistema de la forma más eficiente posible. En el sistema de captación de energía de las boyas de derivas, es el dispositivo considerado como el pilar central del sistema, que conecta todos sus elementos.

### 2.1.1 FUNCIONES PRINCIPALES DE LA PMU

Los dispositivos PMU disponen de tres funciones principales para gestionar la energía internamente [8]. 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 2.1 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 (CI).

**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. Hay diferentes tipos los cuales serán citados a continuación:

- Incremental Conductance (Conductancia incremental)
- Perturb and Observe (Perturbar y observar)
- Fractional open-circuit voltage (Voltaje fraccional de circuito abierto)
- Fractional short-circuit current (Corriente fraccional de cortocircuito)

Uno de los MPPT más utilizados para aplicaciones fotovoltaicas es el de conductividad incremental. Está basado en el hecho de que la pendiente de la curva de potencia del conjunto fotovoltaico frente a la curva de voltaje, es cero en el punto de máxima potencia en la entrada (MPP).[9]

En cambio, para aplicaciones de EH basadas en el cosecho de energía mediante microgeneradores, se utiliza el voltaje fraccional de circuito abierto (FOCV) como técnica MPPT. Esta técnica consiste en abrir de forma periódica el circuito eléctrico en su entrada durante un tiempo establecido por la PMU. 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 un condensador externo a la PMU. De este modo se alcanza el 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.

Se muestra en la figura 2.3, un estudio realizado por Matias Carandell en el siguiente artículo científico [6], donde analiza y caracteriza el funcionamiento del microgenerador (Motor DC miniatura) que alimenta la entrada de la PMU.

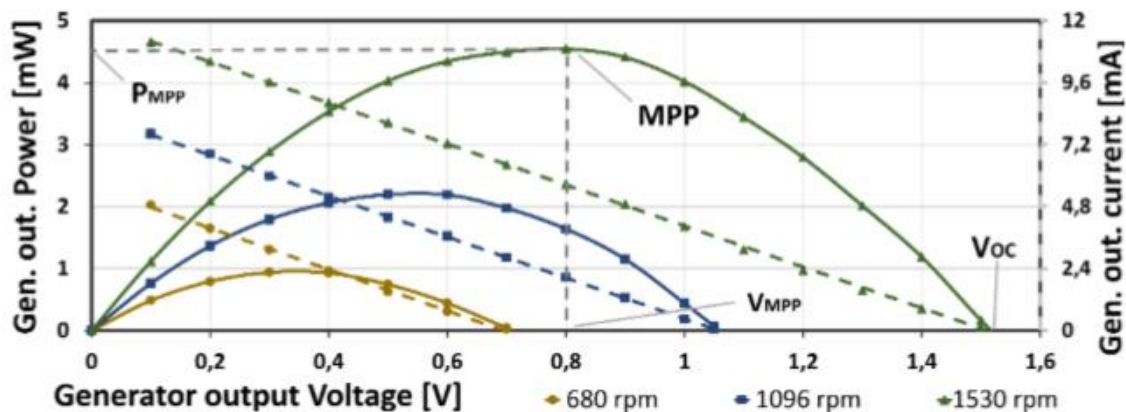


Figura 2.3: Resultados de la caracterización del micro generador de entrada. Fuente: [6]

Se puede observar a la izquierda de la figura, la potencia en la salida del generador, respecto al voltaje de salida del generador a diferentes velocidades de rotación del motor. El punto de máxima potencia se sitúa aproximadamente a un 50% de la tensión de salida del motor DC. También podemos deducir de este punto MPP que en él se alcanza la máxima corriente de salida del generador.

Cuando el circuito MPPT muestrea esta tensión de entrada de la PMU, se produce la máxima transferencia de energía hacia la salida del CI. Esta técnica MPPT es de vital importancia para que la eficiencia del CI sea la más alta posible.

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. En el siguiente artículo se realiza una comparativa entre el MPPT fijo y el MPPT variable. [10]

## 2.2 BQ25505

### 2.2.1 DESCRIPCIÓN GENERAL

El dispositivo BQ25505 es una solución integrada para EH, fabricada por Texas Instruments, que se utiliza en gran medida debido a la necesidad de aplicaciones de bajo consumo. Está diseñada para poder gestionar la baja potencia generada por una variedad de fuentes de alta impedancia de salida (Hi-Z) como generadores fotovoltaicos o eléctricos térmicos, o un generador piezoeléctrico.

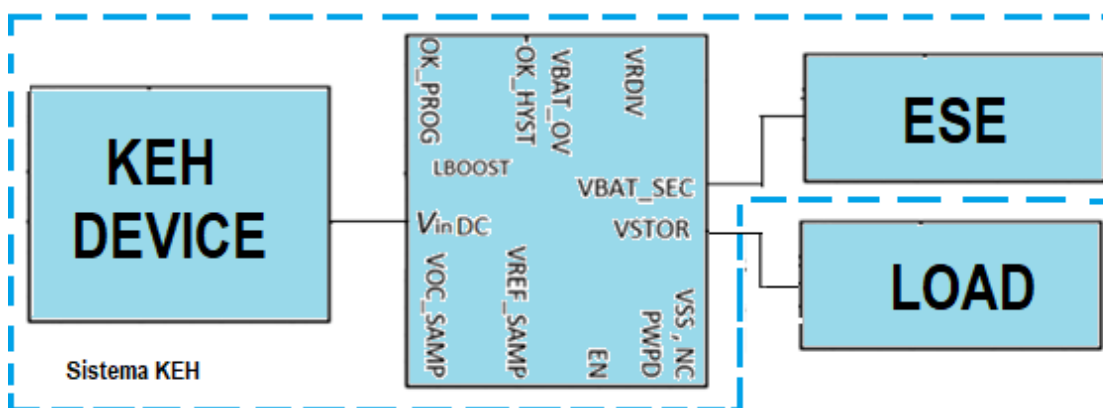


Figura 2.4: Sumario de pines de la BQ25505 representados mediante un bloque simple y su conexión a los dispositivos KEH, ESE y LOAD.

El bloque representado en la figura 2.4 muestra los pines más característicos de la BQ25505. También podemos observar a que pines irían conectados los dispositivos KEH (entrada del sistema), ESE (salida) y LOAD (salida del sistema). Su representación servirá de referencia para explicar aspectos generales de la BQ25505.

Su convertidor/cargador boost<sup>1</sup> DC-DC de entrada, requiere de pocos microvatios para su puesta en funcionamiento debido a su modo de arranque en frío (CS). En este modo de funcionamiento la tensión de entrada recibe el nombre de  $V_{IN\_CS}$ . El convertidor permite la captación de energía a partir de 600 mV típicos en la entrada. Los modos de funcionamiento del dispositivo serán documentados y detallados más adelante.

En referencia a la función MPPT, dependerá del tipo de aplicación y de las condiciones meteorológicas, como lo es en el caso de los paneles fotovoltaicos. En estos casos variaría en función de la cantidad de luz y de la temperatura. En el caso de las boyas de deriva depende de la velocidad de rotación del microgenerador de entrada, que a su vez depende directamente del estado del mar.

El fabricante de la BQ25505 indica el MPPT como un porcentaje de su voltaje en circuito abierto. Por lo tanto, este chip implementa una red de seguimiento del punto de máxima potencia programable para optimizar de este modo la transferencia de potencia en el dispositivo. El CI realiza un muestreo periódico en la tensión de entrada en circuito abierto cada 16 segundos, desactivando así el convertidor por un intervalo de 256 ms, y almacenando el MPP mediante un condensador externo conectado a  $V_{REF\_SAMP}$ . En células solares, el MPP se alcanza en torno al 70-80% de su voltaje OC y en los generadores termoeléctricos/piezoeléctricos y microgeneradores se alcanza en el 50%.

A modo de introducción, la BQ25505 incorpora umbrales de tensión máximas ( $V_{BAT\_OV}$ ) y tensiones mínimas ( $V_{BAT\_UV}$ ), que controlan en todo momento el estado de las baterías. También dispone de una salida digital  $V_{BAT\_OK}$  para comprobar si el nivel en batería es correcto.

En último lugar, este chip fue diseñado para soportar diferentes tipos de elementos de almacenamiento, como ahora bien baterías recargables, supercondensadores o condensadores convencionales. Este elemento permite que se disponga de una energía constante en la carga del drifter.

---

<sup>1</sup> El convertidor boost o elevador es un tipo de convertidor DC-DC que obtiene en su salida una tensión continua mayor que a su entrada.

## 2.2.2 CONEXIONES DE ENTRADAS/SALIDAS DE LA PLACA BQ25505

En la figura 2.5 se puede observar el esquemático completo de entradas/salidas de la placa BQ25505.

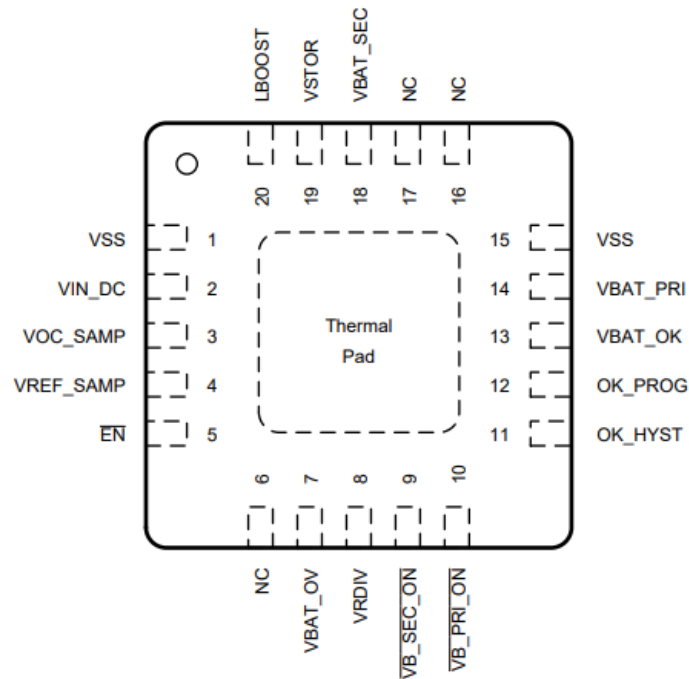


Figura 2.5: Composición de entradas y salidas de la BQ25505. Fuente: Manual BQ25505

En la siguiente tabla 2.1 se detallará el conjunto de pines de la placa BQ25505 y la función que realizan.



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

Damien Lahire

Nº	PIN		I/O	Descripción/Función
	Nombre			
1	$V_{SS}$		Entrada	Conexión de tierra general del dispositivo.
2	$V_{IN\_DC}$		Entrada	Voltaje de entrada DC de la PMU proveniente del KEH.
3	$V_{OC\_SAMP}$		Entrada	Clavija de muestreo para la red MPPT. Este pin es el encargado de imponer el porcentaje al cual se regulará $V_{IN\_OC}$ .
4	$V_{REF\_SAMP}$		Entrada	Almacena la tensión de entrada regulada por el circuito MPPT.
5	$\overline{EN}$		Entrada	Entrada activa de programación digital para activar/desactivar el CI.
6 17 18	NC		Entrada	Conectar a tierra usando el PowerPad del IC
7	$V_{BAT\_OV}$		-	Conectar este pin al punto medio de un divisor resistivo para programar el umbral de sobretensión de $V_{STOR}$ .
8	$V_{RDIV}$		Salida	Conectar el lado alto de los divisores resistivos a este voltaje de polarización para generar los umbrales de tensión.
11	$OK\_HYST$		Entrada	Desempeña la función de fijar el umbral de histéresis de $V_{BAT\_OK}$ mientras el voltaje de la batería recargable incrementa.
12	$OK\_PROG$		Entrada	Desempeña la función de fijar el umbral de histéresis de $V_{BAT\_OK}$ mientras el voltaje de la batería recargable decrece.
13	$V_{BAT\_OK}$		Salida	Indicador digital sobre el estado de la batería. Internamente referido a $V_{STOR}$ .
15	$V_{SS}$		Alimentación	Conexión a tierra de la señal para el dispositivo.
18	$V_{BAT\_SEC}$		Entrada/Salida	Conectar una batería recargable para almacenar la energía de salida de la PMU.
19	$V_{STOR}$		Salida	Salida principal del convertidor boost. En este pin deben conectarse condensadores para gestionar el voltaje de salida.
20	$L_{BOOST}$		Entrada	Conector inductor que gestiona la conmutación del convertidor boost.

Tabla 2.1: Sumario de pines de interés de la BQ25505.

Los pines no descritos anteriormente son debido a su no utilización para la realización del presente proyecto. Estos pines son el 9, 10 y 14.

En el pin 14 se puede incorporar una batería primaria no recargable. Dado que esto supondría un incremento en peso y espacio, se decidió no incorporarla en el diseño adaptado de la PMU final.

Los pines 9 y 10 permiten disponer de niveles altos y bajos en sus terminales ya que internamente están conectados a puertas lógicas del tipo buffer, estando una de estas puertas lógicas negadas para generar el efecto contrario. Por lo tanto, si en el pin 9 tenemos un nivel alto, en el pin 8 tendríamos un nivel bajo. Esto podría llegar a ser útil para conmutar una salida mediante multiplexor. No obstante, para la aplicación descrita en este TFG no se necesita más que una salida de sistema y por este motivo estos pines no son utilizados.

El fabricante recomienda dejar los pines no utilizados en el aire para que no afecten al comportamiento del CI.

### 2.2.3 DEFINICIÓN DE LAS TENSIONES UMBRALES Y RESISTENCIAS CARACTERÍSTICAS DEL BQ25505

A continuación, se definirán los umbrales de tensión característicos de la placa BQ25505.

- **$V_{BAT\_UV}$ :** Para evitar que las baterías se dañen y se corra el riesgo de que su carga se agote completamente, el CI dispone de un umbral de subtensión que se genera internamente, más una histéresis de este umbral llamado  $V_{BAT\_UV\_HYST}$ . Si el voltaje en la batería está disminuyendo,  $V_{BAT\_UV}$  adquiere un valor de 1.95 V típicamente. En cambio, si el voltaje de la batería esta aumentado, este umbral viene dado por la suma de  $V_{BAT\_UV}$  y  $V_{BAT\_UV\_HYST}$ .
- **$V_{BAT\_OV}$ :** Para evitar que las baterías se vean expuestas a voltaje por encima de lo permitido que pudieran causar daños en estos elementos, resistencias externas a la BQ25505 serán necesarias para gestionar estos umbrales. La figura 2.6 muestra las resistencias externas y su conexión al pin  $V_{RDIV}$ , que ejerce como tensión de polarización.

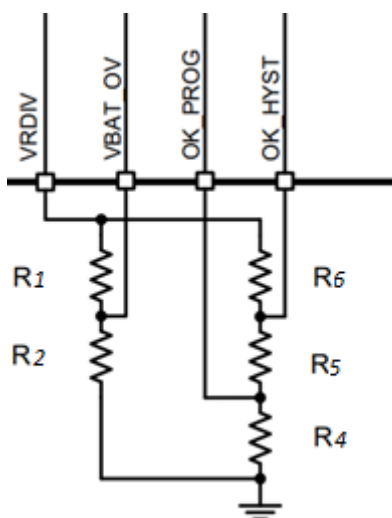


Figura 2.6: Gestión de los umbrales de  $V_{BAT\_OV}$ ,  $OK\_PROG$  y  $OK\_HYST$  mediante resistencias externas y la tensión  $VRDIV$ . Fuente: Manual BQ25505 (Debidamente adaptado por el autor)

Si la tensión en la batería está creciendo,  $V_{BAT\_OV}$  viene definido de la siguiente manera.

$$V_{BAT\_OV} = \frac{3}{2} V_{BIAS} \left(1 + \frac{R1}{R2}\right)$$

Siendo  $V_{BIAS}$  una tensión de referencia para programar estos umbrales. El fabricante estima que es de 1.21 V típicamente.

En cambio, si la tensión de la batería está decreciendo,  $V_{BAT\_OV}$  corresponde a la resta entre  $V_{BAT\_OV}$  y la histéresis interna  $V_{BAT\_OV\_HYST}$ . La suma de las resistencias  $R1$  y  $R2$  debe ser aproximadamente de 13M $\Omega$ .

- **$V_{BAT\_OK\_HYST}$  Y  $V_{BAT\_OK\_PROG}$ .**

El CI permite al usuario programar un umbral de tensión entre  $V_{BAT\_UV}$  y  $V_{BAT\_OV}$ , para indicar que la tensión en  $V_{STOR}$  está en un nivel satisfactorio.

Cuando la tensión en la batería crece, la siguiente ecuación gestiona este umbral.

$$V_{BAT\_OK\_HYST} = V_{BIAS} \left(1 + \frac{R5}{R4}\right)$$

En contrapartida, si la tensión decrece, la ecuación siguiente muestra cómo se gestiona este umbral.

$$V_{BAT\_OK\_PROG} = V_{BIAS} \left( 1 + \frac{R_5 + R_6}{R_4} \right)$$

La suma de las resistencias  $R_4$ ,  $R_5$  y  $R_6$  debe ser aproximadamente  $13M\Omega$ .

## 2.2.4 POSICIÓN RELATIVA DE LOS DISTINTOS UMBRALES DE VOLTAJE EN V<sub>STOR</sub> Y DEFINICION DE MODOS DE FUNCIONAMIENTO

El dispositivo autónomo BQ25505 dispone de cuatro modos de funcionamiento. Dos de ellos son los que mayor posibilidad tienen de entrar en funcionamiento. Estos dos modos son gestionados a través de la función de Storage Control de la PMU. En este apartado se pretende explicar estos modos de funcionamiento conforme la tensión de salida  $V_{STOR}$  alcanza ciertos umbrales de tensión.

Respecto a la tensión de entrada  $V_{IN\_DC}$ , si el circuito está trabajando en modo de CS, que es uno de los dos modos más característicos, debe tener un valor típico de 600 mV para comenzar a cosechar energía. Por debajo de este valor, la PMU se encuentra deshabilitada. En cambio, si el CI está trabajando en modo cargador boost principal activado, la entrada del circuito rebaja este nivel típico hasta los 100 mV, para que el convertidor se habilite. Por lo tanto, estos niveles de tensión a la entrada son de gran importancia ya que definen si el convertidor está habilitado y así poder comenzar a cargar la salida del CI.

Una vez habilitado el convertidor de carga, el siguiente aspecto característico que nos establece ciertos funcionamientos de la placa es la tensión  $V_{STOR\_CHGEN}$ . Esta tensión de referencia de la salida es típicamente 1.8 V. La figura 2.7 muestra un resumen de los umbrales de tensión en  $V_{STOR}$  y que alteraciones presentan  $V_{STOR}$  y  $V_{BAT\_SEC}$ .

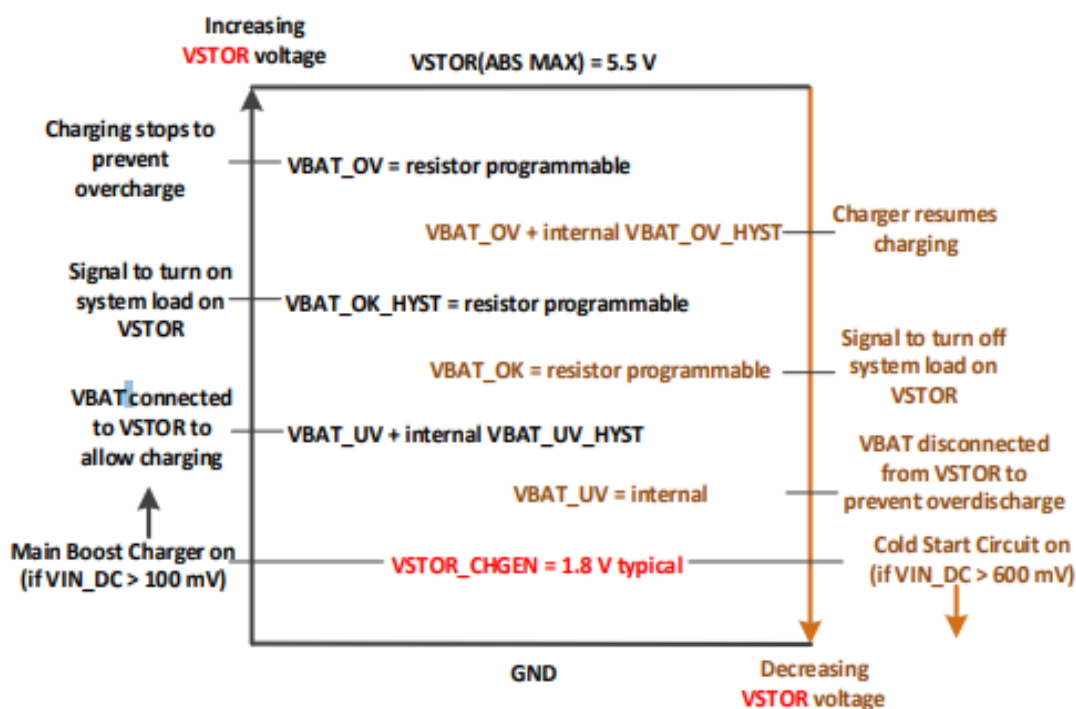


Figura 2.7: Sumario de los umbrales de tensión en  $V_{STOR}$ . Fuente: Manual BQ25505

A continuación, se mostrarán dos tablas en función del crecimiento o decremento de la tensión en  $V_{STOR}$  para aclarar los aspectos de la figura anterior. Si  $V_{STOR}$  está creciendo, la operativa del CI vendría dada por la siguiente tabla 2.2.

Condición	Funcionalidad
$V_{STOR\_CHGEN} < V_{STOR} < V_{BAT\_UV} + V_{BAT\_UV\_HYST}$	Cargador boost principal se habilita siempre que la tensión de entrada sea mayor a 100 mV.
$V_{BAT\_UV} + V_{BAT\_UV\_HYST} < V_{STOR} < V_{BAT\_OK\_HYST}$	La batería secundaria se conecta a $V_{STOR}$ permitiendo así que empiece a cargarse.
$V_{BAT\_OV} < V_{STOR} < V_{BAT\_OK\_HYST}$	Se envía una señal para conectar la carga del sistema a $V_{STOR}$
$V_{STOR} > V_{BAT\_OV}$	Se deshabilita la carga de la salida para evitar sobrecargas en $V_{STOR}$ y $V_{BAT\_SEC}$

Tabla 2.2: Funcionalidades de la BQ25505 conforme la tensión de  $V_{STOR}$  crece

Una vez se hubiese llegado al umbral de sobretensión  $V_{BAT\_OV}$ , la operativa si  $V_{STOR}$  fuese decreciendo vendría dada por la siguiente tabla 2.3.

<b>Condición</b>	<b>Funcionalidad</b>
$V_{BAT\_OV} + V_{BAT\_OV\_HYST} > V_{STOR} > V_{BAT\_OK}$	El cargador se habilita de nuevo para permitir la carga de $V_{BAT\_SEC}$ y $V_{STOR}$ .
$V_{BAT\_OK} > V_{STOR} > V_{BAT\_UV}$	Se envía una señal para desconectar la carga del sistema en $V_{STOR}$
$V_{BAT\_UV} > V_{STOR} > V_{STOR\_CHGEN}$	$V_{BAT\_SEC}$ se desconecta de $V_{STOR}$ para prevenir subtensión en la batería
$V_{STOR} < V_{STOR\_CHGEN}$	El circuito entra en modo de CS siempre que la tensión de entrada sea mayor a 600 mV.

