



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

Análisis experimental y estudio de posibles usos de supercapacitores en los submarinos de la Armada

Grado en Ingeniería Mecánica

ALUMNO: Álvaro Romero Aguilar

DIRECTORES: Andrés Suárez García
Pablo Falcón Oubiña

CURSO ACADÉMICO: 2021-2022

Universida_{de}Vigo



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

*Análisis experimental y estudio de posibles usos de
supercapacitores en los submarinos de la Armada*

Grado en Ingeniería Mecánica
Intensificación en Tecnología Naval
Cuerpo General

Universida_{de}Vigo

RESUMEN

Actualmente, pese al aumento de la demanda de submarinos convencionales alrededor del mundo, la capacidad de poder construirlos no ha variado, pues solamente unos 7 países actualmente pueden, por lo que existe una gran oportunidad de beneficio [1]. Esto, añadido a las continuas restricciones de emisiones debidas al cambio climático y a la crisis por la escasez de semiconductores, implica una situación muy compleja, en la que España debe adaptarse buscando mejores alternativas que su competencia.

Ante esto, el presente trabajo propone una alternativa a las baterías convencionales usadas en los submarinos españoles, mediante el uso de supercapacitores. Estos, emplean materiales abundantes en el entorno, de obtención sencilla y económica, y cuyo impacto medioambiental es inferior. Para ello, tras una introducción al submarino y los supercapacitores, mediante un análisis experimental con dos prototipos formados con grafito y cloruro de sodio el primero, y con grafito, carbón activo y sulfato de zinc el segundo; y tras un dimensionamiento general adaptado a los requerimientos de la plataforma, se concluirá con una reflexión sobre la viabilidad como alternativa a las actuales baterías, buscando igualar la eficiencia y reducir los desechos y el impacto medioambiental, manteniendo al mismo tiempo la operatividad de los equipos.

PALABRAS CLAVE

Submarino, supercapacitor, capacitancia, densidad energética, potencia específica

AGRADECIMIENTOS

Primeramente, quisiera agradecer el incondicional apoyo realizado por mi familia, pues en ningún momento han mostrado síntomas de flaqueza en cuanto a mi formación, tanto profesional como personal, se refiere; y en todo momento han sabido encontrar una forma de facilitarme la mejor formación posible, lo que me ha permitido poder llegar hasta el presente trabajo.

En segundo lugar, quiero mostrar mi gratitud y reconocimiento a los profesores Andrés Suárez García y Pablo Falcón Oubiña, por aceptar dirigirme este trabajo y guiarme en la realización del mismo, permitiéndome dejar constancia de mis conocimientos, adquiridos a lo largo de estos 5 años, en este trabajo.

También quiero hacer una mención especial al Capitán de Fragata Ramón Touza Gil y al Capitán de Corbeta José Manuel Piñero Álvarez, por haber dedicado parte de su tiempo en ayudarme durante la recolección de información, imprescindible por otro lado para la realización del dimensionamiento final; y por su dedicación durante mi proceso de formación, tanto académica, como en valores.

Por último, pero no menos importante, me queda agradecer a la institución de la Escuela Naval Militar y al Centro Universitario de la Defensa, haberme permitido formar parte de su institución, facilitarme una formación académica, moral y personal; y por haber introducido en mi vida a la promoción 422-152, con la cual he compartido, y seguiré compartiendo, el resto de mi vida.

CONTENIDO

Contenido	1
Índice de Figuras	4
Índice de Tablas.....	10
1 Introducción y objetivos	11
1.1 Antecedentes	11
1.2 Justificación	13
1.3 Objetivos	13
1.4 Estructura del trabajo	14
2 Estado del arte	15
2.1 El submarino	15
2.1.1 Inicios del submarino.....	15
2.1.2 Necesidad de “respirar” y moverse bajo el agua	18
2.2 Clasificación de submarinos	20
2.2.1 Convencional diésel-eléctrico.....	20
2.2.2 Energía nuclear	21
2.2.3 Propulsión Independiente de Aire (AIP)	23
2.2.3.1 Motor Stirling	23
2.2.3.2 MESMA (Module d’Energie Sous-Marine Autonome).....	24
2.2.3.3 Pila de combustible	24
2.3 Los supercapacitores	25
2.3.1 Qué es un supercapacitor	25
2.3.2 Tipos de supercapacitores.....	27
2.3.2.1 Eléctricos de doble capa (EDLC).....	27
2.3.2.2 Supercapacitor con pseudocapacitancia	27
2.3.2.3 Híbridos	28
2.3.3 Usos en la actualidad	29
2.3.4 Comparativa con una batería	29
2.4 Metodología de Superficie de Respuesta (MSR).....	31
3 Desarrollo del TFG.....	33
3.1 Metodología	33
3.1.1 Prototipos.....	37
3.2 Factores estudiados	37
3.2.1 Voltaje.....	37