Tabla 2.3: Funcionalidades de la BQ25505 conforme la tensión de  $V_{STOR}$  decrece

El modo de funcionamiento más usual cuando el captador de energía comienza a funcionar es el de CS. Para ello se deben dar las siguientes condiciones:

- $V_{STOR} < V_{STOR\_CHGEN}$ ,  $V_{IN\_DC} \geq V_{IN\_CS}$  and  $P_{IN} > P_{IN\_CS}$

Siendo  $P_{IN\_CS}$  la potencia de CS y  $V_{IN\_CS}$  la tensión de entrada en CS. Para este caso el circuito interno de CS es el encargado de subministrar energía hacia la salida  $V_{STOR}$  e intentar alcanzar el valor de la tensión  $V_{STOR\_CHGEN}$ .

El circuito de CS es un cargador de impulso de histéresis no regulado con menor eficiencia que el cargador principal. El objetivo principal de este circuito de CS es elevar la tensión de  $V_{STOR}$  por encima de  $V_{STOR\_CHGEN}$  para habilitar el cargador principal.

Una vez el circuito de CS incrementa  $V_{STOR}$  por encima de 1.8V típicos, el modo de funcionamiento pasa a modo cargador boost principal activado siempre que se den, las siguientes condiciones.

- $V_{STOR} > V_{STOR\_CHGEN}$ ,  $V_{IN\_DC} > V_{IN\_DC}$  y  $\overline{EN} = \text{LOW}$

Por lo tanto, el cargador principal se habilita e impulsa la transferencia de energía del sistema, para poder cargar tanto la salida del CI, como la batería secundaria. Este modo de funcionamiento es el más eficiente dado que las dos terminales  $V_{BAT\_SEC}$  y  $V_{STOR}$  están unidos entre sí, permitiendo la carga de ambos de forma simultánea. La figura 2.8 muestra que modo de funcionamiento se acciona conforme la tensión en  $V_{STOR}$  va alcanzando la tensión  $V_{STOR\_CHGEN}$ .

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

Damien Lahire

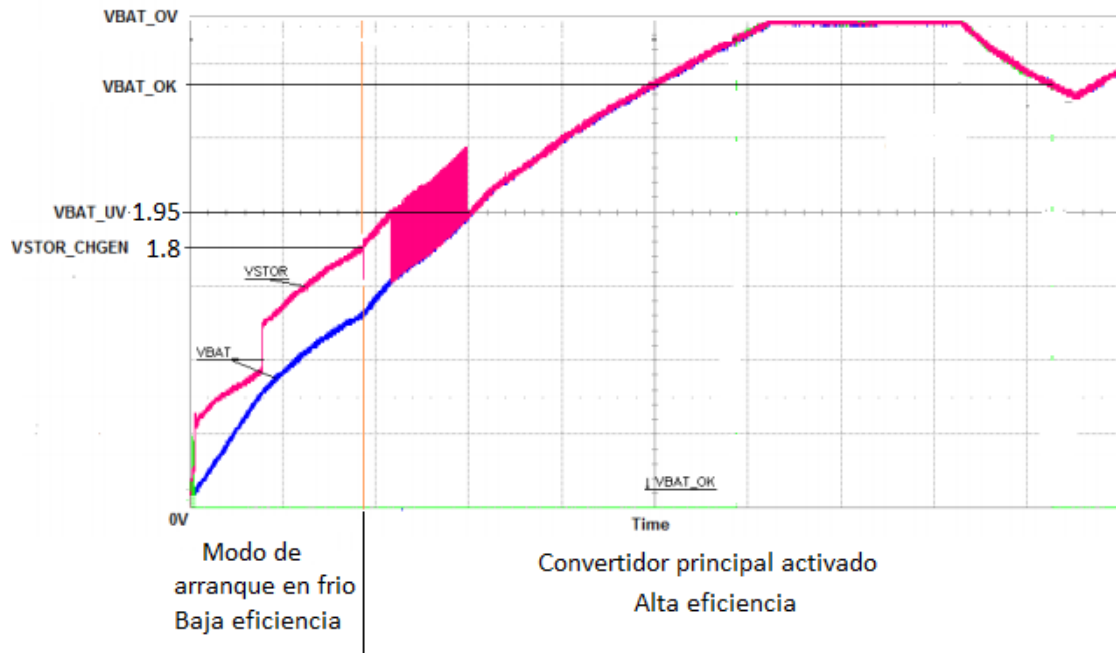


Figura 2.8: Comparativa de los modos de CS y cargador principal activo. Fuente: Manual BQ25505 (Debidamente modificado por el autor)

Cuando el voltaje en  $V_{STOR}$  supera el umbral  $V_{BAT\_UV}$ , se enciende un  $P_{MOS}$  que une los pines  $V_{STOR}$  y  $V_{BAT\_SEC}$ , lo que proporciona una carga adicional a  $V_{STOR}$ . Esto podría hacer que su voltaje caiga por debajo del umbral  $V_{BAT\_UV}$ , haciendo que  $V_{STOR}$  y  $V_{BAT\_SEC}$  se desconecten. También podemos apreciar en la figura anterior el voltaje por el cual se llega a saturar la salida de la PMU. Este voltaje sería el umbral  $V_{BAT\_OV}$ .

Los dos modos de funcionamiento menos frecuentes son convertidor principal desactivado y apagado térmico. En el primer caso el convertidor principal se desactiva cuando la clavija  $\overline{EN}$  tiene un nivel alto de voltaje. En el segundo caso, el CI se desactiva cuando su sensor integrado de temperatura excede el nivel máximo de  $85^{\circ}\text{C}$ .

## 2.3 ADP5092

El ADP5092 es otro dispositivo de gestión de potencia o PMU. Este CI está siendo empleado por el grupo de investigación SARTI para su experimentación y simulación en el proyecto Meloá. Se utiliza también para aplicaciones basadas en EH. Este dispositivo servirá de comparación con el dispositivo BQ25505. Por este motivo se realizará una comparativa teórica en el presente capítulo, y una comparativa analítica en el quinto capítulo.

Al igual que el BQ25505, este CI convierte la máxima cantidad de potencia que puede provenir de células fotovoltaicas o generadores tanto termoelectricos como piezoeléctricos, para ser almacenada en un elemento recargable, como ahora bien una batería. La técnica MPPT para transferir energía en este dispositivo es igual que la de la BQ25505.

El ADP5092 dispone de tres tipos de funcionamiento:

- Modo de CS
- Modo síncrono
- Modo asíncrono

Estos modos de funcionamiento dependen de los valores de la tensión en los pines BAT y SYS. En estos dos terminales se acoplarían el ESE y LOAD respectivamente. Más adelante se verá la correspondencia con la placa BQ25505. El modo más eficiente es el síncrono, momento en el cual los terminales SYS y BAT quedan internamente conectados. La figura 2.9 muestra un esquema de los principales pines de la ADP5092.

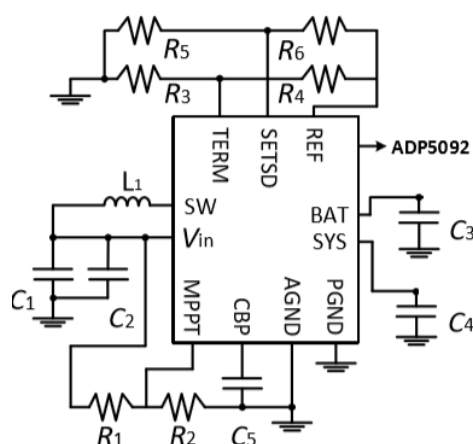


Figura 2.9: Sumario de pines del ADP5092 y los componentes de referencia que se conectan a cada uno de estos terminales. Fuente: [6]



Esta figura servirá de fundamento para la comprensión de la tabla 2.4. En ella se realiza una comparativa de equivalencia de pines entre la ADP5092 y la BQ25505, describiendo también la funcionalidad de estos terminales.

Pin BQ25505	Pin ADP5092	Función
$V_{BAT\_SEC}$	BAT	Almacenar el voltaje de salida en el elemento conectado a estos pines
$V_{STOR}$	SYS	Salida de los circuitos integrados
$V_{OC\_SAMP}$	MPPT	Clavija de muestreo para la red MPPT. Define el porcentaje al cual será regulada la tensión de entrada
$V_{REF\_SAMP}$	CBP	Almacenar el voltaje regulado de $V_{IN\_DC}$ . Este voltaje es proporcionado por el circuito de muestreo del MPPT.
$L_{BOOST}$	SW	Nodo de conmutación para el regulador de impulso con conexión a un inductor externo
$V_{RDIV}$	REF	Nodo de control de referencia de voltaje interno para los umbrales de tensión en la salida
$V_{BAT\_UV}$	SETSD	Establece el voltaje de descarga de apagado de las placas de prueba
$V_{BAT\_OV}$	TERM	Establece el voltaje máximo admisible en las baterías para dejar de transferir energía por las PMU
$V_{SS}$	PGND	Terminal de masa de los CI

*Tabla 2.4: Comparativa de pines que realizan funciones semejantes tanto en la BQ25505 como en la ADP5092.*

Las baterías recargables del ADP5092 también disponen de umbrales de referencia para evitar sobretensiones y poder dañar estos elementos, y evitar también tensiones bajas para alimentar las cargas en sus salidas.

A continuación, se realizara una comparativa respecto a los umbrales de tensión y otros parámetros como pueden ser las tensiones de CS.

<b>Parámetro</b>		<b>Valores</b>		<b>Umbral programable</b>	
<b>BQ25505</b>	<b>ADP5092</b>	<b>BQ25505</b>	<b>ADP5092</b>	<b>BQ25505</b>	<b>ADP5092</b>
$V_{IN\_CS}$	$V_{IN\_COLD}$	600 mV	380 mV	-	-
$V_{IN\_DC}$	$V_{IN}$	100 mV	80 mV	-	-
$V_{OC\_SAMPL}$	$t_{OCV\_CYCLE}$	16 s	16 s	-	-
$V_{OC\_STLG}$	$t_{OCV\_SAMPL}$	256 ms	256 ms	-	-
$V_{BAT\_OV}$	$V_{BAT\_TERM}$	5.5 V	5.2 V	Si	Si
$V_{BAT\_UV}$	$V_{SETSD}$	1.95 V	2 V	No	Si
$V_{STOR\_CHGEN}$	$V_{SYS\_TH}$	1.73 V	1.87 V	-	-
$V_{BIAS}$	$V_{INT\_REF}$	1.21 V	1.011 V	-	-

Tabla 2.5: Comparativa de los umbrales de tensión y otros parámetros característicos de ambas placas.

La tabla 2.5 muestra una comparativa de los valores típicos de los umbrales de referencia de la BQ25505 y la ADP5092. En el caso de la BQ25505 estos umbrales están referidos al nivel de tensión del pin  $V_{STOR}$ . En cambio, en la ADP5092, los umbrales toman la referencia de la tensión del pin  $BAT$ . También se especifica si estos umbrales son programables mediante divisores resistivos, o vienen impuestos internamente por la placa. Se han comparado otros aspectos importantes de ambas placas como ahora bien la tensión de entrada debido al modo de CS, el tiempo de muestreo del circuito MPPT, la tensión de activación de los convertidores principales de ambas placas y la tensión de referencia para generar los umbrales de tensión.

Para finalizar el capítulo, se expone una tabla que compara los precios unitarios de las PMU y de sus placas de evaluación. También se muestra en esta tabla si los CI utilizan la directiva RoHS 2011/65 / UE. Esta directiva restringe el uso de plomo y otras sustancias potencialmente nocivas incluyendo mercurio, cadmio, cromo VI, polibromobifenilos (PBB) y bromodifeniléteres (PBDE), para la fabricación de productos eléctricos y electrónicos. En 2015 fueron añadidos cuatro nuevos elementos aumentando el total de sustancias restringidas en diez. [11]

<b>Nombre del CI</b>	<b>Valor (unitario en €)</b>	<b>RoHs</b>
<i>BQ25505</i>	2.30	No
<i>ADP5092</i>	1.46	Sí
<i>BQ25505EVM-218</i>	46.89	No
<i>ADP5092-1-EVALZ</i>	45.18	Sí

Tabla 2.6: Comparativa de precios y directiva RoHS entre la BQ25505 y la ADP5092.

### **3 DISEÑO DE LA NUEVA PMU ADAPTADA**

Tras el estudio del CI BQ25505, se propuso el rediseño de una de sus placas de evaluación, la BQ25505EVM-218. En el anexo A se muestra el esquemático completo de esta placa.

Dadas las dimensiones del drifter, lugar donde se debe implementar esta placa, hay que minimizar al máximo las longitudes de esta nueva PMU. Este hecho debe ser así ya que la posición donde se debe colocar el CI ya está predefinida. Esta nueva PMU rediseñada será nombrada como BQ25505-DL a lo largo de la memoria.

Por otro lado, con este capítulo se pretende explicar de forma resumida la herramienta utilizada para la creación de la BQ25505-DL. También se mostrarán las distintas modificaciones que se realizaron, y la razón por la que ciertos pines del BQ25505 no son utilizados para la creación de la BQ25505-DL. Por último, se darán detalles de cómo fue la soldadura de la PCB.

#### **3.1 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.[12]

Las principales características del software de diseño 3D son las siguientes:

- Diseño de circuito electrónico y simulación. Esta herramienta permite el diseño mediante sus librerías de componentes, huellas de los dispositivos, etc.
- Diseño de circuitos en línea. Dispone de diferentes capas de diseño y múltiples elementos para diferenciar las dos caras de las PCB.
- Importación de esquemas y circuitos impresos desde otros softwares de diseño como ahora bien Eagle, Kicad, LTspice y Altium.
- Permite el desarrollo en línea desde diferentes lugares y plataformas como Mac, Windows, Android, Linux, debido a que su contenido es guardado en la nube. Por contra, si se desea guardar los proyectos realizados, se debe registrar en su página Web. Estos proyectos serán públicos para todo usuario registrado.
- Fabricación de PCB desde EasyEDA a un coste bajo.

En el anexo B se muestra el listado de características específicas utilizadas para el modelado 3D y el proceso hasta la fabricación de la BQ25505-DL mediante la herramienta EasyEDA.

### 3.2 VALORES DE LOS COMPONENTES DE LA BQ25505-DL Y MODIFICACIONES APLICADAS EN EL ESQUEMÁTICO DEL BQ25505EVM-218

Con anterioridad al diseño de la PCB, se tuvo que rediseñar el esquemático, ya que algunos componentes y pines de la placa no requieren de su utilización. Todos los jumpers han sido suprimidos en esta nueva placa. También cabe recordar que la nueva PCB será de unas dimensiones muy pequeñas, por lo cual se necesita simplificar al máximo y optimizar los recursos necesarios para la BQ25505-DL.

En esta nueva placa se dispondrá de una entrada y una salida de sistema. La figura 3.1 muestra el aspecto del dispositivo. Las tensiones  $V_{CH1}$  y  $V_{CH2}$  y las corrientes  $i_{CH3}$  e  $i_{CH4}$ , se explicarán en el siguiente capítulo, dado que son fundamentales para realizar los test.

Por otro lado, se observará en los resultados la funcionalidad del diodo  $D_1$ . Si se incorpora, se consigue que la corriente no vuelva hacia el generador, evitando así la pérdida de energía generada descargando los condensadores  $C_1$  y  $C_6$  de entrada. Por lo tanto, el único sentido de circulación de corriente es hacia la PMU. Por contra, se tienen las pérdidas debido al voltaje de caída del diodo.

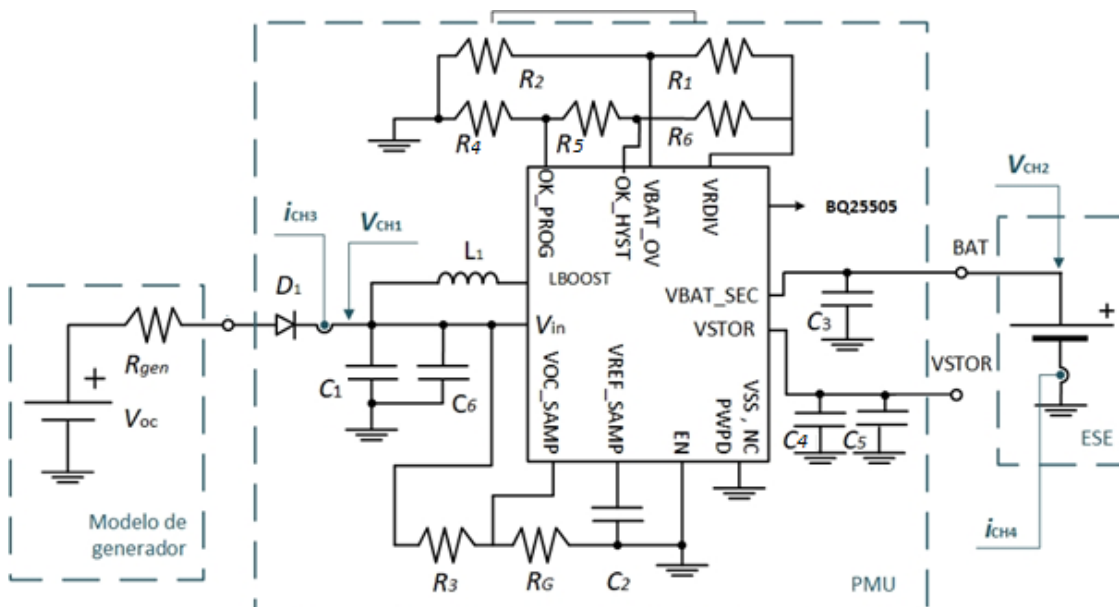


Figura 3.1: Composición de la PMU tras analizar los pines y componentes apropiados para esta nueva PCB, el ESE y el micro generador de entrada. .

Podemos ver también como el terminal  $V_{STOR}$  queda en el aire. Esto es debido a que no se conectara ninguna carga en su terminal, siendo en este caso el pin de salida del sistema  $V_{BAT\_SEC}$  (Terminal BAT).

Se puede observar como los pines 9, 10, 13 y 14, tienen una flecha verde encima de estos pines. Esto significa que no serán utilizados, a excepción del pin 13 que se decidió utilizarlo finalmente.

Tal y como se ha comentado con anterioridad, los pines 9 y 10 generarían pulsos para decidir si conectar  $V_{STOR}$  o  $V_{BAT\_PRI}$  mediante un multiplexor en la salida  $V_{OR}$ . Puesto que  $V_{BAT\_PRI}$  (pin 14) no se utiliza, debido a que no es un dispositivo recargable, esta funcionalidad en torno a los pines 9 y 10 carece de sentido incorporarlos a la nueva PCB.

En primera instancia, se decidió no utilizar el pin 13 ya que el espacio para la creación de la BQ25505-DL era muy reducido. No obstante, al finalizar la composición de la PCB, se dio la posibilidad de poder introducir este pin 13 para testear el nivel del voltaje en la batería secundaria. En el anexo C se muestra el esquemático optimizado y simplificado de la BQ25505-DL, desde EasyEDA.

Al eliminar los jumpers, se tuvo que implementar una solución para poder moderar el tanto por ciento de MPPT. La figura 3.2 muestra la comparativa entre los métodos utilizados por la BQ25505EVM-218 y la BQ25505-DL.

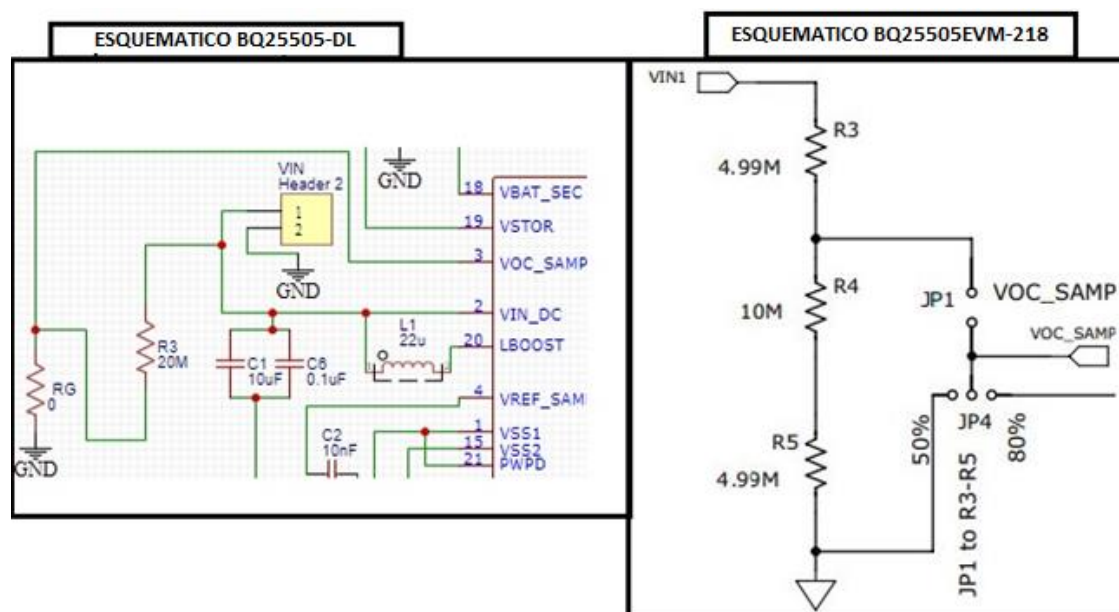


Figura 3.2: Comparativa de las técnicas utilizadas para obtener el porcentaje MPPT.

En el esquemático derecho, tenemos la posibilidad de conectar el jumper JP1 para disponer de un 75% de MPPT. En cambio, si conectásemos el jumper JP4, dispondríamos de un 50% si se conectara a masa o un 80% si se conectara a  $V_{STOR}$ . Ambos jumpers no pueden ser conectados a la vez.

En cambio, el esquemático izquierdo referido a la nueva PCB, cabe la posibilidad de tener diferentes porcentajes de MPPT mediante la resistencia  $R_G$ . Para fijar el porcentaje de  $V_{IN\_OC}$  en un 50 %,  $V_{OC\_SAMP}$  debe ir conectado a masa y a un extremo de la resistencia de  $20M\Omega$  (Suma de  $R_3$ ,  $R_4$  y  $R_5$  del esquemático del BQ25505EVM-218). Por lo tanto, el terminal RG debe ser estañado convirtiéndose en un cable del circuito para que RG se conecte directamente a masa.

Por el contrario, para imponer un porcentaje diferente, la  $R_G$  se debería calcular para definir así este MPPT. Dado que tenemos un divisor de tensión resistivo, esta resistencia se podría calcular de la siguiente forma.

$$V_{REF\_SAMP} = V_{IN\_OC} \left( \frac{R_g}{20M\Omega + R_g} \right)$$

Por lo tanto, se pueden deducir las fórmulas que fijan el porcentaje de MPPT y RG.

$$\frac{\% MPPT}{100} = \frac{R_g}{20M\Omega + R_g} \rightarrow R_g = \frac{\left(\frac{\% MPPT}{100}\right) * 20M\Omega}{\left(1 - \frac{\% MPPT}{100}\right)}$$

A continuación, se mostrara una tabla con todos los valores de las resistencias, los condensadores y la bobina de la BQ25505-DL. También se muestra, en los casos que se haya cambiado la nomenclatura de los componentes, su referencia con la placa BQ25505EVM-218.

Nombre	Valor	Referencia
R <sub>1</sub>	7.5 MΩ	-
R <sub>2</sub>	5.76 MΩ	-
R <sub>3</sub>	20 MΩ	R <sub>3</sub> +R <sub>4</sub> +R <sub>5</sub>
R <sub>4</sub>	887 KΩ	R <sub>8</sub>
R <sub>5</sub>	6.98 MΩ	R <sub>7</sub>
R <sub>6</sub>	5.36 MΩ	-
R <sub>G</sub>	Variable	-
C <sub>1</sub> ,C <sub>2</sub>	10 μF	-
C <sub>3</sub>	220 μF	-
C <sub>4</sub> ,C <sub>6</sub>	0.1 μF	-
C <sub>5</sub>	4.7 μF	-
L <sub>1</sub>	22 μH	-

Tabla 3.1: Tabla con los valores de los componentes utilizados para la creación de la BQ25505-DL y la referencia con los componentes de la BQ25505EVM-218.

Los valores escogidos de los componentes son los recomendados por el fabricante de la BQ25505EVM-218, a excepción de los componentes C<sub>1</sub> y C<sub>3</sub>, los cuales pudieron ser aprovechados unos de mayor valor que se encontraban en el laboratorio. Estos valores están dentro de las especificaciones, ya que no se recomienda rebajar los valores de los componentes, pero si es posible incrementar su valor. Por otro lado, se utilizará la batería recargable LP-402025-IS-3 como ESE, donde se almacenará la tensión de salida de la PMU. Su tensión nominal es de 3.7V. Dados estos valores en los componentes, los valores de los umbrales de tensión vienen impuestos de la forma que muestra la tabla 3.2.

Nombre del Umbral de tensión	Valor
VBAT_UV	1.95 V
VBAT_OK_HYST	2.79 V
VBAT_OK_PROG	2.99 V
VBAT_OV	4.18 V
VBAT_OV_HYST	24 mV
VBAT_UV_HYST	15 mV

Tabla 3.2: Valores nominales de las tensiones umbrales y sus histéresis internas.

Para finalizar este apartado sobre el diseño de la placa BQ25505-DL, en el anexo D se muestran diferentes vistas de la placa desde EasyEDA.

### 3.3 SOLDADURA DE LA BQ25505-DL

Tras recibir los componentes y las placas de pruebas, se dispuso de un equipo de soldadura para el ensamblaje de los componentes en la PCB. Para el chip BQ25505, se utilizó una plancha de soldadura con la huella de este componente para su enlace. Para los demás componentes se utilizó una pasta de soldadura que hizo posible una unión más precisa a la placa. La figura 3.3 muestra el aspecto de la BQ25505-DL una vez finalizadas las tareas de soldadura.

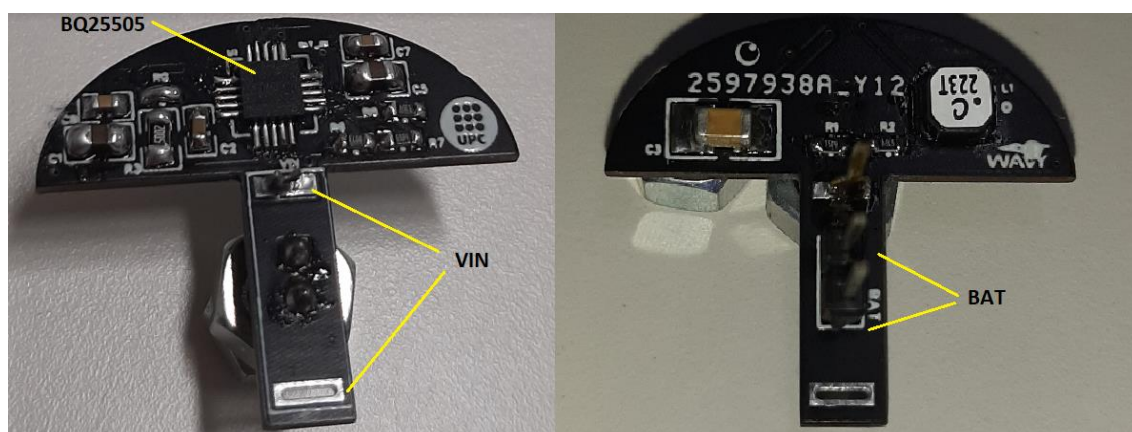


Figura 3.3: Aspecto de la placa BQ25505-DL tras realizar la soldadura de sus componentes.

## 4. DISEÑO DE LOS TEST Y EQUIPOS DE MEDIDA

Tras la fabricación de la BQ25505-DL, este capítulo pretende explicar los dos tipos de simulaciones realizados. 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.

En segundo lugar, se efectuaron dos tipos de simulaciones en un brazo robótico de la compañía Kuka Iberia. Cada una de estas simulaciones emula el movimiento que realiza el drifter de deriva en el mar. Para ello se parametrizan dos tipos de mar diferentes llamados Airy y Ochi-Hubble (OsHu). El objetivo es poder simular cualquier tipo de movimiento marino sin necesidad de estar in situ, en el mar. También se podrá realizar una comparativa, al igual que en los test con mesa de vibraciones, de las placas BQ25505-DL y ADP5092. A continuación, se darán detalles concretos de cómo se realizaron estos ensayos.

### 4.1 TEST EN MESA DE VIBRACIÓN

En este primer test se podrá comprobar el correcto funcionamiento de la PMU creada y a su vez compararla con la ADP5092. La figura 4.1 muestra los pasos seguidos para la realización de los test con mesa de vibración, mediante diagrama de bloques.

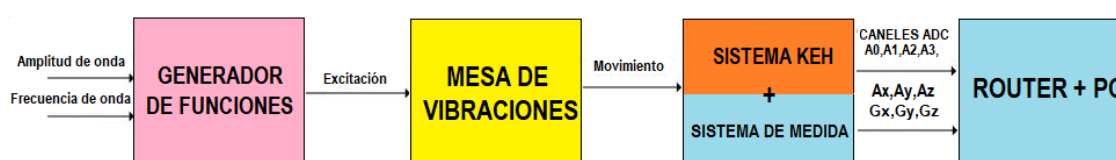


Figura 4.1: Representación de los test en mesa de vibración mediante diagrama de bloques.

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. Antes de pasar a explicar los equipos de medida y el tratamiento de datos, se detallará el proceso de fabricación de la herramienta, que se encarga de acoplar el KEH a la mesa de vibraciones y al robot articulado.



### 4.1.1 DISEÑO DE LA HERRAMIENTA

Para el diseño de la herramienta se utilizaron los programas AutoCAD para generar los planos 2D y Siemens NX para el modelado del 3D. Ambos son importantes ya que los planos 2D fueron utilizados para la impresión de la herramienta, y el diseño 3D para la simulación en el software online de Kuka.

El soporte de la boya consta de 1 disco inferior, 2 discos centrales y la electrónica de la boya en la parte superior (de color rojo). El disco inferior permite unir la brida del robot y la herramienta. Mediante los discos centrales, se estabiliza la boya y hace que no se mueva. También consta de 12 varillas para unir los discos y la electrónica entre sí. Estas varillas son apretadas contra los discos mediante tuercas. En el anexo E se pueden observar tres perspectivas de los planos 2D de la herramienta. Estos fueron los únicos planos necesarios para imprimir la herramienta en impresión 3D.

Una vez finalizados los planos 2D de la herramienta, se realizó el modelado 3D de la herramienta en Siemens NX. La figura 4.2 muestra el aspecto de la herramienta una vez ensamblada.

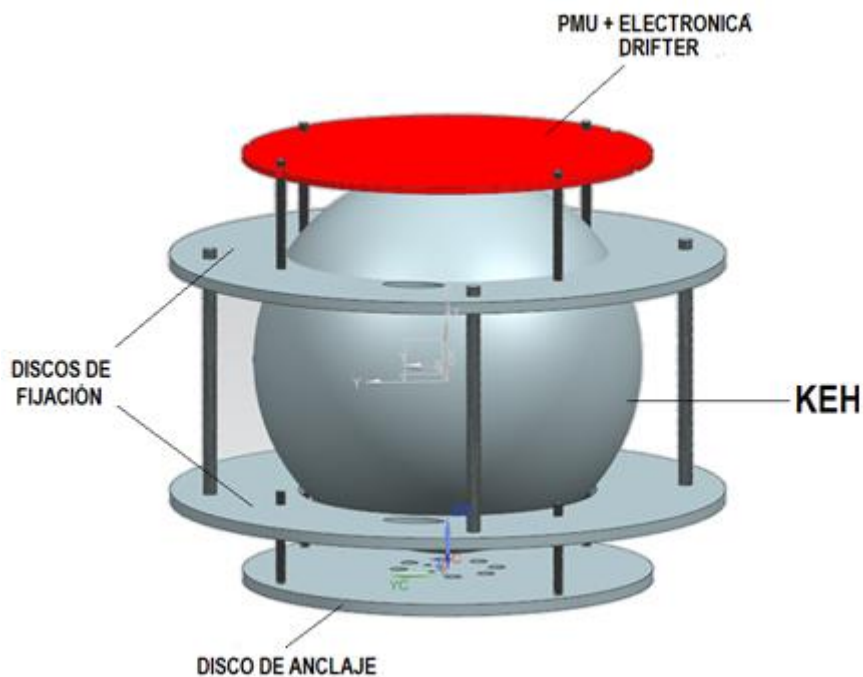


Figura 4.2: Vista 3D de la herramienta definitiva.

## 4.1.2 EQUIPOS DE MEDIDA Y TRATAMIENTO DE DATOS

Para este ensayo se utilizan los siguientes instrumentos y dispositivos:

- Mesa de vibración
- Generador de funciones
- KEH, PMU y ESE
- Convertidor Analógico-Digital (ADC)
- Sensor amplificador de corriente (CSA)
- Unidad de medición inercial (IMU)
- NodeMCU
- Rúter
- PC

Estos son todos los elementos que forman la primera de las simulaciones. La figura 4.3 muestra un diagrama de bloques con todos estos dispositivos.

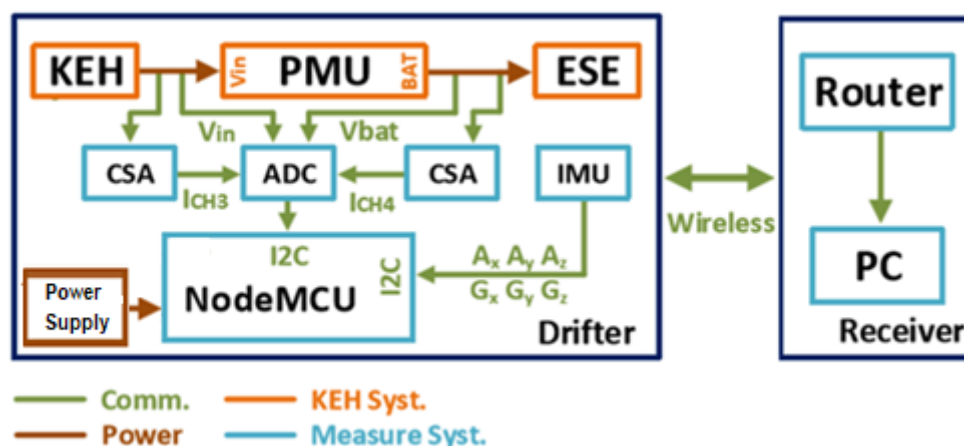


Figura 4.3: Diagrama de bloques de la configuración experimental que incluye el test de prueba a la izquierda y el receptor de señal a la derecha. Fuente: [6]

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 [6].

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. Este módulo se programa de la misma forma que un dispositivo Arduino. Por lo tanto, utilizan el mismo código a la hora de programar.

El IMU proporciona los datos de aceleración lineal ( $A_x$ ,  $A_y$ ,  $A_z$ ) y velocidades angulares ( $G_x$ ,  $G_y$ ,  $G_z$ ) 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 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  $V_{IN}$  y la tensión de salida  $V_{BAT}$ . 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 CSA colocado antes del ADC. La figura 4.4 muestra el circuito del CSA. Este incluye un resistor de derivación ( $R_{SENSE}$ ), por el que pasa la corriente a medir ( $I_{SENSE}$ ), y un resistor de salida ( $R_{OUT}$ ). El terminal de salida  $V_{OUT}$  está conectado al canal del CSA. El CSA está basado en un chip MAX9934 con una ganancia de transconductancia de 25  $\mu A/mV$ .

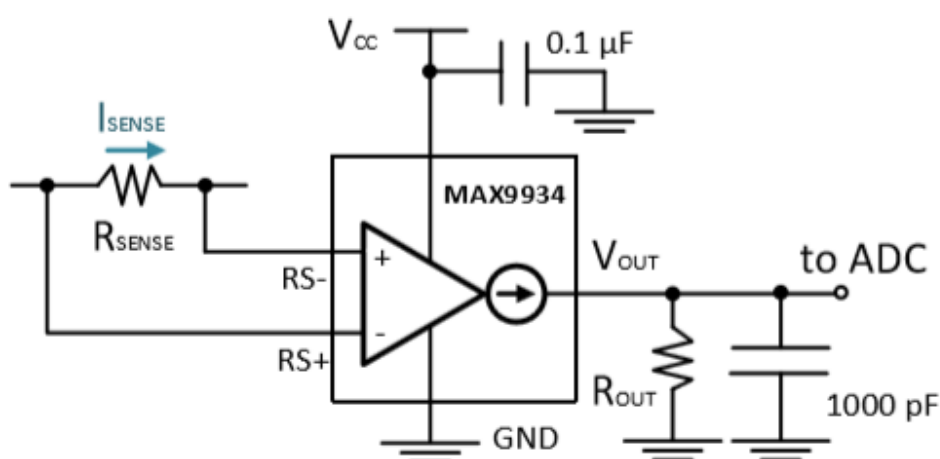


Figura 4.4: Circuito del amplificador sensor de corriente basado en el MAX9934. Fuente: [6]

Como bien se ha comentado antes, realmente lo que se conecta a los canales del ADC son tensiones y no corrientes. Por este motivo se necesitan implementar CSA a la entrada y la salida para convertir las corrientes de entrada y salida en tensiones. La tabla 4.1 muestra los valores escogidos para los componentes que forman los circuitos CSA.

CSA	$R_{SENSE}$	$R_{OUT}$	GANANCIA
1 (Entrada)	0.5 $\Omega$	22 k $\Omega$   2.2 k $\Omega$ (Low   High)	275 V/A   27.5 VA
2 (Salida)	3.3 $\Omega$	12 k $\Omega$	990 V/A

Tabla 4.1: Definición de los valores de los componentes de ambos CSA.

Estos valores han sido escogidos de este modo sabiendo que las corrientes que se generan en la entrada son mayores a la que se generan en la salida de las PMU, en consecuencia, también de los propios valores de los voltajes de entrada y salida. Por este motivo, la ganancia del MAX9934 de salida es mayor que el de entrada. En la tabla 4.2 se pueden observar los niveles de tensión y corriente de entrada y salida teórica para las PMU. También se incorpora la posibilidad de escoger  $R_{OUT}$  (22k $\Omega$  o 2.2k $\Omega$ ), dependiendo de los niveles de corrientes que se quieran medir.

<b>E/S PMU</b>	<b>Intervalo de tensión (V)</b>	<b>Intervalo de corriente (mA)</b>
Entrada	0 – 1	0 - 15
Salida	3.3 (Fijado por batería )	0 - 5

Tabla 4.2: Valores de tensión y corrientes de entrada y salidas para las PMU según las especificaciones descritas.

Por otro lado, para conocer realmente que corrientes de entradas y salidas se tienen, se debe deshacer el cambio dividiendo  $V_{OUT}$  entre la ganancia del CSA correspondiente.

Con respecto a la transmisión de datos, estos se envían en tramas de 20 ms cada una. Cada canal del ADC se introduce en la trama cada 4 ms. Posteriormente se introducen los datos del IMU ( $A_x$ ,  $A_y$ ,  $A_z$ ,  $G_x$ ,  $G_y$ ,  $G_z$ ). Se dejan 4 ms entre medida y medida para que el ADC tenga tiempo a estabilizarse.

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

- Voltaje de entrada ( $V_{CH1}$ )
- Voltaje de salida ( $V_{CH2}$ )
- Corriente de entrada ( $I_{CH1}$ )
- Corriente de salida ( $I_{CH2}$ )
- Aceleraciones lineales y velocidades angulares ( $A_x, A_y, A_z, G_x, G_y, G_z$ )

Estos datos se envían al PC en un fichero csv. Una vez generado este fichero, se deben tratar los datos correctamente mediante la herramienta Matlab. La programación en Matlab se realiza mediante tres scripts que desempeñan funciones 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 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 siguiente de resultados 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.

### **4.1.3 METODOLOGÍA DEL ENSAYO CON MESA DE VIBRACIÓN**

Para estos test, se utiliza una mesa de vibraciones para generar el movimiento del KEH. La mesa de vibraciones lineal está controlada mediante un generador de funciones. Para estos ensayos se realizan test continuos, en los que la amplitud y frecuencia del generador de funciones son constantes, excepto para dos casos en que se realiza un decremento en la amplitud (Escalón).

El IMU se alinea en el eje de movimiento de la mesa (Eje Y). De los datos de aceleración lineal proporcionados por el IMU podrá verse claramente el efecto del escalón en las gráficas que se presentaran más adelante. También se podrán comparar datos como tensiones de entrada y salida, eficiencia y otros parámetros de interés.

Para ello se realizaron un total de ocho simulaciones para poder disponer de datos suficientes para comparar sus resultados. Para estas simulaciones se utilizaron las placas de pruebas BQ25505-DL y dos variaciones de la ADP5092. También se realizaron algunas simulaciones con el diodo  $D_1$  incorporado o sin incorporar este diodo, ya que tiene aspectos positivos y otros negativos que serán analizados más adelante. La tabla 4.3 muestra un resumen sobre que placa se utiliza, si se incorpora el diodo  $D_1$  y si se aplica una técnica MPPT variable o fija. Para las dos últimas simulaciones se realizó el escalón en la amplitud del generador de ondas para ver su comportamiento.

Simulación	Placa	Diode ( $D_1$ )	MPPT
1	BQ25505-DL	Si	Variable
2	BQ25505-DL	No	Variable
3	ADP5092-Var	Si	Variable
4	ADP5092-Fijo	Si	Fijo
5	ADP5092-Var	No	Variable
6	ADP5092-Fijo	No	Fijo
7	ADP5092-Var	No	Variable
8	BQ25505-DL	No	Variable

Tabla 4.3: Sumario de aspectos característicos en las simulaciones con mesa de vibraciones.

Con referencia a las placas ADP5092-Var y ADP5092-Fijo su única diferencia es que la técnica MPPT utilizada es variable, para el primer caso y fija, para el segundo caso. Esta notación se seguirá para todas las simulaciones. Este efecto en el MPPT fijo, se verá reflejado en la tensión de entrada, donde 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  $V_{BAT\_SEC}$ , se cargó con un nivel de tensión de aproximadamente 3.3 V para realizar estos ensayos.

La figura 4.5 corresponde a la simulación realizada con mesa de vibraciones.

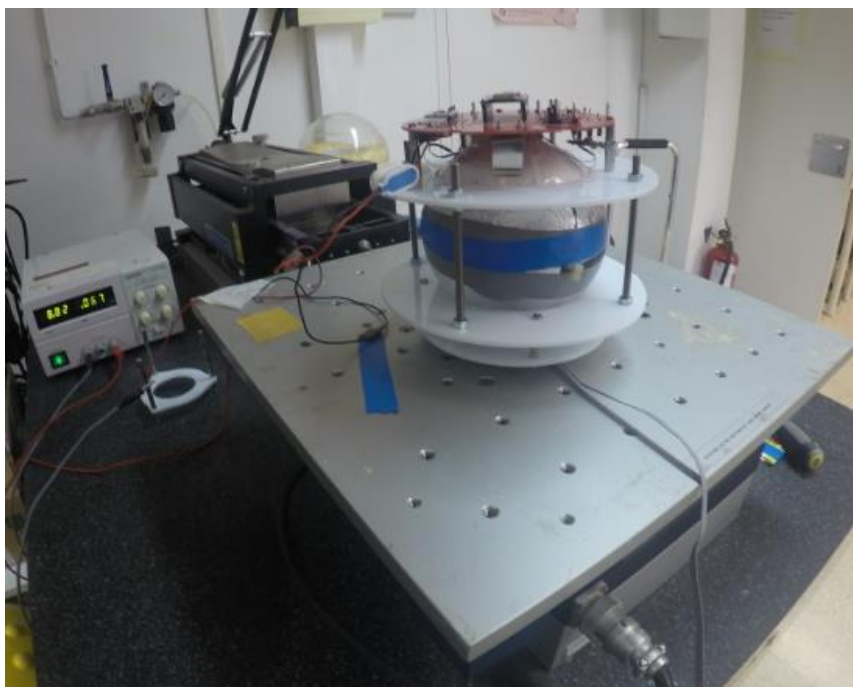


Figura 4.5: Entorno de simulación del KEH, la PMU y el sistema de medición anclado a la mesa de vibraciones.

## 4.2 TEST EN BRAZO ROBOTICO

Para la realización del test con brazo robótico, en primer lugar, se comprobó mediante el software KukaSim.Pro, las limitaciones del robot KR8R1620 (modelo utilizado para las simulaciones), dimensionando un área máxima en el cual, el robot no llegase a límites mecánicos o de software.

En tercer lugar, se utilizó el programa OrcaFlex para extraer coordenadas de rotación y posición del drifter. En cuarto lugar, se realizó la programación basada en los puntos extraídos de OrcaFlex. Por último, se enviaron estos programas, mediante el software WorkVisuals 5.0 al robot Kuka, comprobando así, la funcionalidad de la programación realizada. En el anexo F se disponen de datos técnicos del robot KR8R1620.

La figura 4.6 muestra el proceso desde principio a fin del desarrollo de los test con brazo robótico.