3.2.2 Superficie de los electrodos	38
3.2.3 Distancia entre placas	38
3.2.4 Tamaño de poro del separador.....	39
3.2.5 Concentración del electrolito	39
3.2.6 Resistencia en el circuito	40
3.2.7 Tiempo de secado del electrolito	40
4 Resultados	41
4.1 Gráficas y resultados Box-Behnken.....	41
4.2 Capacitancia.....	45
4.2.1 Prototipo 1 (Cloruro de sodio).....	45
4.2.2 Prototipo 2 (Sulfato de zinc).....	50
4.3 Densidad energética	54
4.3.1 Prototipo 1 (Cloruro de sodio).....	54
4.3.2 Prototipo 2 (Sulfato de zinc).....	57
4.4 Potencia específica media	62
4.4.1 Prototipo 1 (Cloruro de sodio).....	62
4.4.2 Prototipo 2 (Sulfato de zinc).....	65
4.5 Comparación con soluciones actuales.....	69
4.6 Estudio de aplicación en los submarinos de la Armada.....	71
4.6.1 S-70 Clase “Galerna”.....	73
4.6.1.1 Motores eléctricos	73
4.6.1.2 Compresores	74
4.6.2 S-80 Clase “Isaac Peral”	75
4.6.2.1 Motor eléctrico	75
4.6.2.2 Compresores	76
5 Conclusiones y líneas futuras	77
5.1 Conclusiones	77
5.2 Líneas futuras	78
5.2.1 Optimización del prototipo actual	78
5.2.2 Estudio de otras composiciones.....	79
5.2.3 Estudio de implementación de un sistema híbrido	79
6 Bibliografía.....	80
Anexo I: Tablas de mediciones para el Supercapacitor número 1	86
Anexo II: Tablas de mediciones para el supercapacitor número 2.....	93

Anexo III: Gráficas de resultados del supercapacitor número 196
Anexo IV: Gráficas de resultados del supercapacitor número 2111

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1 Submarino clase S-70 de la Armada Española en el puerto de Cartagena [5]	12
Figura 1-2 Autobús de la empresa ABB recargando durante una parada [9].....	12
Figura 1-3 Prototipo de la motocicleta Nawa Racer [11].....	13
Figura 2-1 Réplica del submarino de Drebber [14].....	15
Figura 2-2 Modelo del "Turtle" [16]	16
Figura 2-3 Réplica del "H.L Hunley" [18].....	16
Figura 2-4 Réplica del "Ictíneo II" en Barcelona [19]	16
Figura 2-5 Casco del submarino "Peral" expuesto en el Museo de Cartagena [21].....	17
Figura 2-6 Hidroavión despegando desde el submarino "HMS M2" [22].....	17
Figura 2-7 Botadura del SSN-571 "Nautilus" [23].....	18
Figura 2-8 Submarino en ejercicio de inserción de un equipo de operaciones especiales [24]	18
Figura 2-9 Recreación 3D del "Flach" [25].....	19
Figura 2-10 Submarino "Brandtaucher" expuesto en Dresden [26].....	19
Figura 2-11 Maqueta a escala del submarino "Plongeur" [27].....	20
Figura 2-12 Esquema de funcionamiento de propulsión diésel-eléctrica [29].....	20
Figura 2-13 Submarino convencional realizando snorkel [32]	21
Figura 2-14 Esquema general de un reactor nuclear empleando una turbina de vapor [33]	22
Figura 2-15 Submarino tipo SSBN ruso de la clase "Typhoon" [35].....	22
Figura 2-16 Esquema general de propulsión AIP [36].....	23
Figura 2-17 Submarino AIP sueco clase "Gotland" en dique seco [38].....	24
Figura 2-18 Submarino AIP pakistaní PNS "Hamza" con sistema MESMA [39].....	24
Figura 2-19 Submarino AIP ruso de la clase "Lada" [40].....	25
Figura 2-20 Submarino AIP español S-81 "Isaac Peral" [42]	25
Figura 2-21 Dibujo esquemático de las partes de un supercondensador [44]	26
Figura 2-22 Esquema de un EDLC [48].....	27
Figura 2-23 Esquema de un supercapacitor con pseudocapacitancia [48].....	28
Figura 2-24 Esquema de supercapacitor híbrido tipo-batería [48].....	28
Figura 2-25 Ejemplo de sistema regenerativo de energía "I-Eloop" de Mazda [51].....	29
Figura 2-26 Ejemplo de Diagrama de Ragone [52].....	30
Figura 2-27 Ejemplo de gráfica de contorno Concentración-Tamaño de poro	31
Figura 2-28 Ejemplo de gráfica de superficie con forma de silla de montar [56].....	32
Figura 3-1 Conjunto de materiales empleados para el montaje	33
Figura 3-2 Esquema del circuito empleado en el montaje	34