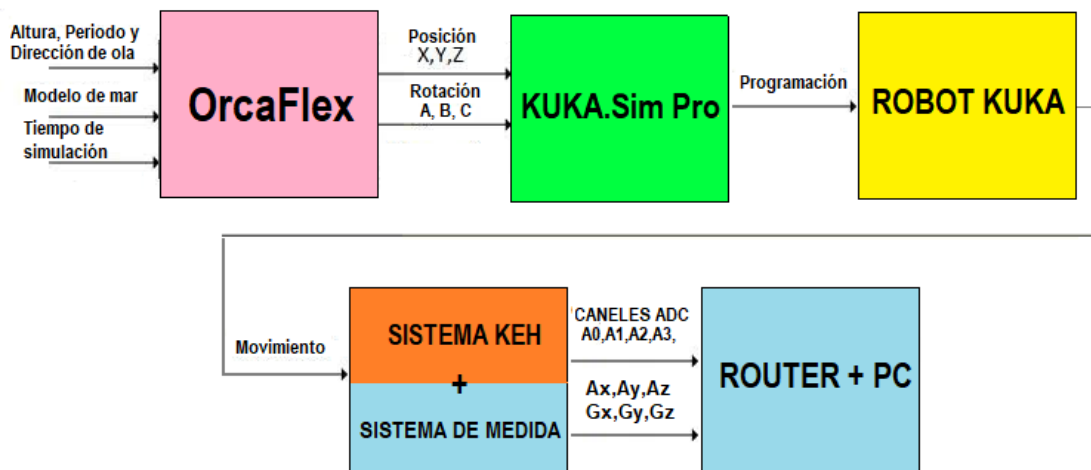


Figura 4.6: Representación de los test con brazo robótico mediante diagrama de bloques.

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 utilizara 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.

## 4.2.1 SIMULACION EN SOFTWARE KUKA.Sim Pro Y OBTENCION DE COORDENADAS CON OrcaFlex

En este punto, se comenzaron los trabajos de simulación con el software KUKA.Sim Pro. Este programa permite visualizar el entorno de trabajo en el que se situara el robot de forma totalmente real.

En primer lugar, se compuso el diseño de la aplicación y se incluyó el modelado 3D de la herramienta, junto al drifter. La figura 4.7 muestra la distribución del diseño en KukaSim.Pro.

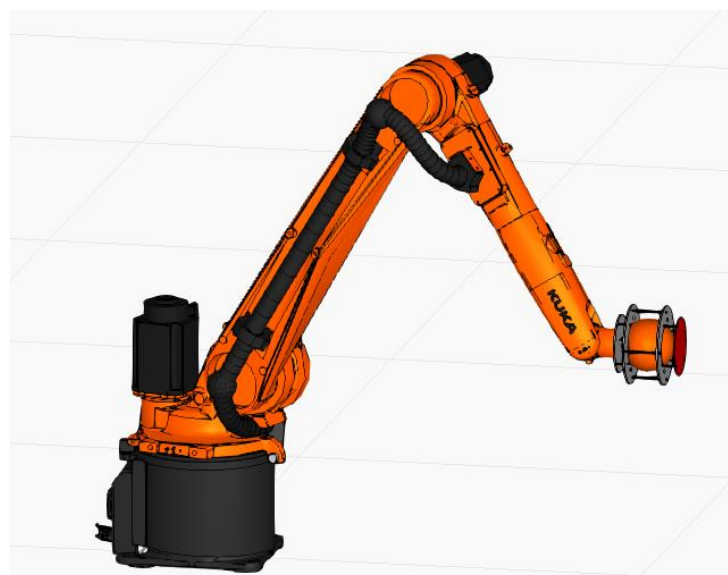


Figura 4.7: Distribución en software KukaSim.Pro del robot KR8R1620, la herramienta y el drifter.

A continuación, se comprobó cuáles eran los puntos límites en que el robot tenía dificultades para llegar. Con estas limitaciones se pudo ver que el robot trabajaba en óptimas condiciones dentro de un bloque de 500x500x500 mm, situado en frente de su base. Con estas especificaciones iniciales, se pudo trabajar en como parametrizar los dos tipos de mares con el programa OrcaFlex.

OrcaFlex es un software de la compañía Orcina. Este software permite el análisis dinámico de sistemas marinos en alta mar. A través de este software se pueden obtener infinidad de parámetros tales como posición de la boya, rotación en los tres ejes, velocidad angular, aceleración lineal y velocidad del mar. En el caso que nos concierne, los parámetros a introducir en el robot para realizar los ensayos serán las coordenadas de rotación y posición de la boya.

La tabla 4.4 muestra los parámetros introducidos en el software OrcaFlex con referencia a los dos tipos de mares. El caso Airy (No real) simboliza un mar ideal, modelando una senoide perfecta. El caso OsHu es un mar más dinámico, con más movimientos en rotación y que más se asemeja a la realidad.



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

Respecto a los parámetros de la ola, su altura se evalúa de pico a pico, mientras que el periodo usa el método de paso por cero con referencia al nivel de agua estancada (SWL). Estos dos aspectos hacen referencia a la figura 4.8.

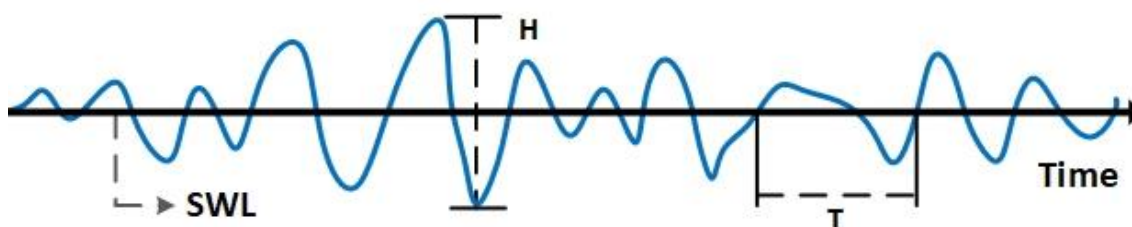


Figura 4.8: Serie temporal del desplazamiento de la superficie marina. Fuente: [6]

En relación al valor de altura y periodo de ola aproximado, se acostumbra a llamarlos altura significativa y periodo significativo. La altura de ola significativa, ( $H_3$ ) es la altura media de las terceras olas más altas del registro y el período de ola significativa ( $T_3$ ), es el período medio correspondiente de estas olas [6]. En el caso Airy estos parámetros son constantes. En cambio, para el caso OsHu la altura y el periodo de las olas no son constantes. Por este motivo se realiza la aproximación de  $H_3$  y  $T_3$  [13].

Referente a los parámetros de la boya en OrcaFlex, su peso es aproximadamente de 3.7 Kg y tiene un diámetro de 200 mm. El tiempo de simulación total es de 110 segundos con un incremento de tiempo de 100 ms. Los primeros 10 segundos son de estabilización. Para poder analizar simulaciones en brazo articulado más largas, cada una se repitió en bucle 3 veces.

Una vez fijado los parámetros del mar y del drifter, se simularon los dos ensayos en OrcaFlex, marcando como resultados los parámetros de posición X, Y y Z y de rotación Rx (A), Ry (B), Rz (C) de la boya de deriva, ya que estos datos son los que el robot necesita para generar movimientos. Estas coordenadas de posición y rotación fueron guardadas mediante un archivo slx.

Una vez obtenidos estos datos, se tuvo que eliminar la deriva en los ejes X e Y, ya que sería imposible para el robot alcanzar estos puntos, dado su alcance máximo. El objetivo es realizar una aproximación lineal ajustada en el cero para asegurarse de no disponer de una deriva crítica para el robot.

Posteriormente, se tuvieron que adaptar estos datos en lenguaje KRL, para poder ser exportados al software KukaSim.Pro y confirmar que los puntos ajustados eran válidos para el robot. Esto se hizo mediante la función concatenar de Excel. Al realizar esta adaptación se obtuvieron un fichero DAT y un fichero SRC.

Estos dos ficheros se importaron a KukaSim.Pro generando 1100 puntos PTP por cada simulación. Se crearon la base y tools correspondientes y se simularon ambos ensayos. Dado que los ficheros eran muy extensos, para facilitar su modificación en formulario online desde el robot, se realizaron 11 subprogramas con 100 puntos en cada uno. Puesto que los puntos PTP realizan los movimientos de forma más veloz, se tuvo que adaptar su velocidad y aceleración para acotar el tiempo de simulación a lo establecido.

Por lo tanto una vez finalizadas estas modificaciones y exportando los ficheros desde KukaSim.Pro, se generaron 11 subprogramas SRC con llamadas a coordenadas, 1 fichero SRC principal con llamada a los 11 subprogramas y un fichero Global DAT, esto para cada caso.

En el anexo G se muestra un pequeño manual de como reproducir estas simulaciones y se pueden ver los tres tipos de programas, en algunos casos reducidos ya son muy extensos, de la simulación OsHu. El caso Airy tendría la misma estructura con pequeñas modificaciones.

## **4.2.2 SOFTWARE WORKVISUALS Y SIMULACIÓN EN ROBOT**

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. También permite configurar buses de campo tales como PROFINET, PROFIBUS, EtherNet, etc. 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.

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

Damien Lahire

El primer paso para generar el proyecto donde cargar las simulaciones Airy y OsHu fue, recuperar el proyecto que en ese momento estaba en el sistema del robot. Esto es muy importante ya que cada robot tiene un número de serie y unos datos de carga que deben coincidir con los que se disponen en WorkVisuals.

En segundo lugar se tuvo que modificar el proyecto y eliminar todos los parámetros que no interesaban para esta aplicación. Un ejemplo de ello fueron las conexiones de bus de campo que en este caso no fueron utilizados. Posteriormente, se introdujeron los programas para poder ser simulados y observar las dinámicas del robot.

La figura 4.9 muestra el control remoto con el que se realizaron los últimos retoques a los programas.

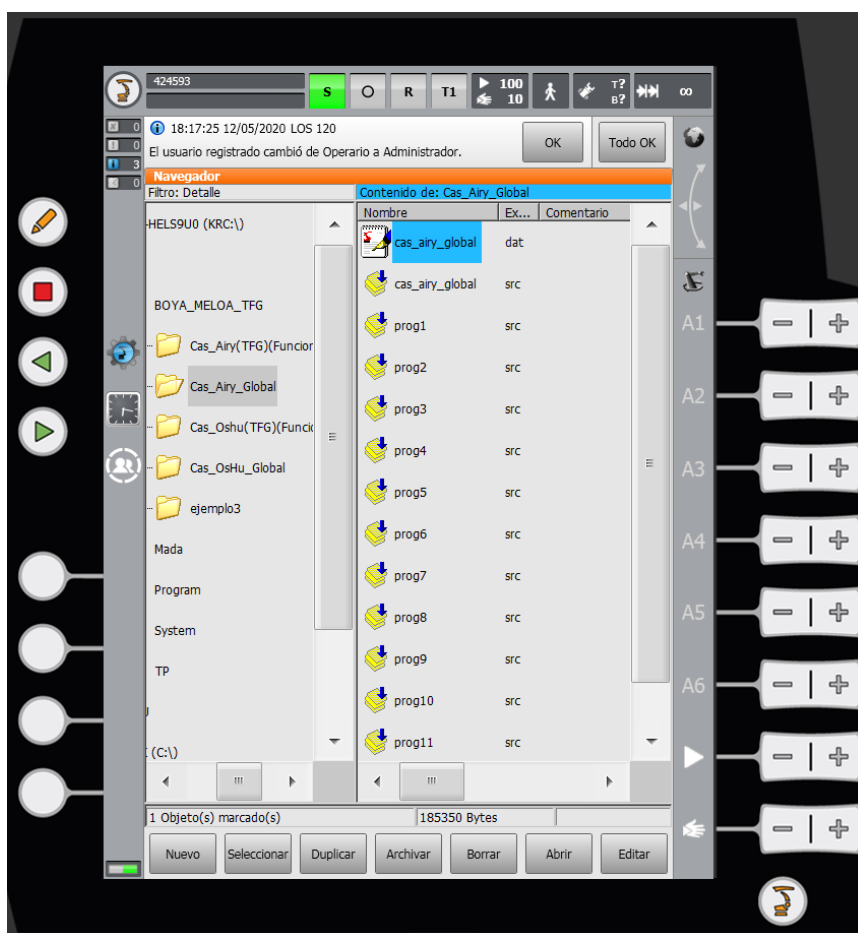


Figura 4.9: Interfaz del control remoto de la SmartPad del robot KR8R1620.

A continuación, se comprobó la dinámica del robot en ambas simulaciones para ver si generaba las trayectorias como era de esperar. Posteriormente, se dispuso a fijar la herramienta fabricada al robot, para anclar la boya de deriva y realizar las simulaciones definitivas.

### 4.2.3 METODOLOGÍA DEL ENSAYO EN BRAZO ARTICULADO

Para la realización de estos ensayos, la excitación del movimiento del KEH viene dada a consecuencia de los movimientos que ejerce el robot. El sistema de medición se alimenta nuevamente mediante una pequeña batería.

Para estas simulaciones, al igual que para los ensayos con mesa de vibración, se realizarán comparaciones entre las placas BQ25505-DL y las dos versiones de la ADP5092. Para ellos se llevaron a cabo seis simulaciones para cada caso. Las tablas 4.5 y 4.6 muestran la composición de las simulaciones Airy y OsHu respectivamente.

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

Tabla 4.5: Sumario de aspectos característicos en las simulaciones con brazo robótico del caso Airy.

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

Tabla 4.6: Sumario de aspectos característicos en las simulaciones con brazo robótico del caso OsHu.

En la figura 4.10 se puede observar el sistema KEH y a una parte del sistema de medidas anclado al robot, durante las simulaciones en las instalaciones de Kuka.

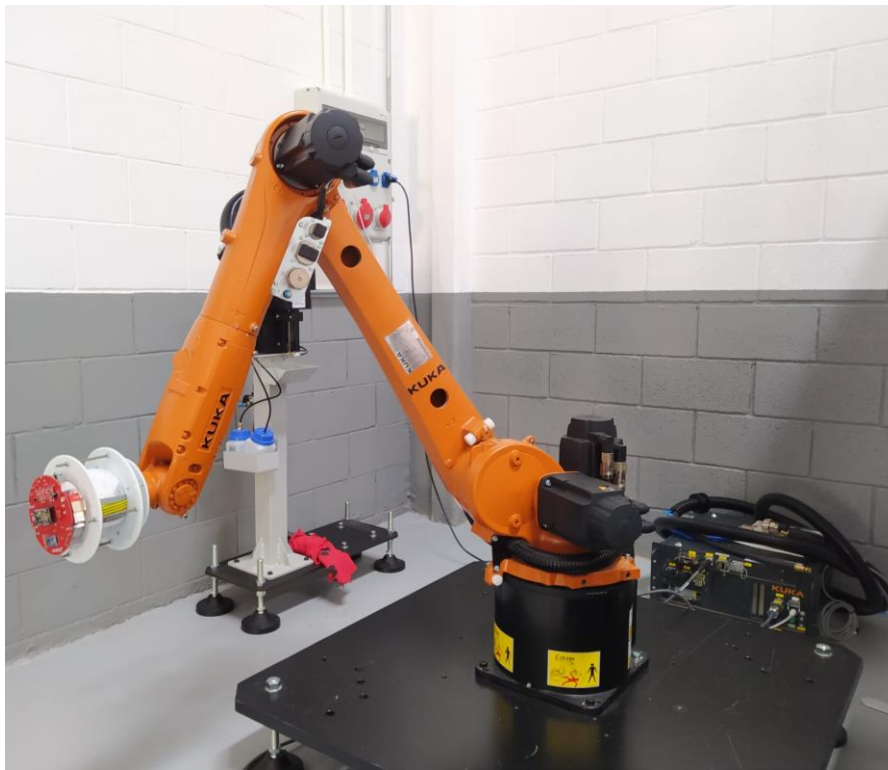


Figura 4.10: Entorno de simulación del KEH y el sistema de medición anclado al brazo robótico de Kuka. .

## 5. RESULTADOS Y COMPARATIVAS

A continuación, se presentaran los resultados obtenidos a raíz de las simulaciones con mesa de vibraciones y con brazo robótico. En cada una de ellas se realizan comparativas de datos en concreto.

### 5.1 RESULTADOS DEL TEST CON MESA DE VIBRACIÓN

En estos resultados del test con mesa de vibraciones podremos hacer una comparativa óptima entre las eficiencias de las placas BQ25505-DL y la ADP5092. Este hecho es así ya que la excitación con mesa de vibración es continua y no varía en comparación con los movimientos ejecutados por el robot, que serían simulaciones más dinámicas donde la eficiencia es más difícil de comparar.

Otro de los aspectos que se pueden observar en estos resultados es el seguimiento de tensión que ejerce el circuito MPPT en la entrada de la PMU.

La figura 5.1 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.

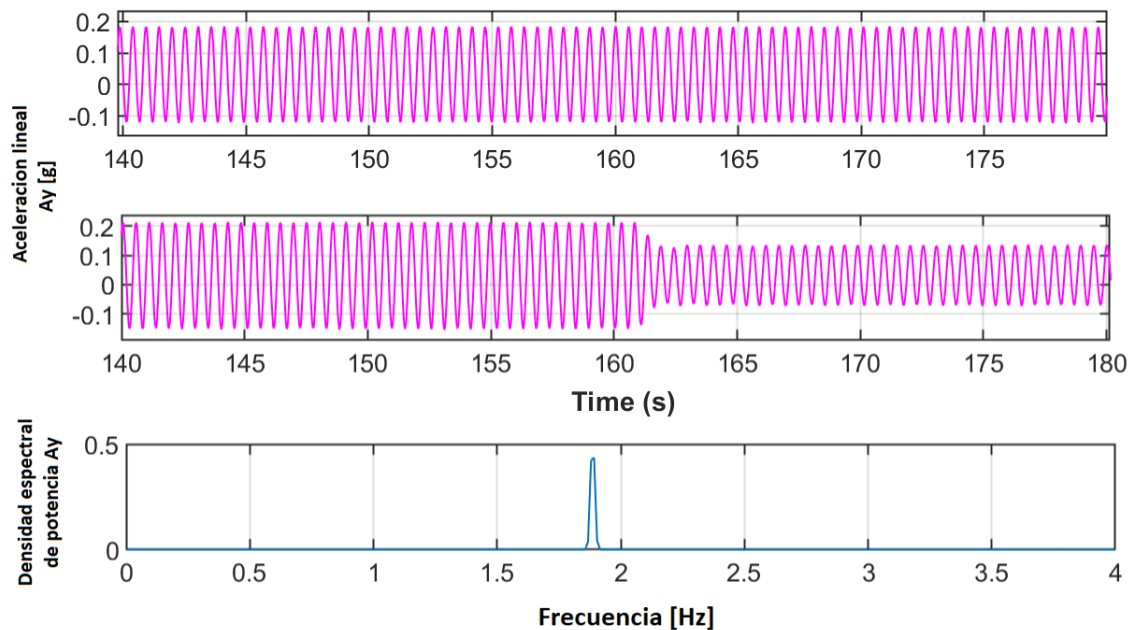


Figura 5.1: Aceleración lineal del drifter a lo largo del eje Y, y su densidad espectral de potencia.

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 siete y ocho, 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 ( $3.43 \text{ m/s}^2$  a  $2.06 \text{ m/s}^2$ ).

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

La figura 5.2 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.

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

Damien Lahire

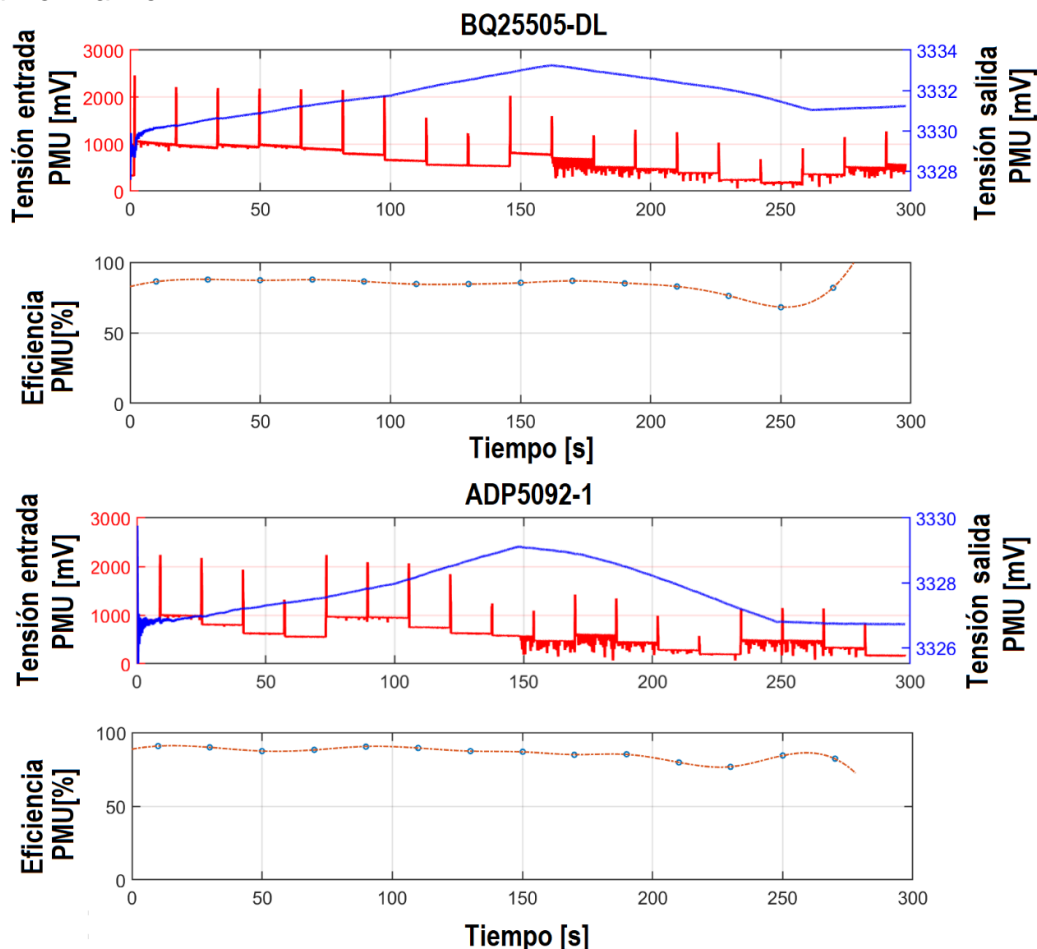


Figura 5.2: Comparativa de las tensiones de entrada y salida, y eficiencias de las placas BQ25505-DL y ADP5092-Var. .

Las tensiones de entrada medias de la BQ25505-DL y ADP5092-Var, para el nivel alto de Ay, es de aproximadamente 810 mV. Tras rebajar el valor de la amplitud de Ay, esta tensión baja hasta los 415 mV aproximadamente. No obstante, en la tensión de entrada se aprecia una cierta oscilación entre un valor mínimo y máximo, por lo que no es constante. Esto es así ya que la tensión de salida del microgenerador, tiene una forma de onda oscilante. Por lo tanto, el valor de la tensión de entrada de las PMU dependerá del momento en que se realice el MPPT. De ahí que la tensión de entrada tenga unas pequeñas variaciones entre simulaciones. También se puede observar el muestreo del MPP realizado cada 16 segundos.

De la tensión de salida, que a su vez es la carga que tiene la batería, se puede apreciar que tiene un pequeño incremento de tensión, por lo que la batería se va cargando. Al llegar al escalón aplicado en la aceleración lineal Ay, se produce un cambio de tendencia y la batería empieza a descargarse ligeramente. Esto se da a consecuencia de que el KEH no está logrando mantener un nivel de tensión de entrada mínimo para la carga de la batería. Entre tanto la batería también experimenta descarga debido a su descarga interna. Hay que destacar que, tanto la carga como la descarga a la cual está sometida la batería son de unos pocos mV.

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.

Este efecto de escalón se ha inspeccionado tanto en la aceleración lineal, la tensión de entrada y salida y la eficiencia en las placas. También se aprecia de una forma óptima en las potencias de entrada y salida de las PMU. En la figura 5.3 se grafican estas potencias. En este caso se ha procesado la simulación 8, donde se utiliza la placa BQ25505-DL. Los valores de potencia de entrada y salida antes del escalón son de 3.27 mW y 2.82 mW respectivamente. Una vez llegado al escalón, la potencia de entrada y salida cae hasta 0.81 mW y 0.65 mW respectivamente.

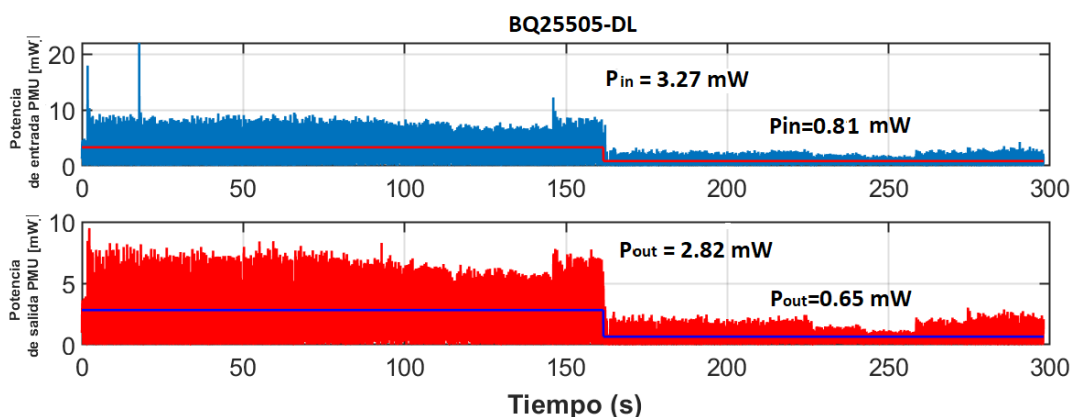


Figura 5.3: Graficas de potencia de entrada y salida de la BQ25505-DL para la simulación ocho.

Al calcular la eficiencia en los diferentes tramos de simulación, antes del escalón resulta en un 86.24% de eficiencia. En cambio, después del escalón baja hasta un 80.25%.

Para finalizar el análisis de eficiencia energética, la figura 5.4 muestra los valores de las eficiencias teóricas para tensiones de entrada constantes 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.



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

Damien Lahire

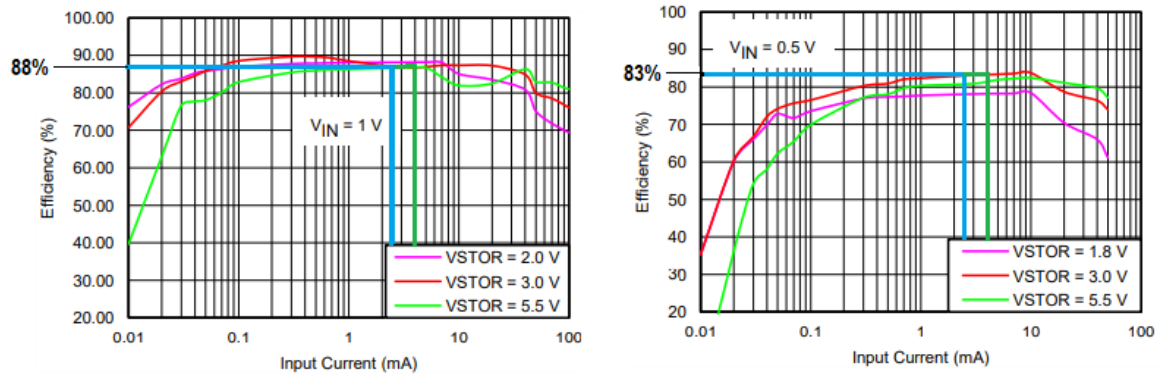


Figura 5.4: Extracción de los valores de eficiencia teóricas, fijando 1V y 0.5V a la entrada. Fuente: Manual BQ25505 (modificado adecuadamente por el autor)

Para comparar la eficiencia experimental de las dos simulaciones en estos dos casos, se debe utilizar la siguiente ecuación de interpolación lineal.

$$y = \frac{x - x_1}{x_2 - x_1} (y_2 - y_1) + y_1$$

Siendo X el voltaje de entrada e Y la eficiencia energética.

Por lo tanto estas eficiencias teóricas, utilizando la anterior formula resultarían en lo siguiente:

- Simulación 1 ( $I_{IN} = 4.06 \text{ mA}$  ;  $V_{IN} = 725.7 \text{ mV}$ ) :

$$y = \frac{(0.7257 - 0.5)}{(1 - 0.5)} (88 - 83) + 83 = 85.3 \%$$

- Simulación 2 ( $I_{IN} = 2.5 \text{ mA}$  ;  $V_{IN} = 662.6 \text{ mV}$ ) :

$$y = \frac{(0.6626 - 0.5)}{(1 - 0.5)} (88 - 83) + 83 = 84.6\%$$

A modo de resultados finales y una vista más genérica de los datos, en la siguiente tabla 5.1 se puede observar los valores medios de las tensiones, corrientes y potencias de entrada y salida, y la eficiencia de las PMU en las ocho simulaciones con mesa de vibraciones.

Simulación	Placa	Diodo (D <sub>1</sub> )	V <sub>IN</sub> (mV)	I <sub>IN</sub> (mA)	I <sub>OUT</sub> (mA)	P <sub>IN</sub> (mW)	P <sub>OUT</sub> (mW)	Eficiencia (%)
1	BQ	Si	725.7	2.5	0.44	1.66	1.44	86.75
2	BQ	No	662.6	4.06	0.62	2.46	2.09	85
3	ADP-Var	Si	731.9	2.46	0.47	1.74	1.54	88.5
4	ADP-Fijo	Si	416.1	4.19	0.43	1.67	1.4	83.4
5	ADP-Var	No	674.5	4.17	0.70	2.65	2.31	87.2
6	ADP-Fijo	No	421	5.83	0.59	2.36	1.95	83
7	ADP-Var	No	580	3.31	0.54	2.06	1.81	87.86
8	BQ	No	629.6	3.34	0.55	2.15	1.84	85.6

Tabla 5.1: Resultados obtenidos del análisis experimental con mesa de vibraciones. En esta se muestra una comparativa entre las placas BQ25505-DL y ADP5092.

De la anterior tabla podemos extraer dos graficas de interés, que se muestran en la figura 5.5, que relacionan las simulaciones realizadas mediante las placas BQ25505-DL, ADP5092-Variable y ADP5092-Fijo, con el uso del diodo colocado entre el KEH y las PMU. En estas graficas se muestran tanto las eficiencias energéticas (Izquierda), como las potencias de salida (Derecha) en las PMU, extraídas de las seis primeras simulaciones.

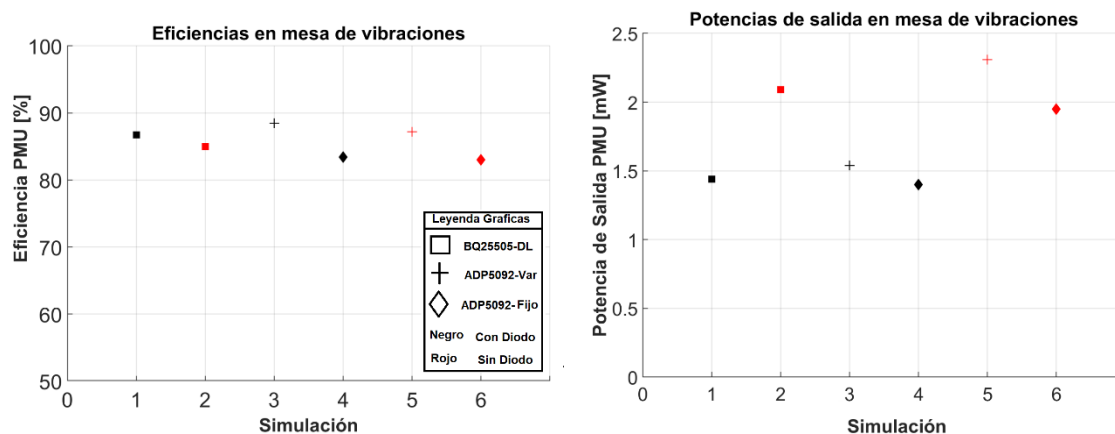


Figura 5.5: Diagrama de dispersión donde se puede observar la media de las tensiones de salida y eficiencias en las PMU, para las seis primeras simulaciones en mesa de vibración.

## 5.2 RESULTADOS DEL TEST CON BRAZO ROBOTICO

Tras analizar las simulaciones del caso Airy y OsHu en el brazo robótico, 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.

## 5.2.1 RESULTADOS CASO AIRY

La figura 5.6 muestra las tensiones de entradas para tres de las simulaciones realizadas del caso Airy.

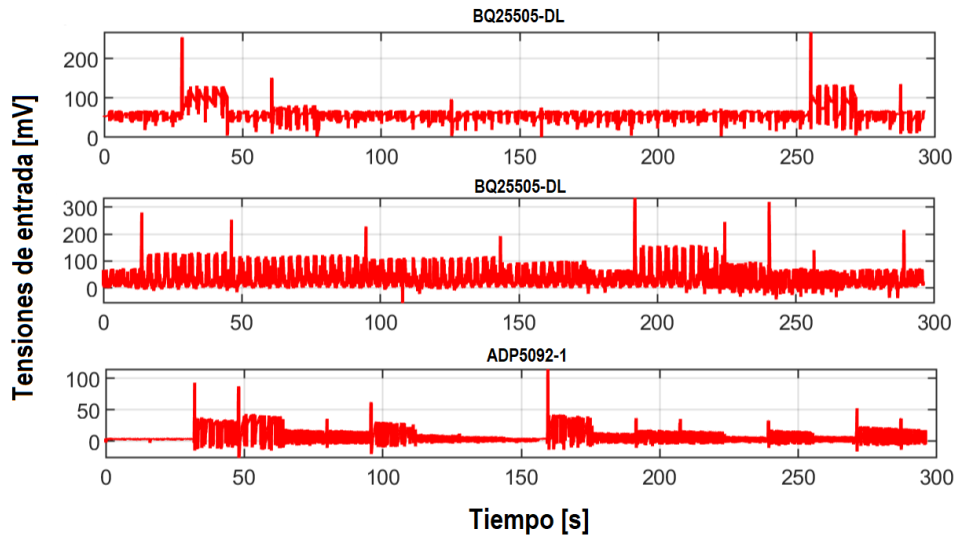


Figura 5.6: Tensiones de entrada para las placas BQ25505-DL y ADP5092-Var, para el caso Airy.

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 CS. 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 (Gx y Gy) de la figura 5.7, 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  $\pm 200^\circ/s$ .

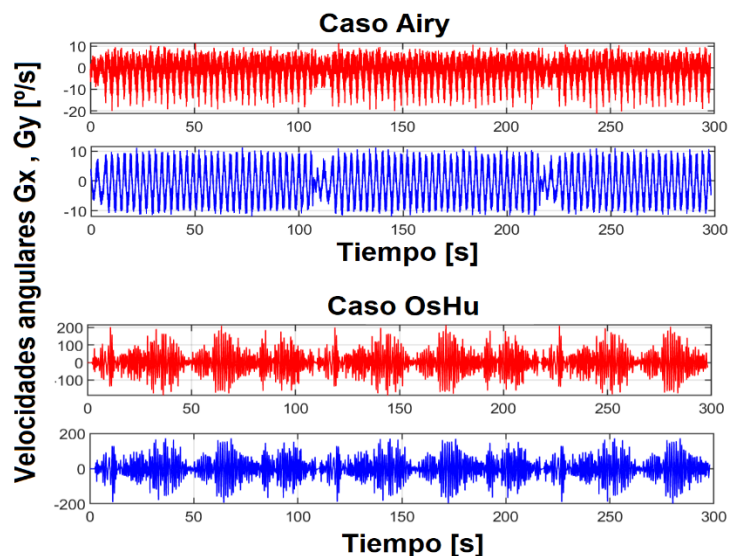


Figura 5.7: Comparativa de las velocidades angulares entre los casos Airy y OsHu.

Esto nos indica que para el caso OsHu, si tenemos movimientos más bruscos con rotaciones que permiten el movimiento del péndulo, generando así energía en el KEH. En contra para el caso Airy, estos valores pico a pico en las velocidades angulares hacen que el KEH no genere prácticamente energía, como se puede ver en las gráficas de la figura 5.6.

En el caso del IMU, no se consiguió colocarlo alineado en ejes y totalmente recto, por lo que los datos proporcionados por este sensor no son del todo válidos. Los valores en amplitud no se ajustan en cero como debería ser, y su espectro en frecuencia se ve alterado por dicho problema.

No obstante, mediante los datos de aceleración lineal y velocidad angular podemos deducir la frecuencia natural del movimiento vertical del drifter y algunos de sus armónicos, y la frecuencia del movimiento de la ola parametrizada en OrcaFlex.

En la figura 5.8 se observan las gráficas correspondientes a la PSD aplicada a las aceleraciones lineales. En ellas podemos observar la frecuencia natural ( $f_n$ ) que se encuentra en 1Hz. También se puede observar la frecuencia del movimiento vertical de la ola ( $f_{ola}$ ) en torno a los 0.34 Hz. Transformando esta magnitud en periodo resulta en un valor aproximado de 3 s.

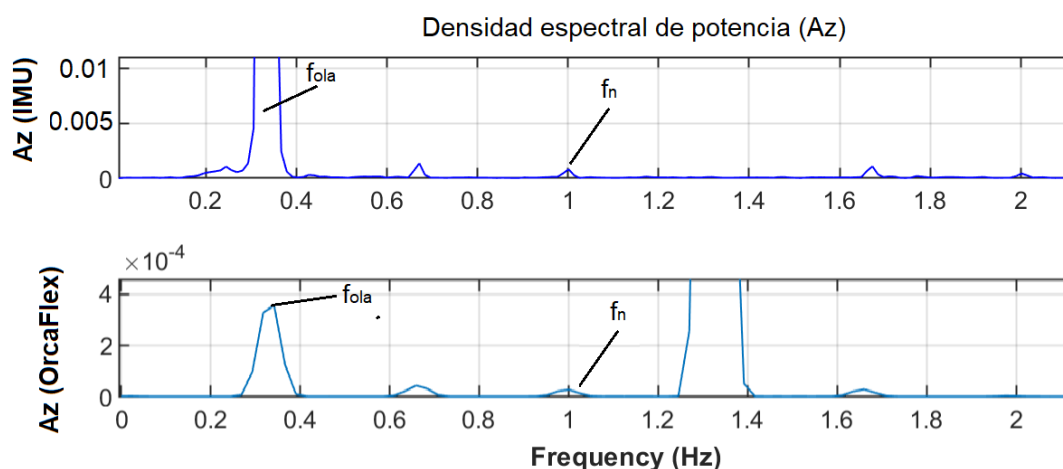


Figura 5.8: Demostración mediante PSD de la aceleración angular en el eje Z, de la frecuencia natural del drifter y la frecuencia de la ola para el caso Airy.

Otro aspecto a tener en cuenta sobre este análisis de la dinámica del drifter es que, el robot no es capaz de reproducir correctamente las características en alta frecuencia, dado que se mueve punto a punto, sin un patrón fijo de movimiento. Las velocidades angulares y aceleraciones lineales entre los puntos de ejecución del robot no pueden ser impuestas por el usuario, sino que la propia dinámica del robot será quien determine estos parámetros. Este es otro hecho que dificulta este análisis dinámico. No obstante, con una mejor colocación del IMU, se deberían aproximar más los datos proporcionados por este sensor y los datos proporcionados por el software OrcaFlex.

## 5.2.2 RESULTADOS CASO OsHu

Al igual que pasa en el caso Airy, para estas simulaciones, el IMU se colocó de forma incorrecta no logrando alinear los ejes. No obstante, se puede observar en la figura 5.9 que los valores pico a pico de las aceleraciones lineales y velocidades angulares en su FFT si coinciden. Estos valores pico a pico se encuentran en  $\pm 0.6 \text{ g}$  y  $\pm 200 \text{ }^\circ/\text{s}$  respectivamente.

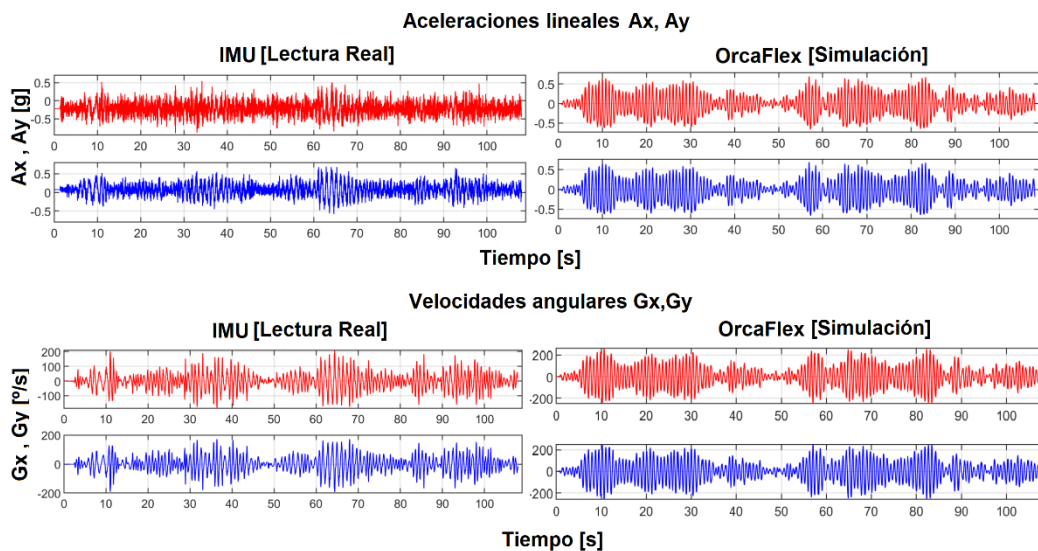


Figura 5.9: Comparativa de las amplitudes de las aceleraciones lineales y velocidades angulares en los ejes X e Y, generadas a partir del IMU y OrcaFlex.

Se puede observar en la gráfica 5.10 el espectro de la densidad de potencia en las aceleraciones lineales Ax Ay, donde la frecuencia de la vibración horizontal en este plano XY se encuentra desfasada debido a la mala colocación del IMU.

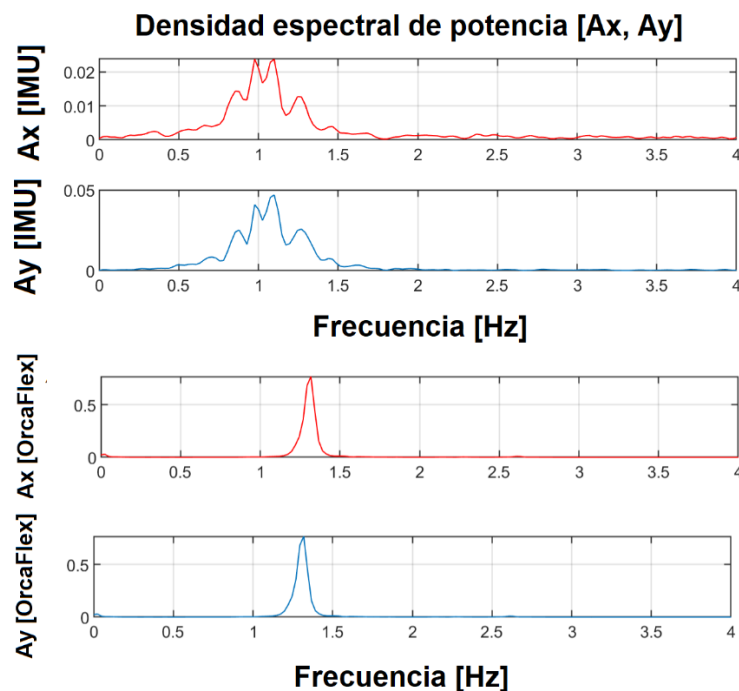


Figura 5.10: Comparativa de las PSD de las aceleraciones lineales Ax y Ay, medida desde el IMU y OrcaFlex.

Por lo tanto, el primer aspecto característico en los resultados del caso OsHu, se puede observar en las entradas de las PMU. La figura 5.11 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.

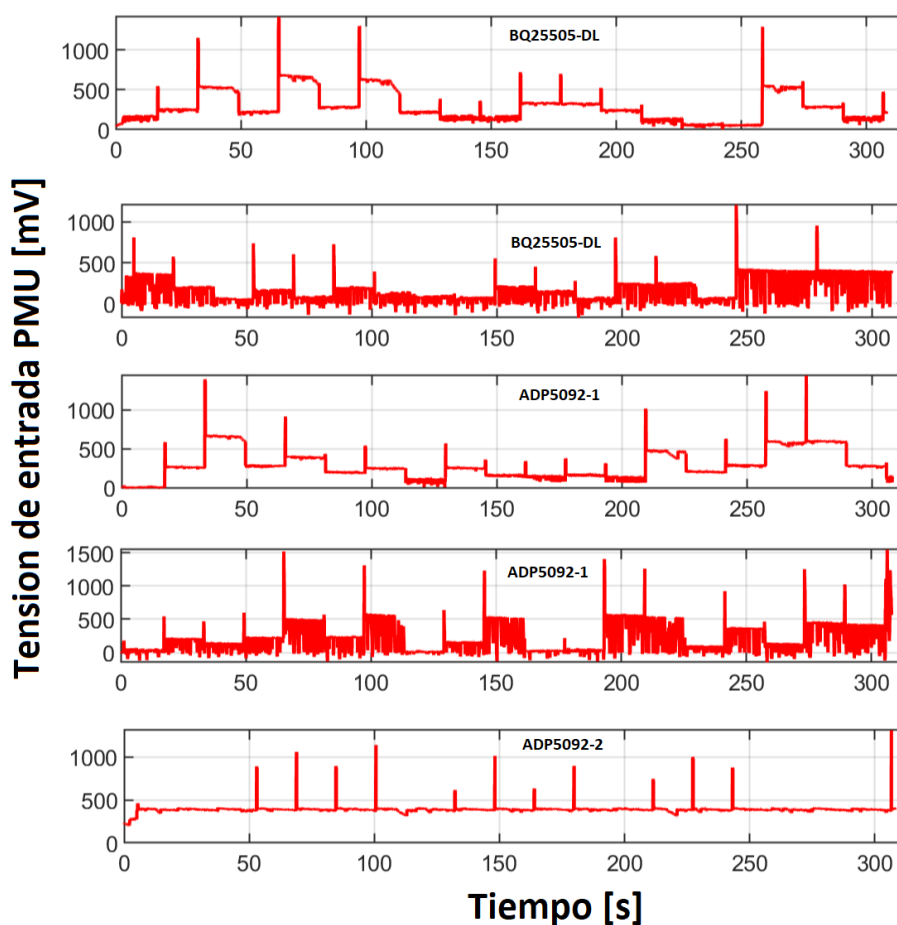


Figura 5.11: Comparativa de las tensiones de entrada de las placas BQ25505-DL y ADP5092.