Figura 3-3 Disposición del circuito montado con equipos auxiliares durante una medición.....	36
Figura 3-4 Ejemplo de gráfica de una de las mediciones.....	36
Figura 3-5 Estado de los electrodos de carbón activo tras su uso	38
Figura 3-6 Prototipo sujetado con pinzas durante la toma de medidas	39
Figura 3-7 Dos de los tres tipos de papel de filtro cualitativo empleados durante los ensayos	39
Figura 3-8 Balanza empleada para la preparación de las disoluciones	40
Figura 4-1 Esquema de la organización inicial de los resultados de uno de los prototipos	41
Figura 4-2 Esquema de la organización final de los resultados de uno de los prototipos.....	42
Figura 4-3 Estructuración general del análisis de los resultados.....	44
Figura 4-4 Diagrama de Pareto para la respuesta a la capacitancia	46
Figura 4-5 Grafica de contorno con respuesta en capacitancia	47
Figura 4-6 Gráfica de superficie con respuesta en capacitancia.....	47
Figura 4-7 Gráfica de contorno con respuesta en capacitancia	48
Figura 4-8 Gráfica de superficie con respuesta en capacitancia.....	48
Figura 4-9 Gráfica de contorno con respuesta en capacitancia	49
Figura 4-10 Gráfica de superficie con respuesta en capacitancia.....	49
Figura 4-11 Diagrama de Pareto para la respuesta a la capacitancia	51
Figura 4-12 Grafica de contorno con respuesta en capacitancia	51
Figura 4-13 Gráfica de superficie con respuesta en capacitancia.....	52
Figura 4-14 Grafica de contorno con respuesta en capacitancia	52
Figura 4-15 Gráfica de superficie con respuesta en capacitancia.....	52
Figura 4-16 Grafica de contorno con respuesta en capacitancia	53
Figura 4-17 Gráfica de superficie con respuesta en capacitancia.....	53
Figura 4-18 Diagrama de Pareto para la respuesta a la densidad energética.....	54
Figura 4-19 Grafica de contorno con respuesta en densidad energética	55
Figura 4-20 Gráfica de superficie con respuesta en densidad energética.....	55
Figura 4-21 Grafica de contorno con respuesta en densidad energética	56
Figura 4-22 Gráfica de superficie con respuesta en densidad energética.....	56
Figura 4-23 Grafica de contorno con respuesta en densidad energética	57
Figura 4-24 Gráfica de superficie con respuesta en densidad energética.....	57
Figura 4-25 Diagrama de Pareto para la respuesta a la densidad energética.....	59
Figura 4-26 Grafica de contorno con respuesta en densidad energética	59
Figura 4-27 Gráfica de superficie con respuesta en densidad energética.....	60
Figura 4-28 Grafica de contorno con respuesta en densidad energética	60
Figura 4-29 Gráfica de superficie con respuesta en densidad energética.....	60

Figura 4-30 Grafica de contorno con respuesta en densidad energética	61
Figura 4-31 Gráfica de superficie con respuesta en densidad energética.....	61
Figura 4-32 Diagrama de Pareto para la respuesta a la potencia específica media	63
Figura 4-33 Grafica de contorno con respuesta en potencia específica media.....	63
Figura 4-34 Gráfica de superficie con respuesta en potencia específica media	64
Figura 4-35 Grafica de contorno con respuesta en potencia específica media.....	64
Figura 4-36 Gráfica de superficie con respuesta en potencia específica media	64
Figura 4-37 Grafica de contorno con respuesta en potencia específica media.....	65
Figura 4-38 Gráfica de superficie con respuesta en potencia específica media	65
Figura 4-39 Diagrama de Pareto para la respuesta a la potencia específica.....	66
Figura 4-40 Grafica de contorno con respuesta en potencia específica media.....	67
Figura 4-41 Gráfica de superficie con respuesta en potencia específica media	67
Figura 4-42 Grafica de contorno con respuesta en potencia específica media.....	68
Figura 4-43 Gráfica de superficie con respuesta en potencia específica media	68
Figura 4-44 Grafica de contorno con respuesta en potencia específica media.....	69
Figura 4-45 Gráfica de superficie con respuesta en potencia específica media	69
Figura 4-46 Ubicación de los prototipos dentro del Diagrama de Ragone [59].....	71
Figura 4-47 Interior de los submarinos S-70 [61]	72
Figura 4-48 Interior de los submarinos S-80 [68]	73
Figura A1- 1 Resultados obtenidos para la combinación n°1	86
Figura A1- 2 Resultados obtenidos para la combinación n°2.....	87
Figura A1- 3 Resultados obtenidos para la combinación n°3.....	87
Figura A1- 4 Resultados obtenidos para la combinación n°4.....	88
Figura A1- 5 Resultados obtenidos para la combinación n°5.....	89
Figura A1- 6 Resultados obtenidos para la combinación n°6.....	89
Figura A1- 7 Resultados obtenidos para la combinación n°7.....	89
Figura A1- 8 Resultados obtenidos para la combinación n°8.....	90
Figura A1- 9 Resultados obtenidos para la combinación n°9.....	90
Figura A1- 10 Resultados obtenidos para la combinación n°10.....	91
Figura A1- 11 Resultados obtenidos para la combinación n°11.....	91
Figura A1- 12 Resultados obtenidos para la combinación n°12.....	91
Figura A1- 13 Resultados obtenidos para la combinación n°13.....	92
Figura A1- 14 Resultados obtenidos para la combinación n°14.....	92
Figura A1- 15 Resultados obtenidos para la combinación n°15.....	92
Figura A2- 1 Resultados obtenidos para la combinación n°1	93