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, descargando los condensadores  $C_1$  y  $C_6$ , que seguiría el modelo de una bobina.

De este modo la energía que vuelve a la supuesta bobina se estaría perdiendo en forma de calor, siguiendo los principios del efecto Joule, donde la energía desprendida sería igual al diferencial de potencial a la que está sometido el conductor, multiplicado por la corriente que lo atraviesa. La entrada, en estos instantes de tensión nula, estaría trabajando como motor.

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.

En la siguiente figura 5.12, 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.

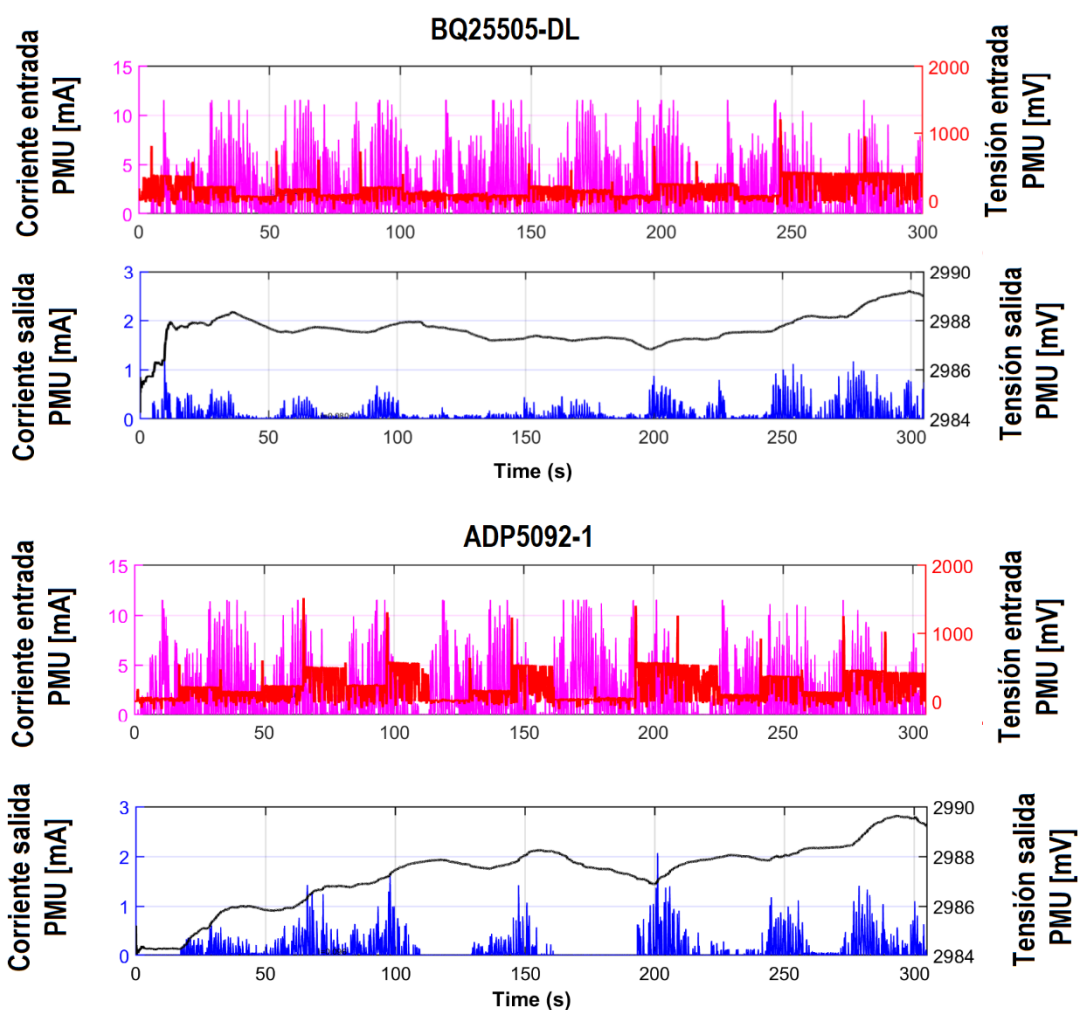


Figura 5.12: Graficas de las tensiones y corrientes de entrada y salida de las placas BQ25505 y ADP5092-Var.

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-Var, 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 5.13 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. Conforme la tensión de entrada incrementa, la eficiencia de la placa también se ve aumentada.

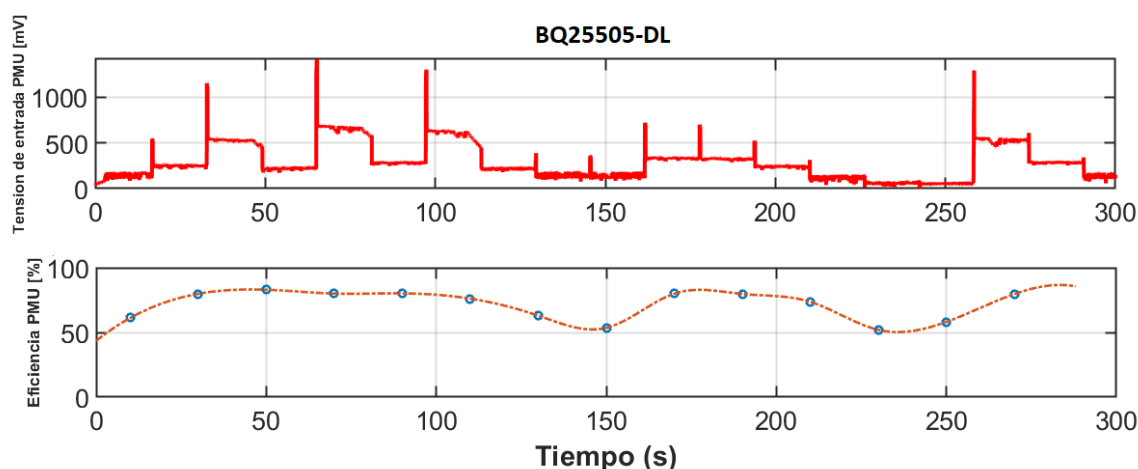


Figura 5.13: Graficas de tensión de entrada y eficiencia.

En la siguiente tabla 5.2 se pueden observar los valores medios de las tensiones, corrientes y potencias de entrada y salida, y la eficiencia de las PMU del caso OsHu, para poder tener una visión más amplia de todas las simulaciones en conjunto.

Simulación	Placa	Diodo ( $D_1$ )	$V_{in}$ (mV)	$I_{in}$ (mA)	$I_{out}$ (mA)	$P_{in}$ (mW)	$P_{out}$ (mW)	Eficiencia
1	BQ	Si	276.6	1.141	0.060	0.241	0.181	73.85%
2	BQ	No	147	2.044	0.080	0.346	0.240	69.35%
3	ADP-Var	Si	313.1	1.010	0.066	0.249	0.198	79.5%
4	ADP-Var	No	200	1.846	0.096	0.368	0.286	77.7%
5	ADP-Fijo	No	285	1.290	0.146	0.509	0.439	86.25%
6	ADP-Fijo	Si	390	0.682	0.078	0.269	0.234	87%

Tabla 5.2: Resultados obtenidos del análisis experimental con brazo robótico. En esta se muestra una comparativa entre las placas BQ25505-DL y ADP5092.



Para finalizar con los resultados, al igual que en los test en mesa de vibraciones, la figura 5.14 muestra la incidencia de los diferentes modelos de PMU y de la repercusión a la hora de implementar el diodo D1, con referencia a las eficiencias energéticas y potencias de salidas de estas PMU, para todas las simulaciones realizadas en este caso.

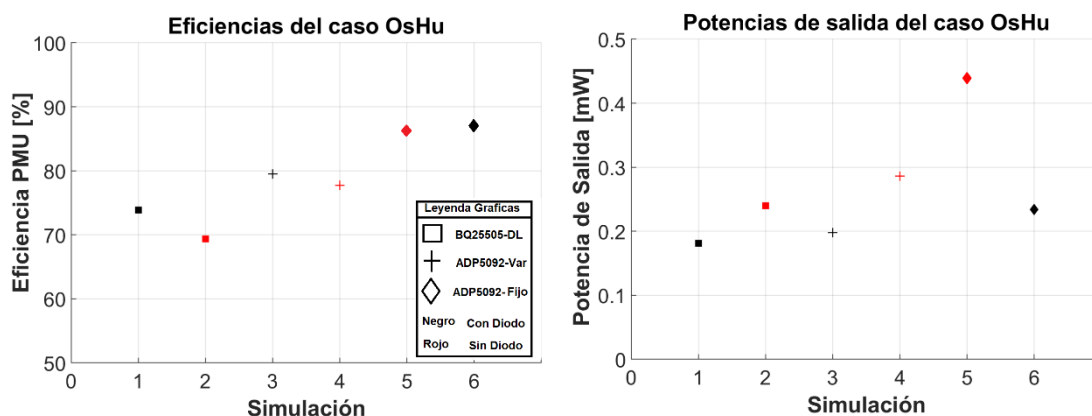


Figura 5.14: Diagrama de dispersión donde se puede observar la media de las tensiones de salida y eficiencias en las PMU, para las simulaciones del caso OsHu.

### 5.3. 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>

## 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.

Gracias al equipo de investigación SARTI se ha podido realizar una comparativa de la BQ25505-DL con dos de las placas que ellos utilizan para el proyecto Meloá.

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-Var 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.

Hay que 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 observando las tablas 5.1 y 5.2. 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.

Para finalizar me hubiese gustado el poder probar la BQ25505-DL en un captador de energía, realizando las pruebas en alta mar. No obstante, esto hubiese sido una ampliación del proyecto ya que no se planteó desde un principio esta posibilidad.

## 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. En especial a Jordi Carafi, el coordinador del departamento de Sales Support de esta empresa.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] M. T. Penella and M. Gasulla, "A Review of Commercial Energy Harvesters for Autonomous Sensors," 2007.
- [2] F. K. Shaikh and S. Zeadally, "Energy harvesting in wireless sensor networks: A comprehensive review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 55, pp. 1041–1054, 2016, doi: 10.1016/j.rser.2015.11.010.
- [3] L. D. a Thorner, P. D. Mitcheson, a S. Holmes, and E. M. Yeatman, "Scaling laws for energy harvesters in a marine environment," *PowerMEMS*, pp. 249–252, 2009.
- [4] M. Carandell, D. M. Toma, M. Gasulla, and J. del Río, "Experimental Validation of a Kinetic Energy Harvester Device for Oceanic Drifter Applications," 2019.
- [5] "About MELOA." <https://www.ec-meloa.eu/pages/the-project> (accessed Apr. 23, 2020).
- [6] 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.
- [7] "Power Management ICs (PMICs)." <https://www.maximintegrated.com/en/products/power/power-management-ics.html> (accessed Apr. 24, 2020).
- [8] J. Kokert, T. Beckedahl, and L. M. Reindl, "Medlay: A reconfigurable micro-power management to investigate self-powered systems," *Sensors (Switzerland)*, vol. 18, no. 1, 2018, doi: 10.3390/s18010259.

- [9] D. Choudhary, "Incremental Conductance MPPT Algorithm for PV System Implemented Using DC-DC Buck and Boost Converter," *Int. J. Eng. Res. Appl.*, vol. 4, no. 8, pp. 123–132, 2014.
- [10] M. Carandell, D. M. Toma, M. Gasulla, and J. del Río, "Evaluation of two MPPT techniques in Low-Power Pendulum-Type Wave Energy Converters," *9th Int. Work. Mar. Technol. - Vigo*, p. Submitted, 2020.
- [11] "RoHS | Bienes de Consumo y Venta Minorista | SGS España." <https://www.sgs.es/es-es/consumer-goods-retail/electrical-and-electronics/audio-video-and-household-appliances/rohs> (accessed May 08, 2020).
- [12] "EasyEDA – Simulador de circuitos y diseño de circuitos impresos online." <https://easyeda.com/> (accessed Apr. 23, 2020).
- [13] M. Carandell, D. M. Toma, J. . Pinto, M. Gasulla, and J. del Río, "Impact on the Wave Parameters Estimation of a Kinetic Energy Harvester Embedded into a Drifter\_v3," UPC, 2020.

## LIBROS DE TEXTO:

Alireka Khaligh, Omer C. Onar. Energy Harvesting: Solar, Wind, and Ocean Energy Conversion Systems. Boca Raton, Florida: CRC Press, 2010. ISBN 9781439815083

## MANUALES DE DISPOSITIVOS Y EQUIPOS:

Texas Instruments, Manual de usuario del componente BQ25505, 2020. Disponible en: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/bq25505.pdf> (PDF BQ25505-Users Guide)

Texas Instruments, Manual de usuario del componente BQ25505, 2020. Disponible en: <http://www.ti.com/lit/ug/slueaa8a/slueaa8a.pdf> (PDF BQ25505EVM-218-Users Guide)

KUKA Roboter GmbH, Ficha técnica del robot kuka KR8R1620, 2020. Disponible en: [https://www.kuka.com/-/media/kuka/downloads/imported/6b77eecacfe542d3b736af377562ecaa/0000255785\\_en.pdf?rev=bffeed2bc6d24cb5bb079022c48e167c&hash=D77A4D84C45E54488D2295A155BE50F1](https://www.kuka.com/-/media/kuka/downloads/imported/6b77eecacfe542d3b736af377562ecaa/0000255785_en.pdf?rev=bffeed2bc6d24cb5bb079022c48e167c&hash=D77A4D84C45E54488D2295A155BE50F1)

*\*La bibliografía se presenta de forma numerada conforme se fueron realizando las citas. En ella se dispone de tesis doctorales, trabajos de fin de grado, páginas web, artículos científicos y datasheets de dispositivos electrónicos.*

# ANEXOS

### A. ESQUEMÁTICO COMPLETO DEL BQ25505EVM-218

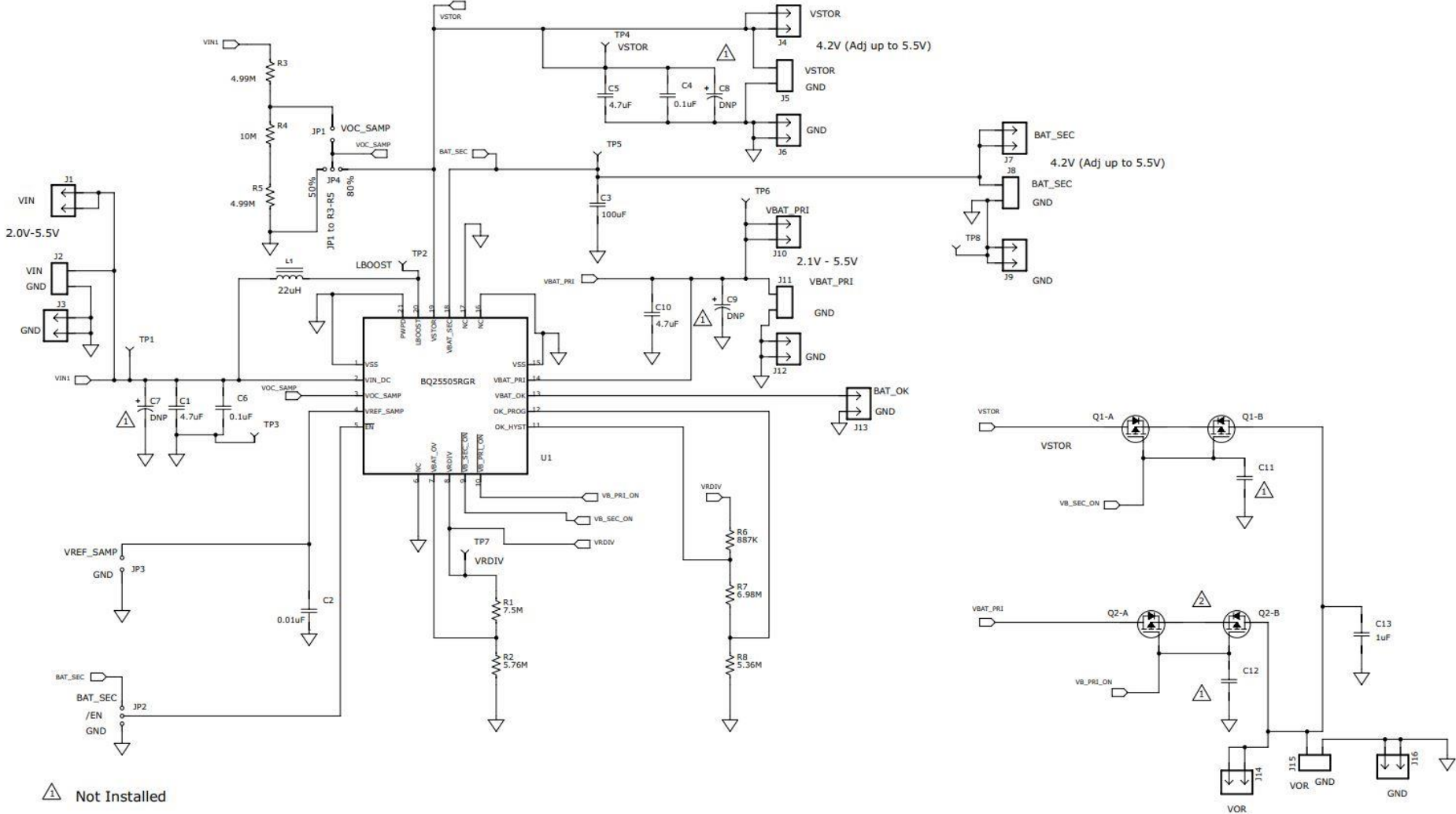


Figura ANEXO A.1: Esquemático de la placa de evaluación BQ25505EVM-218

## B. GUÍA DE USO DE EASYEDA

### B.1 FUNCIONALIDADES INTERNAS DE EASYEDA PARA LA CREACIÓN DE NUEVAS PCB

A continuación se enumeraran y comentaran cuales han sido las principales funcionalidades del software de diseño 3D EasyEDA, para la creación desde cero de la PCB.

Una vez iniciada sesión en la página web EasyEDA y creado un proyecto, en la figura ANEXO B.1 se puede visualizar el aspecto de su interfaz de diseño referente a la creación del esquemático.

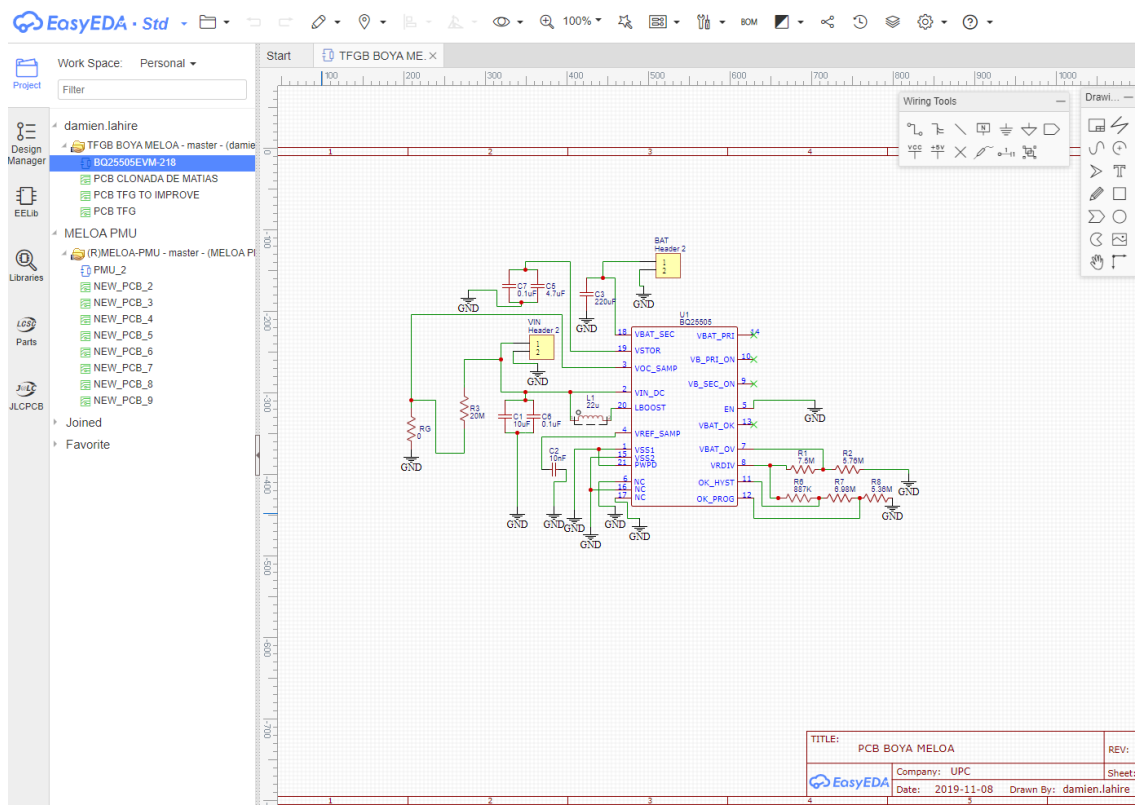


Figura ANEXO B.1: Interfaz de diseño 3D del programa EasyEDA . Fuente: EasyEDA

En la parte izquierda de la figura ANEXO B.2 se pueden observar seis iconos diferentes. A continuación se expone una breve explicación sobre sus funcionalidades.

- **Project:** Sirve para gestionar todos los proyectos públicos que dispongas. Tanto esquemáticos como PCB se muestran en esta pestaña.

- **Design Manager:** Muestra una lista de los componentes y las redes eléctricas que se encuentran en el esquemático seleccionado.
- **EELib y Libraries:** EELib desempeña la función de librería interna, usando componentes básicos como ahora bien resistencias, diodos, condensadores, etc. Libraries permite buscar componentes de librerías externas a la web. Esta función es muy útil para encontrar componentes que aparecen en el listado de materiales detallado del dispositivo (BOM) del manual de usuario de la BQ25505 aportado por el fabricante.

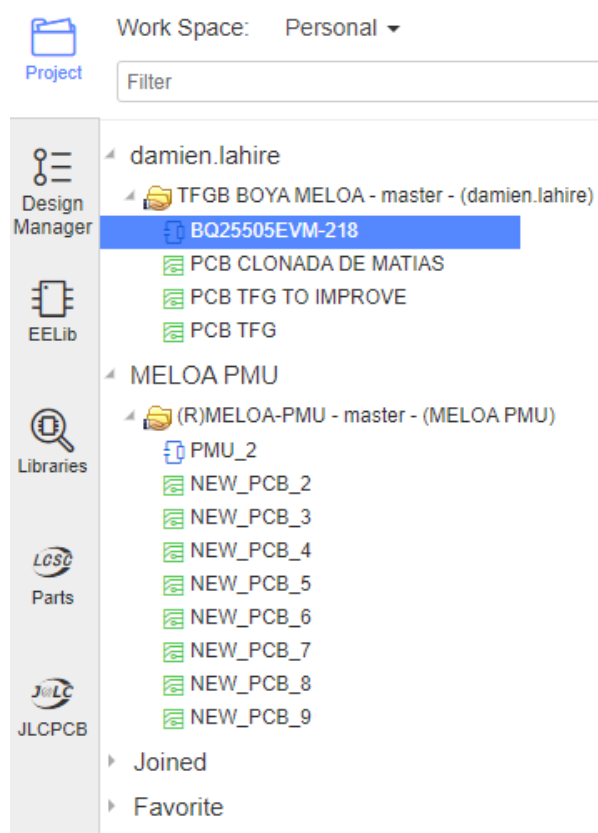


Figura ANEXO B.2: Funcionalidades de la página EasyEDA. Fuente: EasyEDA.

- **Parts:** Redirección hacia una web para la compra de componentes una vez finalizado el diseño de la PCB.
- **JLCPCB:** Proveedor oficial de fabricación de PCB en EasyEDA.

La figura ANEXO B.3 muestra diferentes opciones dentro de la interfaz de programación de EasyEDA. Estas herramientas te permiten unir componentes, dotar de una huella determinada, exportar la lista de materiales completa, etc.



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

Damien Lahire

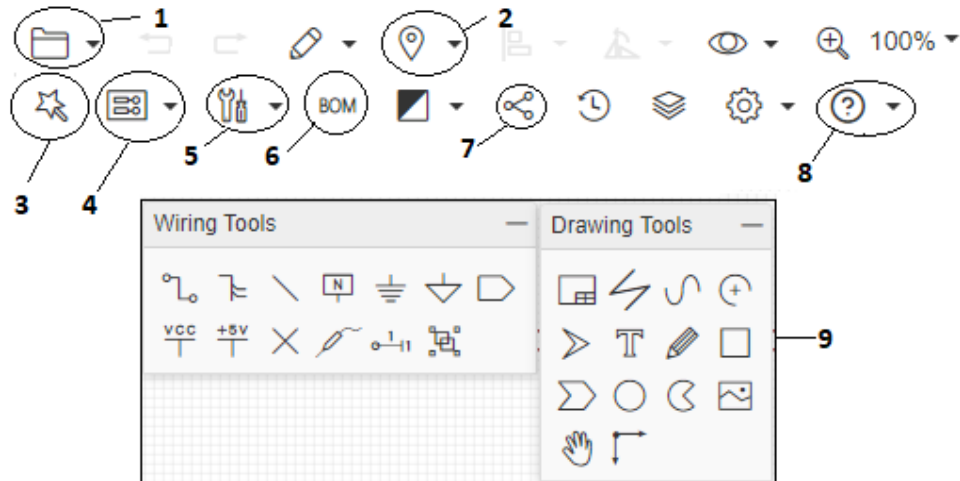


Figura ANEXO B.3: Atributos del software EasyEDA para el diseño 3D de esquemas eléctricos y PCB. .

Estas características son las siguientes:

- 1. **Documentos.** Permite crear, cargar y guardar esquemáticos y PCB. Otra característica es que se puede exportar el BOM, generar el esquemático en formato PDF y guardar el circuito en formato Altium.
- 2. **Colocar.** Realiza la función de la pestaña 'Libraries' mediante el botón 'Components'. También dispone de las mismas funcionalidades que se exponen en las herramientas de cableado y dibujo.
- 3. **Asistente de biblioteca esquemática.** Proporciona una forma rápida y fácil de crear un símbolo esquemático general para la biblioteca de componentes.
- 4. **Convertir.** Una vez creado tu esquemático, esta herramienta genera la interfaz para crear la PCB. En el caso que hubiese algún cambio en el esquemático, también se podría actualizar esta PCB en la que se está trabajando.
- 5. **Herramientas.** Su función principal es dotar al componente de una huella específica. Esto será de gran importancia, ya que en la PCB se representarían los componentes con estas características que el usuario impone.
- 6. **Exportar BOM.** Esta herramienta permite visualizar todos los datos de interés respecto a los componentes (Valor, Nombre, Huella, Cantidad de componentes, fabricante, número de serie, proveedor, precio). Permite la posibilidad de generar el listado de materiales en formato Excel.

- 7. **Compartir.** Puedes compartir el proyecto con diversos compañeros, profesores o equipos de investigación si estuviesen involucrados en el diseño de la PCB.
- 8. **Ayuda.** Esta pestaña dispone de preguntas básicas sobre el programa EasyEDA, tutoriales sobre su funcionamiento, fóruns y gestiona los recursos de fabricación de PCB a través de la web JLCPCB.
- 9. **Herramientas de cableado y dibujo.** Dispone de todo lo necesario para cablear el circuito, incorporar puntos de masa, símbolos que indican la no conexión de ciertos pines de la placa, nodos en los que testear la tensión, terminales de alimentación y posibles herramientas para dibujar componentes o introducir texto.

Estas herramientas son utilizadas para la creación del esquemático. Posteriormente a esto, se debe parametrizar la PCB y dotarla de pistas para la propagación de la corriente, redes de masa, etc. La figura ANEXO B.4 muestra las funciones más usadas a la hora de diseñar la PCB.

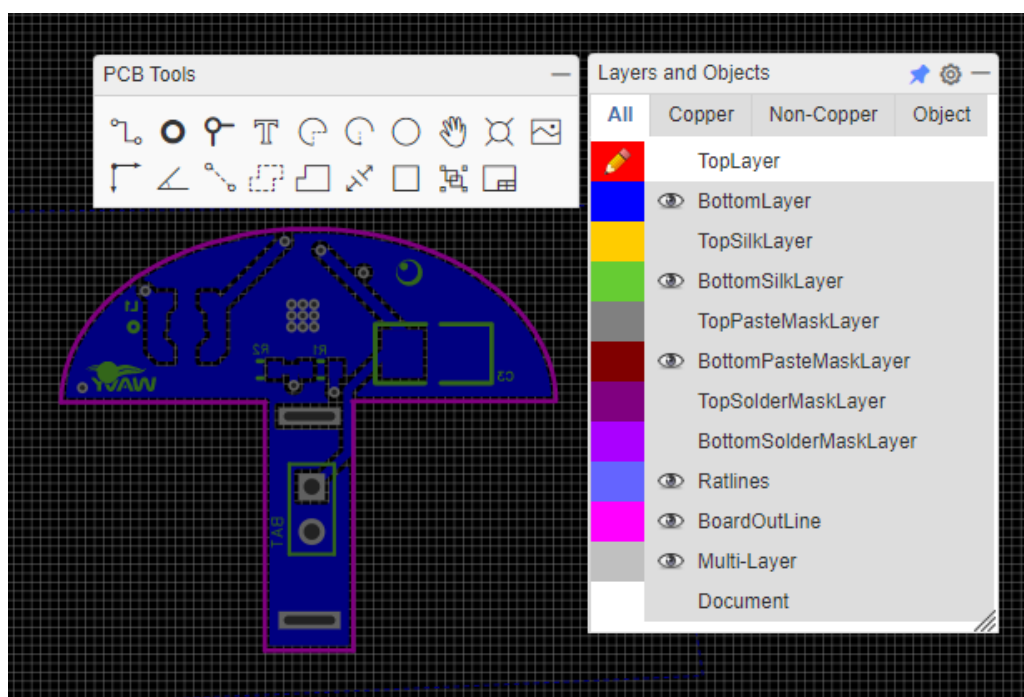


Figura ANEXO B.4: Interfaz de diseño de la PCB, y sus funcionalidades. Fuente: EasyEDA

La herramienta PCB tools, permite la unión mediante pistas de los componentes, generar puntos de testeo mediante la función PAD, crear planos compartidos con la función Choper Area e incorporar imágenes para su posterior impresión en la PCB.

Layers and Objects es un desplegable para poder visualizar ciertos atributos de las dos caras de la PCB por separado. Las funciones descritas con el nombre Top y Bottom, corresponden a la parte superior e inferior de la PCB, respectivamente.

Estas funciones correspondientes a Layers and Objects son las siguientes.

- Top/Bottom Layer visualiza todas las uniones entre componentes ya sea mediante pistas o mediante áreas definidas.
- Top/Bottom Skill Layer permite observar los contornos de los componentes que se deben soldar, alrededor de la pista de cada uno de ellos.
- Top/Bottom Paste Mask Layer muestra la huella que deja nuestro componente para ser soldado en la placa de pruebas.
- Top/Bottom Solder Mask Layer marca el contorno alrededor de la huella de cada componente.
- Ratlines desempeña la función de unir cada componente mediante una línea para conocer el conexionado con otros elementos.
- Board Out Line delimita la región de la PCB. Si dejásemos algún componente fuera de esta área, el fabricante no lo incluiría dentro de la placa.
- Multi-Layer muestra los terminales y agujeros que dispongamos en nuestra PCB, tales como GND y alimentación. También aparecerían los agujeros para conectar componentes que estén en caras opuestas de la PCB.
- Document refleja un contorno aproximado del componente, plasmado entre las pistas de soldadura de estos componentes.

Situando el lápiz que se muestra en la figura ANEXO B.4, podemos potenciar los efectos de cada una de estas funciones si lo requiriese el usuario.

Para finalizar este apartado de características, EasyEDA dispone de una pestaña que hace referencia a visualizar la PCB en 3D para poder ver su aspecto real y como quedaría una vez fabricada.

## **B.2 PASOS SEGUIDOS HASTA LA FABRICACIÓN DE LA PCB**

A la hora de diseñar el CI, se debe realizar en dos etapas diferenciadas. En primer lugar se debe modelar el esquema eléctrico. En segundo lugar se realizara el diseño de la propia PCB.

Referente al esquemático, estos fueron los pasos seguidos:

1. Creación del proyecto y esquemático
2. A continuación se dispone de una cuadrícula en blanco. En este paso se incorporaron resistencias, condensadores, terminales de entrada, salida y masa (VIN, GND y BAT) y finalmente el dispositivo BQ25505. La gran mayoría de componentes fueron encontrados en las librerías que proporciona el software, incluso el CI, que se pudo obtener y aprovechar de otro usuario de EasyEDA. Conforme se fueron introduciendo los componentes no encontrados en la librería, se modificó el nombre y valor de estos.

En el datasheet del BQ25505 podemos encontrar el nombre de cada componente para buscarlo en las librerías. No obstante algunos componentes fueron suplidos por algunos de valor superior, ya que en el centro tecnológico disponíamos de estos valores y pudieron ser aprovechados. El fabricante de la placa de pruebas permite valores como mínimo el referenciado en el datasheet, nunca inferiores ya que variaría el comportamiento del circuito.

3. Una vez incorporados todos los dispositivos, la siguiente fase constaba en modificar las huellas de los componentes. Estas huellas también se encuentran en el datasheet del BQ25505. En algunos de estos componentes la huella esta cambiada. Ahora bien la función sigue siendo la misma a pesar de modificar este parámetro.
4. En este cuarto punto se realizó el cableado de todos los componentes respetando el esquemático optimizado que se muestra en el anexo C.

5. Para finalizar el esquemático, se comprobó las características que muestra la figura ANEXO B.5. Estos aspectos del componente son su nombre, valor, huella, proveedor, nombre que proporciona el proveedor, fabricante y nombre proporcionado por el fabricante. En el caso de los componentes no encontrados en las librerías, se debió buscar en páginas webs de fabricantes electrónicos como ahora bien Murata, Mouser, Farnell para poder encontrar estas características e introducirlas manualmente en EasyEDA.

Selected Objects 1		Custom Attributes	
Part Attributes		Package	1210
Name	220uF	Package Disp...	No
Display Name	Yes	Supplier	LCSC
Prefix	C3	Supplier Part	C88154
Prefix Display	Yes	Manufacturer	MuRata
Convert to PCB	Yes	Manufacturer ...	GRM32ER
Add into BOM	Yes	<a href="#">Add Parameter</a>	
Locked	No	<a href="#">View Datasheet</a>	
<a href="#">Edit Symbol...</a>			
<a href="#">Report Error...</a>			

Figura ANEXO B.5: Características parametrizables de los componentes en la fase de diseño del esquemático. En este caso se muestran los parámetros del condensador que gestiona la batería. .

En cuanto al diseño de la PCB estos fueron los pasos seguidos:

1. En primer lugar se dispone de todos los componentes desordenados y una superficie que debe ser dimensionada tal y como se desee. La primera tarea fue colocar los componentes dentro de la zona de trabajo, una vez dimensionada, en ambas caras de la PCB. En la figura ANEXO B.6 podemos observar la disposición inicial de la interfaz.

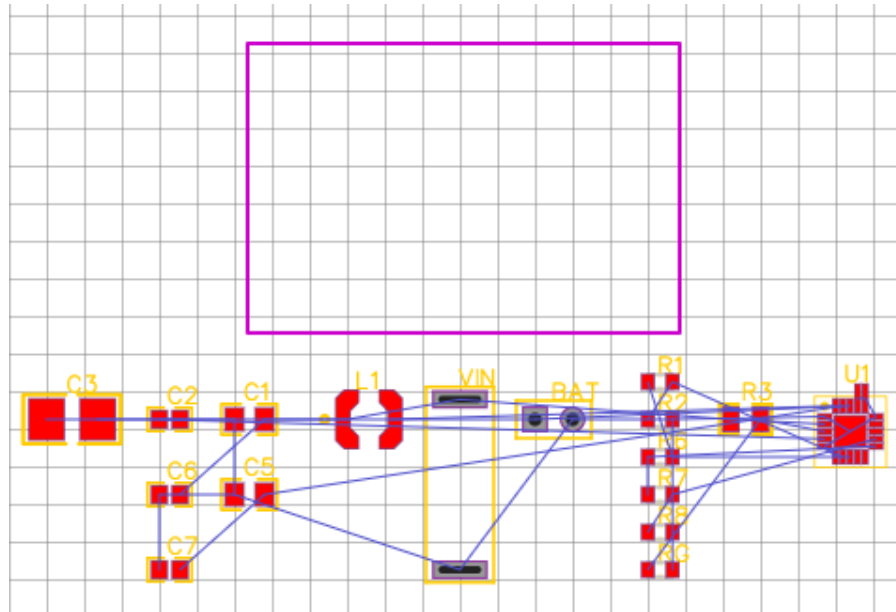


Figura ANEXO B.6: Interfaz de diseño 3D referente a la PCB.

Los componentes se colocaron de forma que facilitase su posterior conexión. La BQ25505 fue posicionada en medio por este mismo hecho. El único cambio generado en las pistas de los componentes fue en las patas del BQ25505. Fueron alargadas para poder estañar de una forma más adecuada una vez fabricada la PCB.

2. Tras incluir todos los componentes en la región lila, disponemos de dos formas de unir los componentes. En primer lugar tendríamos la posibilidad de realizarlo mediante pistas simples, uniendo componente terminal por terminal. En segundo lugar disponemos de regiones que posibilitan la unión de componentes que compartan las mismas pistas. En la figura ANEXO B.7 se puede observar estas dos posibilidades.

Podemos apreciar que según las necesidades del circuito, podemos optar por la opción más favorable en cada caso. En esta ocasión tenemos una sección para las conexiones U1\_2 y otra para GND. En cambio para las demás conexiones se utilizan pistas simples.

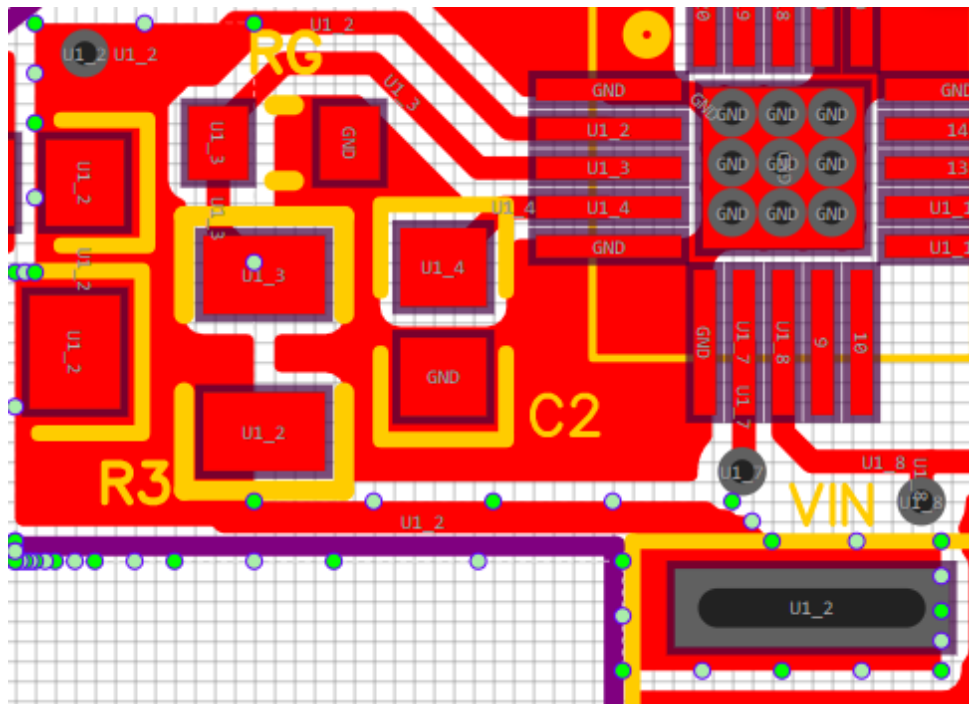


Figura ANEXO B.7: Vista ampliada de la placa. En ella se observan componentes, pistas, áreas compartidas y agujeros de conexiones. .

En los casos que se tuviese que unir componentes de caras opuestas de la PCB, aprovechando la figura ANEXO B.7, se disponen de agujeros para realizar estas acciones. Se aprecia en al figura como las conexiones U1\_2, U1\_7, U1\_8 y GND, realizan un cambio de cara mediante estos agujeros.

3. Tras supervisar y revisar que la placa tuviese todas sus conexiones correctamente unidas, se ordenó la fabricación de un número de placas para comprobar su correcta funcionalidad. La fabricación de estas placas se realizaron mediante el proveedor oficial de EasyEDA, JLCPCB. A su vez los componentes fueron tramitados en diferentes páginas webs tales como Mouser, Farnell y Murata.

### c. ESQUEMÁTICO OPTIMIZADO DEL BQ25505EVM-218, GENERADO DESDE EASYEDA

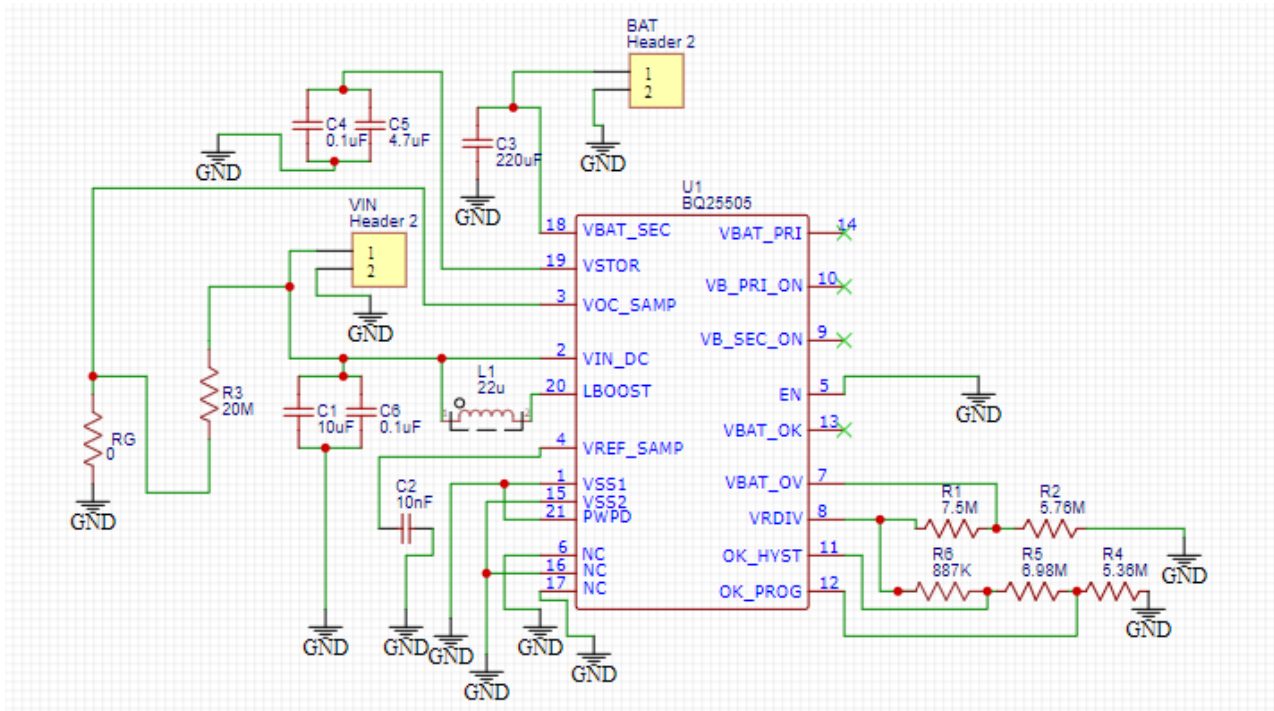


Figura ANEXO C.1: Esquemático optimizado de la placa de evaluación BQ25505-EVM218. Fuente: EasyEDA



## D. CARAS DE LA PCB UNA VEZ FINALIZADAS EN EL PROGRAMA EASYEDA

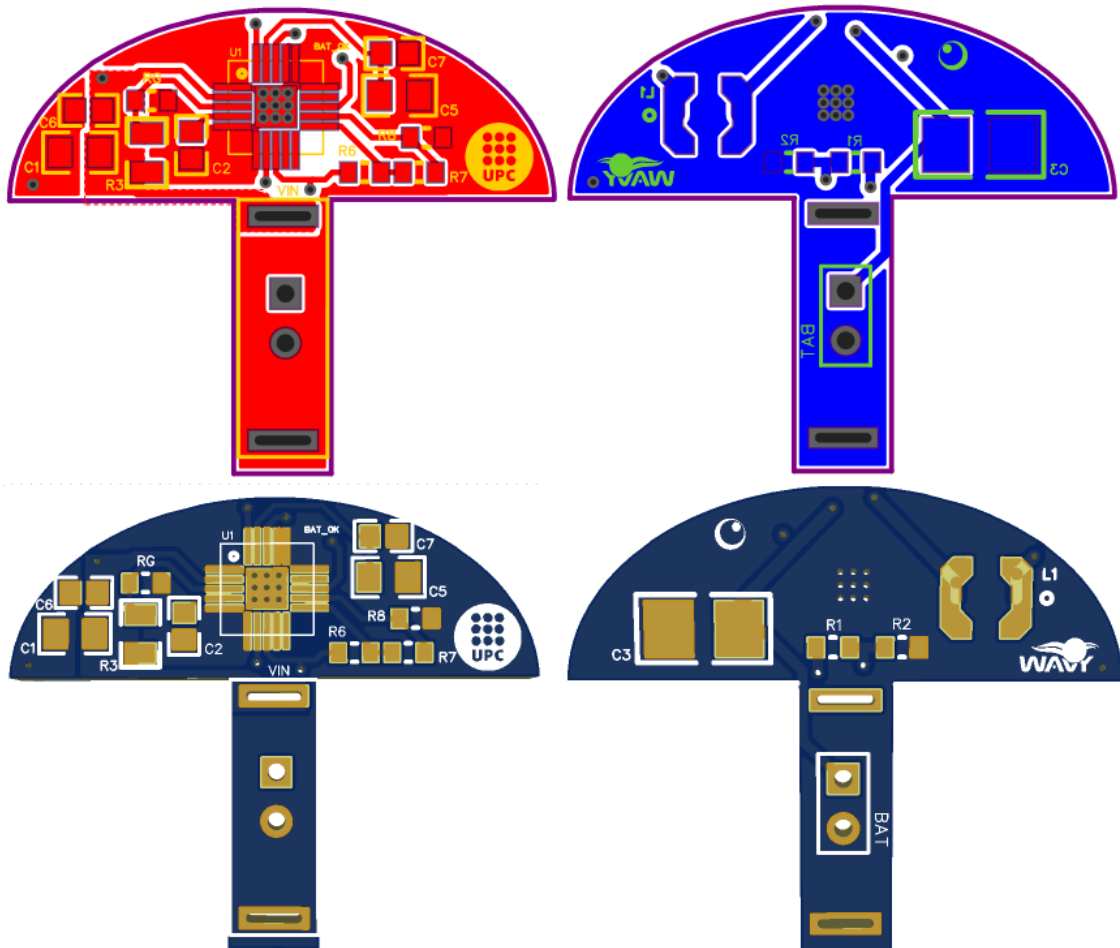


Figura ANEXO D.1: En la parte superior aparecen las vistas desde EasyEDA de las dos caras de la PCB. En la parte inferior se visualiza el aspecto real de la placa también desde EasyEDA.