Figura A2- 2 Resultados obtenidos para la combinación nº2.....	93
Figura A2- 3 Resultados obtenidos para la combinación nº3.....	93
Figura A2- 4 Resultados obtenidos para la combinación nº4.....	94
Figura A2- 5 Resultados obtenidos para la combinación nº5.....	94
Figura A2- 6 Resultados obtenidos para la combinación nº6.....	94
Figura A2- 7 Resultados obtenidos para la combinación nº7.....	94
Figura A2- 8 Resultados obtenidos para la combinación nº8.....	94
Figura A2- 9 Resultados obtenidos para la combinación nº9.....	94
Figura A2- 10 Resultados obtenidos para la combinación nº10.....	95
Figura A2- 11 Resultados obtenidos para la combinación nº11.....	95
Figura A2- 12 Resultados obtenidos para la combinación nº12.....	95
Figura A2- 13 Resultados obtenidos para la combinación nº13.....	95
Figura A2- 14 Resultados obtenidos para la combinación nº14.....	95
Figura A2- 15 Resultados obtenidos para la combinación nº15.....	95
Figura A3- 1 Resultados obtenidos en la combinación nº1 - medición nº1	96
Figura A3- 2 Resultados obtenidos en la combinación nº1 - medición nº2	96
Figura A3- 3 Resultados obtenidos en la combinación nº1 - medición nº3	96
Figura A3- 4 Resultados obtenidos en la combinación nº2 - medición nº1	97
Figura A3- 5 Resultados obtenidos en la combinación nº2 - medición nº2	97
Figura A3- 6 Resultados obtenidos en la combinación nº2 - medición nº3	97
Figura A3- 7 Resultados obtenidos en la combinación nº3 - medición nº1	98
Figura A3- 8 Resultados obtenidos en la combinación nº3 - medición nº2	98
Figura A3- 9 Resultados obtenidos en la combinación nº3 - medición nº3	98
Figura A3- 10 Resultados obtenidos en la combinación nº4 - medición nº1	99
Figura A3- 11 Resultados obtenidos en la combinación nº4 - medición nº2	99
Figura A3- 12 Resultados obtenidos en la combinación nº4 - medición nº3	99
Figura A3- 13 Resultados obtenidos en la combinación nº5 - medición nº1	100
Figura A3- 14 Resultados obtenidos en la combinación nº5 - medición nº2	100
Figura A3- 15 Resultados obtenidos en la combinación nº5 - medición nº3	100
Figura A3- 16 Resultados obtenidos en la combinación nº6 - medición nº1	101
Figura A3- 17 Resultados obtenidos en la combinación nº6 - medición nº2	101
Figura A3- 18 Resultados obtenidos en la combinación nº6 - medición nº3	101
Figura A3- 19 Resultados obtenidos en la combinación nº7 - medición nº1	102
Figura A3- 20 Resultados obtenidos en la combinación nº7 - medición nº2	102
Figura A3- 21 Resultados obtenidos en la combinación nº7 - medición nº3	102

Figura A3- 22 Resultados obtenidos en la combinación nº8 - medición nº1	103
Figura A3- 23 Resultados obtenidos en la combinación nº8 - medición nº2	103
Figura A3- 24 Resultados obtenidos en la combinación nº8 - medición nº3	103
Figura A3- 25 Resultados obtenidos en la combinación nº9 - medición nº1	104
Figura A3- 26 Resultados obtenidos en la combinación nº9 - medición nº2	104
Figura A3- 27 Resultados obtenidos en la combinación nº9 - medición nº3	104
Figura A3- 28 Resultados obtenidos en la combinación nº10 - medición nº1	105
Figura A3- 29 Resultados obtenidos en la combinación nº10 - medición nº2	105
Figura A3- 30 Resultados obtenidos en la combinación nº10 - medición nº3	105
Figura A3- 31 Resultados obtenidos en la combinación nº11 - medición nº1	106
Figura A3- 32 Resultados obtenidos en la combinación nº11 - medición nº2	106
Figura A3- 33 Resultados obtenidos en la combinación nº11 - medición nº3	106
Figura A3- 34 Resultados obtenidos en la combinación nº12 - medición nº1	107
Figura A3- 35 Resultados obtenidos en la combinación nº12 - medición nº2	107
Figura A3- 36 Resultados obtenidos en la combinación nº12 - medición nº3	107
Figura A3- 37 Resultados obtenidos en la combinación nº13 - medición nº1	108
Figura A3- 38 Resultados obtenidos en la combinación nº13 - medición nº2	108
Figura A3- 39 Resultados obtenidos en la combinación nº13 - medición nº3	108
Figura A3- 40 Resultados obtenidos en la combinación nº14 - medición nº1	109
Figura A3- 41 Resultados obtenidos en la combinación nº14 - medición nº2	109
Figura A3- 42 Resultados obtenidos en la combinación nº14 - medición nº3	109
Figura A3- 43 Resultados obtenidos en la combinación nº15 - medición nº1	110
Figura A3- 44 Resultados obtenidos en la combinación nº15 - medición nº2	110
Figura A3- 45 Resultados obtenidos en la combinación nº15 - medición nº3	110
Figura A4- 1 Resultados obtenidos en la combinación nº1 - medición nº1	111
Figura A4- 2 Resultados obtenidos en la combinación nº1 - medición nº2	111
Figura A4- 3 Resultados obtenidos en la combinación nº1 - medición nº3	111
Figura A4- 4 Resultados obtenidos en la combinación nº2 - medición nº1	112
Figura A4- 5 Resultados obtenidos en la combinación nº2 - medición nº2	112
Figura A4- 6 Resultados obtenidos en la combinación nº2 - medición nº3	112
Figura A4- 7 Resultados obtenidos en la combinación nº3 - medición nº1	113
Figura A4- 8 Resultados obtenidos en la combinación nº3 - medición nº2	113
Figura A4- 9 Resultados obtenidos en la combinación nº3 - medición nº3	113
Figura A4- 10 Resultados obtenidos en la combinación nº4 - medición nº1	114
Figura A4- 11 Resultados obtenidos en la combinación nº4 - medición nº2	114