### E. PLANOS 2D DE DIFERENTES VISTAS DE LA HERRAMIENTA

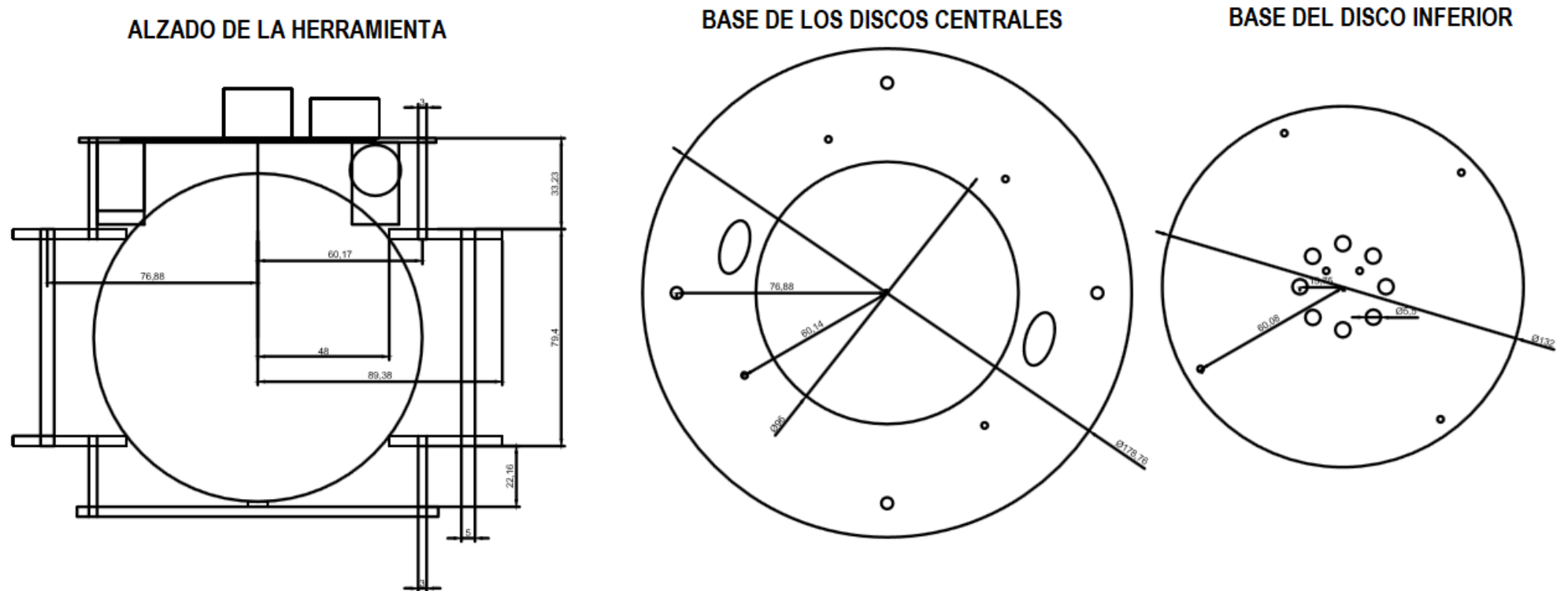


Figura ANEXO.E1: Planos 2D de la herramienta que acopla el KEH con la mesa de vibraciones y el robot articulado

## F. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS ROBOT KR8R1620

Este anexo pretende explicar las especificaciones generales del robot KR8R1620. La dificultad de encontrar un robot cedido más grande, hizo que tuviéramos que utilizar este robot que a priori no es de los robots con mayor alcance que dispone Kuka en todo su porfolio.

Las siglas del robot tienen un significado en concreto; En primer lugar disponemos del número 8, este corresponde al peso nominal que soporta el robot en el eje 6. La figura ANEXO F.1 muestra la correspondencia de ejes en los robots Kuka.



Figura ANEXO F.1: Manipulador robótico. Fuente: Libro programación 1 Kuka

Podemos observar cómo sería el movimiento de cada eje por separado, para hacernos una idea de su funcionamiento. En segundo lugar tendríamos el número 1620. Este nos proporciona la información del alcance máximo en mm del robot. En la figura ANEXO F.2 se puede apreciar cómo se gestiona este alcance. Otra cosa a tener en cuenta es que el robot dispone de ángulos muertos en que no es posible que llegue, por eso es muy importante en ciertas aplicaciones, la orientación de la base del robot.

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

Damien Lahire

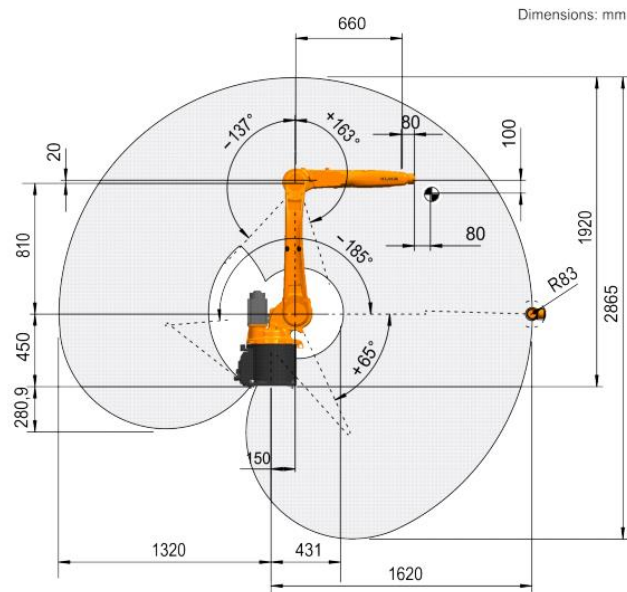


Figura ANEXO F.2: Espacio de trabajo del robot KR8R1620. Fuente: Ficha técnica KR8R1620

En la ficha técnica del robot, que se mostrara más abajo, también se pueden observar las siguientes características:

- Datos técnicos del robot (Alcances, carga útil, repetitividad, numero de ejes, posición de montaje, huella y peso aproximado)
- Datos por ejes (Rango de movilidad y velocidades por eje)
- Condiciones de operación (Rango de temperaturas)
- Grado de protección del robot
- Tipos de controladoras que lo soportan
- Espacio de trabajo
- Diagrama de cargas útiles ( Peso que soporta el eje 6 respecto el centro de masas de la herramienta)
- Representación en 2D de la brida del robot ( eje 6 )

Estas dos últimas características serán muy importantes para el diseño de la herramienta. El diagrama de cargas útiles nos permite saber el máximo desplazamiento que puede tener el centro de masas de la herramienta respecto el centro de la brida del robot. Este parámetro esta relaciona también con la masa del conjunto de la herramienta. Cuanto más pesada sea la herramienta, menor posibilidad hay de desplazar el centro de masas.

Este estudio debe ser exhaustivo y cuidadoso ya que si sobrepasásemos los límites tanto en peso, como del centro de masas, el robot podría estar sobrecargado dinámicamente o estáticamente. Si fuese el caso podría acabar dañándose o generar movimientos no deseados en las simulaciones.

Por otro lado, la representación 2D de la brida del robot permite conocer como es por dentro esta brida y poder diseñar un plato de adaptación para la herramienta que debe acoplar la boya con el robot.

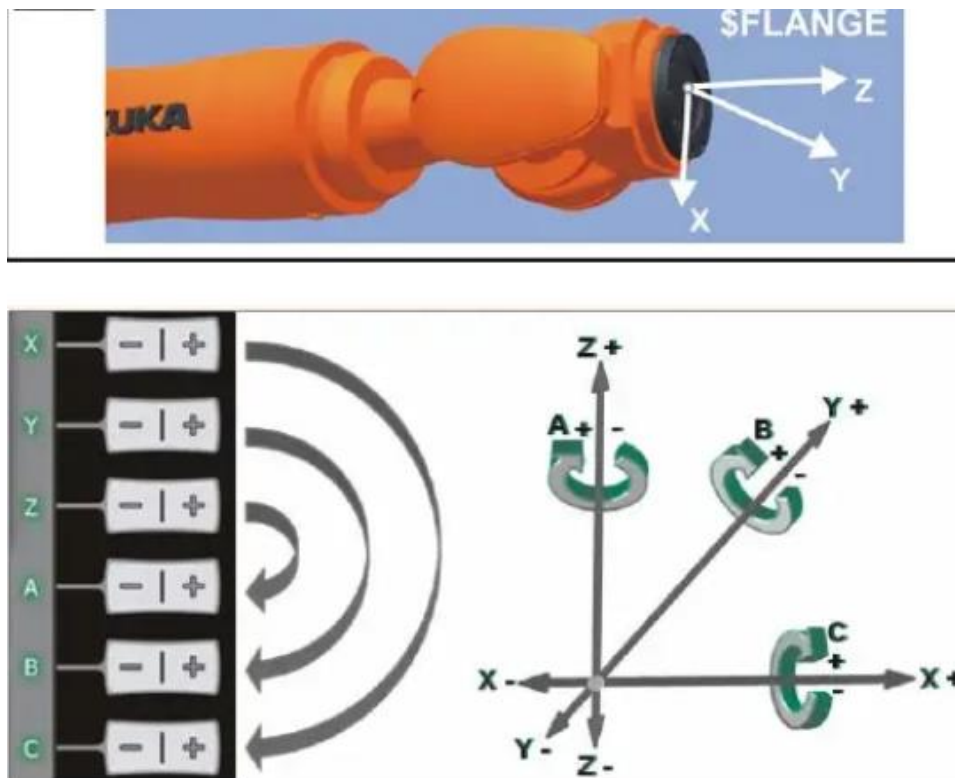


Figura ANEXO F.3: Sistema de coordenadas cartesiano del robot Kuka. Fuente: Libro programación 1 Kuka

La figura ANEXO F.3 muestra el sistema de coordenadas del robot respecto a la brida del robot. Esta es la disposición predeterminada del robot. No obstante el sistema de coordenadas puede variar y ser modulado según las necesidades del usuario del robot.



## KR 8 R1620



### Technical data

Maximum reach	1620 mm
Maximum payload	-
Rated payload	8 kg
Rated supplementary load, rotating column / link arm / arm	0 kg / 0 kg / 10 kg
Pose repeatability (ISO 9283)	± 0.04 mm
Number of axes	6
Mounting position	Floor; Ceiling; Wall; Desired angle
Footprint	333.5 mm x 307 mm
Weight	approx. 165 kg

### Axis data

Motion range	
A1	±170 °
A2	-185 ° / 85 °
A3	-137 ° / 163 °
A4	±185 °
A5	±120 °
A6	±350 °
Speed with rated payload	
A1	220 °/s
A2	210 °/s
A3	270 °/s
A4	381 °/s
A5	311 °/s
A6	492 °/s

### Operating conditions

Ambient temperature during operation	5 °C to 45 °C (278 K to 318 K)
--------------------------------------	--------------------------------

### Protection rating

Protection rating (IEC 60529)	IP54
Protection rating, in-line wrist (IEC 60529)	IP54

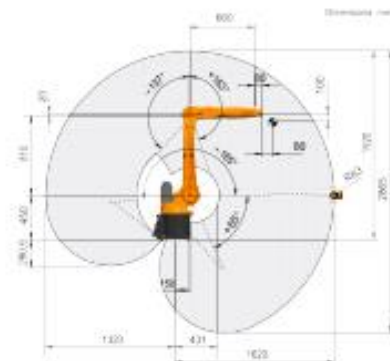
### Controller

Controller	KR C4 smallsize-2; KR C4 compact
------------	-------------------------------------

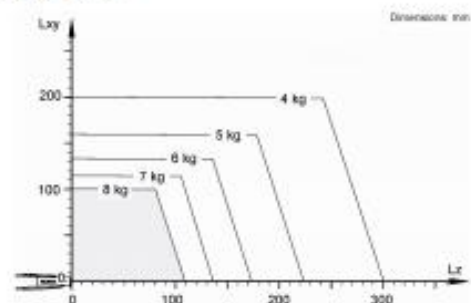
### Teach pendant

Teach pendant	KUKA smartPAD
---------------	---------------

### Workspace graphic

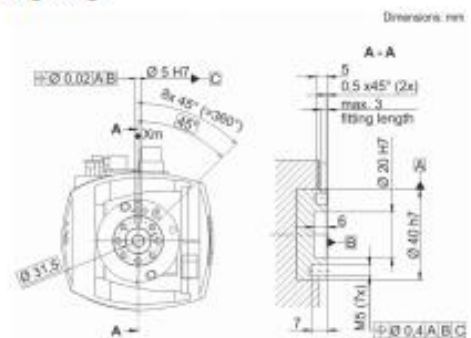


### Payload diagram



The KR 8 R1620 is designed for a rated payload of 8 kg in order to optimize the dynamic performance of the robot. With reduced load center distances, higher loads up to the maximum payload may be used. The specific load case must be verified using KUKA Load. For further consultation, please contact KUKA Support.

### Mounting flange



Details provided about the properties and usability of the products are purely for information purposes and do not constitute a guarantee of these characteristics. The extent of goods delivered and services performed is determined by the subject matter of the specific contract. No liability accepted for errors or omissions.  
0000-255-785 / V21.1 / 03.12.2019 / en  
KUKA Deutschland GmbH Zugsplätzstrasse 140, 86169 Augsburg, Germany. Tel.: +49 821 797-4000, www.kuka-robotics.com

## G. MANUAL DE EJECUCION DEL ROBOT Y PROGRAMACIÓN DE CASO OSHU

Este manual es de uso exclusivo por si algún alumno de años posteriores, necesitara la utilización de la programación de robots KUKA para su proyecto final de carrera. En este manual no se darán detalles de cómo se hizo, sino, de cómo poner en práctica los programas creados en un robot KUKA. Este manual será del tipo instrucciones básicas. La aplicación de este manual debería ser siempre bajo la inspección de un experto en la materia de robótica en Kuka Iberia.

Instrucciones:

1. Si se dispone del mismo robot que se utilizó en este TFG, cargar directamente el proyecto '*BOYA\_MELOA\_TFG.wvs*' de WorkVisuals en el robot KR8R1620 (debe tener el mismo número de serie). Esta tarea se realiza desde el PC conectando el robot en cuestión con WorkVisuals 5.0 mediante su IP. El robot debe permanecer encendido para poder comunicar con el PC.
2. En caso contrario, crear un proyecto en WorkVisuals para el nuevo robot que se utilizara y cargar únicamente los programas contenidos en la carpeta '*Cas\_Oshu\_Global*'. Esta tarea se realiza desde el PC conectando el robot en cuestión con WorkVisuals mediante su IP.
3. Una vez generado el proyecto de WorkVisuals, comprobar que los programas no tienen ningún error de sintaxis. Si esto es así, cargar el proyecto de WorkVisuals hacia el robot Kuka.
4. Comprobar si se ha instalado de forma correcta el proyecto y si aparecen los programas del caso OsHu en los directorios del robot. Para que el robot se mueva se deben realizar acciones que desde Kuka se os facilitaran.
5. Una vez el robot permita su movimiento, el fichero que hay que seleccionar es el siguiente: *Cas\_OsHu\_Global.src*. Este fichero es el que contiene las llamadas a las funciones secundarias. Ejecutar el fichero para comenzar la simulación.

Con este manual se pretende ayudar a futuros alumnos para la ejecución de los programas contenidos en este TFG. No obstante, hay procesos los cuales son confidenciales y no se pueden dar en su totalidad. Desde Kuka se deberían dar, si lo creen oportuno, los datos y procesos que no están especificados en este manual.

A continuación se mostrarán los tres diferentes tipos de programas del caso OsHu, algunos de ellos de una forma reducida, ya que sino ocuparían demasiadas páginas.

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

Damien Lahire

**FICHERO DAT GLOBAL REDUCIDO:**

DEFDAT Cas\_OsHu\_Global PUBLIC

;

FOLD EXTERNAL DECLARATIONS;

DECL GLOBAL E6POS XP6000={X 84.7122584177031,Y 84.7122584177757,Z -153.429643515079,A 0,B 0,C 0,S 6,T 50,E1 0,E2 0,E3 0,E4 0,E5 0,E6 0}

DECL GLOBAL E6POS XP6001={X 82.7111890619237,Y 82.711189061996,Z -153.429662322725,A 0,B -2.32430155876037E-06,C 2.32430155876037E-06,S 6,T 50,E1 0,E2 0,E3 0,E4 0,E5 0,E6 0}

DECL GLOBAL E6POS XP6002={X 80.7100907774149,Y 80.7100907774869,Z -153.43006823829,A 0,B -5.57432472900229E-05,C 0.000055743247290023,S 6,T 50,E1 0,E2 0,E3 0,E4 0,E5 0,E6 0}

DECL GLOBAL E6POS XP6003={X 78.7088249831593,Y 78.7088249832309,Z -153.432621052039,A 0,B -0.000297394371962341,C 0.000297394371962342,S 6,T 50,E1 0,E2 0,E3 0,E4 0,E5 0,E6 0}

DECL GLOBAL E6POS XP6004={X 76.7069902738939,Y 76.7069902739653,Z -153.441951806413,A 0,B -0.000707964593262403,C 0.000707964593262403,S 6,T 50,E1 0,E2 0,E3 0,E4 0,E5 0,E6 0}

DECL GLOBAL E6POS XP6005={X 74.7041169856258,Y 74.7041169856968,Z -153.466345772742,A 0,B -0.000726292770871516,C 0.000726292770871515,S 6,T 50,E1 0,E2 0,E3 0,E4 0,E5 0,E6 0}

DECL GLOBAL E6POS XP6006={X 72.7007333553897,Y 72.7007333554605,Z -153.516319812216,A 0,B 0.000485079759208513,C -0.000485079759208514,S 6,T 50,E1 0,E2 0,E3 0,E4 0,E5 0,E6 0}

DECL GLOBAL E6POS XP6007={X 70.6996140758056,Y 70.6996140758761,Z -153.600185318685,A 0,B 0.00333421866857414,C -0.00333421866857413,S 6,T 50,E1 0,E2 0,E3 0,E4 0,E5 0,E6 0}

DECL GLOBAL E6POS XP6008={X 68.705730278373,Y 68.7057302784432,Z -153.717913953327,A 0,B 0.00800795402709383,C -0.00800795402709382,S 6,T 50,E1 0,E2 0,E3 0,E4 0,E5 0,E6 0}

DECL GLOBAL E6POS XP6009={X 66.7253789952448,Y 66.7253789953146,Z -153.856540425732,A 0,B 0.0149207626014852,C -0.0149207626014852,S 6,T 50,E1 0,E2 0,E3 0,E4 0,E5 0,E6 0}

DECL GLOBAL E6POS XP6010={X 64.7664312844818,Y 64.7664312845514,Z -153.989636098356,A 0,B 0.0228484287738327,C -0.0228484287738327,S 6,T 50,E1 0,E2 0,E3 0,E4 0,E5 0,E6 0}



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

Damien Lahire

**FICHERO SRC CASO 1 REDUCIDO (SUBPROGRAMA):**

DEF caso1 ( )

PTP XP6000 C\_PTP

PTP XP6001 C\_PTP

PTP XP6002 C\_PTP

PTP XP6003 C\_PTP

PTP XP6004 C\_PTP

PTP XP6005 C\_PTP

PTP XP6006 C\_PTP

PTP XP6007 C\_PTP

PTP XP6008 C\_PTP

PTP XP6009 C\_PTP

PTP XP6010 C\_PTP

**FICHERO SRC PRINCIPAL**

DEF Cas\_OsHu\_Global ( )

DECL INT contador

INI

fold Robroot,Tools and Bases used;

\$ROBROOT = {x 0,y 0,z 0,a 0,b 0,c 0}

BASE\_DATA[2] = {x 985.8,y -350,z 650,a 0,b 0,c 0}

TOOL\_DATA[2] = {x 100,y 0,z 65.8,a 0,b -90,c 0}

;endfold

fold HomePositions

XHOME={A1 22.61987,A2 -69.42407,A3 115.1167,A4 30.21048,A5 -49.85107,A6 -20.57748,E1 0,E2 0,E3 0,E4 0,E5 0,E6 0}

\$H\_POS=XHOME;

endfold

TimerReset[1];

PTP HOME Vel=100 % DEFAULT

TimerStart[1]

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

Damien Lahire

FOR Contador = 0 to 2;

\$APO.CPTP=50

BAS(#BASE,2)

BAS(#TOOL,2)

BAS(#VEL\_PTP,100)

BAS(#ACC\_PTP,9)

caso1()

BAS(#ACC\_PTP,18)

caso2()

caso3()

caso4()

caso5()

caso6()

caso7()

caso8()

caso9()

caso10()

caso11()

ENDFOR

TimerStop[1]

PTP HOME Vel=10 % DEFAULT

END