Figura A4- 12 Resultados obtenidos en la combinación n°4 - medición n°3	114
Figura A4- 13 Resultados obtenidos en la combinación n°5 - medición n°1	115
Figura A4- 14 Resultados obtenidos en la combinación n°5 - medición n°2	115
Figura A4- 15 Resultados obtenidos en la combinación n°5 - medición n°3	115
Figura A4- 16 Resultados obtenidos en la combinación n°6 - medición n°1	116
Figura A4- 17 Resultados obtenidos en la combinación n°6 - medición n°2	116
Figura A4- 18 Resultados obtenidos en la combinación n°6 - medición n°3	116
Figura A4- 19 Resultados obtenidos en la combinación n°7 - medición n°1	117
Figura A4- 20 Resultados obtenidos en la combinación n°7 - medición n°2	117
Figura A4- 21 Resultados obtenidos en la combinación n°7 - medición n°3	117
Figura A4- 22 Resultados obtenidos en la combinación n°8 - medición n°1	118
Figura A4- 23 Resultados obtenidos en la combinación n°8 - medición n°2	118
Figura A4- 24 Resultados obtenidos en la combinación n°8 - medición n°3	118
Figura A4- 25 Resultados obtenidos en la combinación n°9 - medición n°1	119
Figura A4- 26 Resultados obtenidos en la combinación n°9 - medición n°2	119
Figura A4- 27 Resultados obtenidos en la combinación n°9 - medición n°3	119
Figura A4- 28 Resultados obtenidos en la combinación n°10 - medición n°1	120
Figura A4- 29 Resultados obtenidos en la combinación n°10 - medición n°2	120
Figura A4- 30 Resultados obtenidos en la combinación n°10 - medición n°3	120
Figura A4- 31 Resultados obtenidos en la combinación n°11 - medición n°1	121
Figura A4- 32 Resultados obtenidos en la combinación n°11 - medición n°2	121
Figura A4- 33 Resultados obtenidos en la combinación n°11 - medición n°3	121
Figura A4- 34 Resultados obtenidos en la combinación n°12 - medición n°1	122
Figura A4- 35 Resultados obtenidos en la combinación n°12 - medición n°2	122
Figura A4- 36 Resultados obtenidos en la combinación n°12 - medición n°3	122
Figura A4- 37 Resultados obtenidos en la combinación n°13 - medición n°1	123
Figura A4- 38 Resultados obtenidos en la combinación n°13 - medición n°2	123
Figura A4- 39 Resultados obtenidos en la combinación n°13 - medición n°3	123
Figura A4- 40 Resultados obtenidos en la combinación n°14 - medición n°1	124
Figura A4- 41 Resultados obtenidos en la combinación n°14 - medición n°2	124
Figura A4- 42 Resultados obtenidos en la combinación n°14 - medición n°3	124
Figura A4- 43 Resultados obtenidos en la combinación n°15 - medición n°1	125
Figura A4- 44 Resultados obtenidos en la combinación n°15 - medición n°2	125
Figura A4- 45 Resultados obtenidos en la combinación n°15 - medición n°3	125

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1 Comparativa ventajas/desventajas de un supercapacitor frente a una batería	31
Tabla 3-1 Combinación de diseño Box-Behnken para respuesta en capacitancia	35
Tabla 3-2 Datos del prototipo y resultados obtenidos a partir de la Figura 3-4	37
Tabla 3-3 Comparación de los componentes de cada uno de los prototipos escogidos	37
Tabla 4-1 Resultados obtenidos de cada combinación del prototipo 1	43
Tabla 4-2 Resultados obtenidos de cada combinación del prototipo 2	43
Tabla 4-3 Significancia de los factores estudiados en el supercapacitor 1	45
Tabla 4-4 Combinación con mayor optimización de respuesta en capacitancia	49
Tabla 4-5 Significancia de los factores estudiados en el supercapacitor 2	50
Tabla 4-6 Combinación con mayor optimización de respuesta en capacitancia	53
Tabla 4-7 Significancia de los factores estudiados en el supercapacitor 1	54
Tabla 4-8 Combinación con mayor optimización de respuesta en densidad energética	57
Tabla 4-9 significancia de los factores estudiados en el supercapacitor 2	58
Tabla 4-10 Combinación con mayor optimización de respuesta en densidad energética	61
Tabla 4-11 Significancia de los factores estudiados en el supercapacitor 1	62
Tabla 4-12 Combinación con mayor optimización de respuesta en potencia específica media	65
Tabla 4-13 Significancia de los factores estudiados en el supercapacitor 2	66
Tabla 4-14 Combinación con mayor optimización de respuesta en potencia específica media	69
Tabla 4-15 Combinaciones para triple máxima optimización en ambos supercapacitores	70
Tabla 4-16 Comparación de las características principales de los submarinos S-70 y S-80	73
Tabla 4-17 Comparación de autonomías de los motores eléctricos en los S-70	74
Tabla 4-18 Resumen de rendimientos de los compresores durante el soplado de los lastres	74
Tabla 4-19 Comparación de autonomías de los compresores en los S-70	75
Tabla 4-20 Comparación de autonomías del motor eléctrico en los S-80	75
Tabla 4-21 Comparación de autonomías de los compresores en los S-80	76
Tabla 5-1 Comparación de autonomías en función del voltaje de trabajo en un submarino S-70 ...	78
Tabla 5-2 Comparación de autonomías en función del voltaje de trabajo en un submarino S-80 ...	79

1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1 Antecedentes

Desde los inicios del submarino, empleado como arma militar de forma efectiva, durante las 1ª y 2ª guerras mundiales, quedó demostrada la importancia y capacidad de disuasión de este tipo de plataforma, ya que la propia presencia de este generaba en cualquier barco enemigo que se encontrara navegando en las inmediaciones una gran sensación de inseguridad. Otros ejemplos más recientes los podemos encontrar en la Guerra de las Malvinas con el “HMS Conqueror”, o en las actuales flotas de submarinos de las grandes potencias mundiales, armados con misiles balísticos nucleares, empleados para disuadir ante posibles ataques enemigos. A la vista de las capacidades que ofrece el submarino, aquellos países que han podido permitirse esta capacidad lo han hecho, lo que está provocando un gran aumento en el número de submarinos convencionales alrededor del mundo, tal y como se puede observar en las distintas marinas del mundo y en las exportaciones de submarinos convencionales [2]. En este apartado, España, mediante la Armada Española, ha mantenido, y sigue manteniendo; en mayor o menos medida, una flotilla de submarinos activa [3].

Por otro lado, pese a que en la actualidad surgen continuamente mejoras y avances tecnológicos en sistemas de armas, sensores, equipos de comunicaciones, ... y donde el submarino convencional ha estado evolucionando al mismo ritmo, equipando sensores más precisos y equipos más sofisticados; en lo que a sistemas de almacenamiento de energía se refiere, los desarrollos a los que se ha visto sometido no han sido tan avanzados, ya que hoy en día, los submarinos convencionales de todas las marinas del mundo emplean, en su gran mayoría, baterías de composición plomo-ácido, como es el caso de los submarinos españoles de la clase S-70 [4]. Debido a esto, no es descabellado pensar que, en un ámbito tan importante como es el sistema que almacena la energía de la que se alimentan todos los equipos vitales para la supervivencia del submarino; es necesario un relanzamiento de nuevas investigaciones, en busca de sistemas más eficientes y con mayor capacidad energética que los actuales.



Figura 1-1 Submarino clase S-70 de la Armada Española en el puerto de Cartagena [5]

Al mismo tiempo, en el mundo de la automoción, y el transporte terrestre en general, desde los últimos años se está observando una constante lluvia de nuevas tecnologías e innovaciones, las cuales logran llegar en poco tiempo al mercado, como son las baterías de Ion-Litio o de Níquel-Cadmio, empleadas en vehículos eléctricos e híbridos, o los capacitores, los cuales se llevan empleando durante años en circuitos electrónicos. Es gracias a esto que, en el ámbito del almacenamiento de energía se han realizado grandes avances, empleando baterías de distintas composiciones, o incluso llegando a emplear supercapacitores, ya que estos son elementos altamente eficientes, con un ciclo de vida más de cien veces mayor que las baterías [6] y, según en qué composiciones, son elementos cuyo impacto medioambiental es nulo. Los supercapacitores, hoy en día se emplean en gran cantidad de funciones, como complementar a sistemas de baterías, mejorando las cifras de autonomía; o de combustión tradicionales, ahorrando hasta un 10% de combustible en conducción urbana [7]. Algunos ejemplos de esta tecnología son:

- La empresa “ABB” emplea autobuses urbanos, dotados de supercapacitores, para cubrir líneas diarias en ciudades como Davos, Ginebra o Nantes, los cuales se recargan en 20 segundos, mientras los pasajeros embarcan y desembarcan del vehículo [8].



Figura 1-2 Autobús de la empresa ABB recargando durante una parada [9]

- La misma empresa, “ABB” emplea motores de hasta 2,3 MW en un teleférico en Stoos, Suiza. Las cabinas permiten transportar unas 1500 personas durante el trayecto de 1,7 kilómetros [8].
- La marca automovilística “Lamborghini” emplea supercapacitores formados con compuestos especiales, “MOF”, en el su modelo híbrido denominado “Sián”, obteniendo unos 34 CV de potencia [10].

- El prototipo de la motocicleta “Nawa Racer” emplea un conjunto de supercapacitores, en combinación con baterías de litio, otorgando una autonomía de unos 300 kilómetros [11].



Figura 1-3 Prototipo de la motocicleta Nawa Racer [11]

Al igual que muchas otras organizaciones y marinas del mundo, la Armada Española también se ve afectada por este entorno, caracterizado por su continuo cambio, por la constante aparición de nuevos desarrollos, evoluciones y actualizaciones de sistemas, equipos, plataformas, ... por lo que se ve obligada a estar constantemente evolucionando, en busca de la mejora continua, tratando de encontrar nuevos sistemas, tecnologías o técnicas que les aventajen frente a sus competidores. Es por ello que, en el presente trabajo se propone el empleo de supercapacitores como sistemas de almacenamiento de energía a bordo de los submarinos de la Armada Española, ya sea como sistema principal de almacenamiento de energía o como hibridación de su actual sistema.

1.2 Justificación

Debido a que los medios de transporte terrestres están logrando grandes avances en los sistemas de almacenamiento de energía, aumentando sus autonomías y prestaciones, pero al mismo tiempo, parecen haber ralentizado su avance en los submarinos convencionales, surge la idea de tratar de implementar estas nuevas tecnologías, cuyo futuro se vislumbra prometedor, en una plataforma distinta, como es la de un submarino, cuyas capacidades y características son únicas e indelegables en otro tipo de plataformas. Con el presente trabajo se pretende aportar un granito de arena para relanzar el arma submarina a un nuevo nivel, tomando la iniciativa con nuevas técnicas y sistemas, como en su día hizo Don Isaac Peral con su prototipo.

Tomando las características principales de los supercapacitores se puede concluir en que estos son dispositivos respetuosos con el medio ambiente que ya consiguen mejores cifras de eficiencia que las baterías convencionales, unas capacidades de absorción y entrega de energía imposibles de igualar, y que logran, al mismo tiempo, una mayor vida útil, lo que les otorga un futuro prometedor. Por lo tanto, en base a lo anteriormente expuesto, se puede considerar que queda justificado la realización de un análisis y estudio de este tipo de dispositivos para su empleo en plataformas como los submarinos de la Armada Española, ya que sus características encajan con las necesidades de estas plataformas, pues requieren sistemas de gran eficiencia capaces de aportar grandes cantidades de energía de forma rápida y sacrificando el menor espacio posible.

1.3 Objetivos

Haciendo referencia al título del presente trabajo, este busca dar a conocer, así como aportar mediante unos datos experimentales y un procedimiento científico, una alternativa, o complemento de mejora, factible para las actuales baterías de plomo-ácido empleadas a bordo de los submarinos de la Armada Española de la serie S-70, clase “Galerna”; así como servir como opción a tener en cuenta de

cara a los futuros submarinos de la serie S-80, clase “Isaac Peral”. Entre los objetivos principales a cumplir destacan:

- Aportar una alternativa cuya composición emplee materiales económicos, abundantes en la naturaleza, fáciles de obtener y manipular, sean respetuosos con el medio ambiente y aporten una eficiencia como mínimo, similar a los empleados actualmente.
- Analizar el comportamiento, mediante la experimentación en laboratorio, de los prototipos a proponer como alternativa.
- Dimensionar la cantidad de dichos prototipos necesaria para suplir las funciones actualmente cubiertas por las baterías de plomo-ácido
- Obtener unas conclusiones sobre la viabilidad de dichos prototipos en el entorno de un submarino de la Armada española

1.4 Estructura del trabajo

La estructura que seguirá la memoria del presente trabajo será, en base a los criterios establecidos por el Centro Universitario de la Defensa, adscrita a la Universidad de Vigo, dividida en cinco bloques principales:

1. Introducción y objetivos: En este bloque se describirán los antecedentes que han motivado la propuesta de este trabajo, así como una justificación del mismo y los objetivos que persigue.
2. Estado del arte: En este bloque se realizará un repaso sobre el desarrollo del submarino a lo largo de la historia, se establecerán unos conceptos básicos sobre los supercapacitores, sus tipos, aplicaciones y usos en la actualidad y una comparación con las baterías convencionales, terminando con una breve explicación sobre en qué consiste la metodología a emplear en el diseño de la experimentación del presente trabajo.
3. Desarrollo: En este bloque se explicará cual será, paso a paso, la metodología empleada en la realización del trabajo, junto con los problemas que se han ido detectando.
4. Resultados: En este bloque se mostrarán, analizarán y comentarán los resultados obtenidos de la experimentación, se continuará ubicando la tecnología analizada respecto a sus alternativas y se concluirá con un dimensionamiento básico, necesario para satisfacer los requerimientos energéticos de los equipos que se pretenden alimentar con los prototipos.
5. Conclusiones y líneas futuras: En este apartado se finalizará el trabajo llegando a la propuesta de una solución, en base a los resultados obtenidos, y estableciendo unas líneas generales para que, en caso de darse la situación, poder continuar con el desarrollo de esta idea.

2 ESTADO DEL ARTE

2.1 El submarino

2.1.1 Inicios del submarino

Partiendo de la definición de “submarino” como una nave capaz de sumergirse bajo el agua y navegar a través de ella [12], el primer submarino del cual se tiene constancia es el creado por Cornelius Jacobszoon Drebbel en 1620 (Figura 2-1), aunque fue una tercera versión de este el que fue empleado en una demostración ante el rey de Inglaterra, Jaime I; donde navegó a una cota de en torno a 4,5 metros de profundidad, desde Westminster hasta Greenwich [13].



Figura 2-1 Réplica del submarino de Drebbel [14]

Años posteriores surgiría el primer submarino de uso militar, el “Turtle” (Figura 2-2), de manos del americano David Bushnell. Este fue empleado por el sargento Ezra Lee en 1776 durante la Guerra de Independencia de los Estados Unidos para tratar de hundir un barco británico, fracasando en su misión. Franceses y alemanes no tardarían en crear su versión, surgiendo así el “Nautilus” de Robert Fulton en 1800, cancelado 4 años después, y el “Brandtaucher” de Wilhelm Bauer en 1851[15].

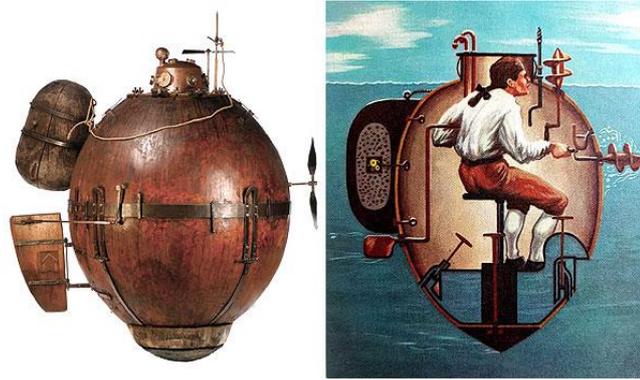


Figura 2-2 Modelo del "Turtle" [16]

En 1862 la Armada Estadounidense de la Unión obtuvo su primer submarino, el "Alligator", el cual funcionaba permitiendo que un buzo colocara minas en el barco objetivo; mientras que el bando de los Confederados construyó el "H.L Hunley" (Figura 2-3), el cual consiguió, el 18 de febrero de 1864, convertirse en el primer submarino en hundir un barco, el "USS Housatonic". Desgraciadamente, el submarino también se hundió en la batalla [17].



Figura 2-3 Réplica del "H.L Hunley" [18]

En el 2 de octubre de 1864, Narciso Monturiol bota en el puerto de Barcelona el primer submarino con propulsión mediante un motor de combustión, el "Ictíneo II" (Figura 2-4). Este se propulsaba mediante vapor en superficie y con una mezcla de zinc, peróxido de manganeso y clorato de potasio en inmersión, aunque también aprovechaba la mezcla para la generación de oxígeno. Además de este ingenioso sistema, también empleaba un doble casco, formado por madera de olivo y reforzada con madera de roble; y por cobre, para resistir la presión [19]. Pese a las grandes innovaciones que incorporaba, no consiguió que su proyecto prosperara debido a la falta de apoyo institucional y económico [15].



Figura 2-4 Réplica del "Ictíneo II" en Barcelona [19]

Pocos años después, el nacimiento del primer submarino convencional, tal y como es conocido hoy en día, vendría de la mano de Isaac Peral y Caballero con su “Peral” (Figura 2-5). Este fue botado el 8 de septiembre de 1888 en el arsenal de La Carraca, Cádiz, y empleaba una batería de 613 acumuladores, que le otorgaban una autonomía máxima de 396 millas náuticas, dos motores eléctricos refrigerados y dos hélices para propulsarse, lo que le permitían alcanzar 9,8 nudos en superficie y entre 3 y 4 nudos en inmersión. Además, incorporaba un sistema de renovación de aire, un “aparato de profundidades”, que le permitía mantenerse a una profundidad constante de forma automática, un sistema de compensación de aguja magnética, una corredera eléctrica para navegación de estima, un periscopio y un tubo para lanzar los tres torpedos que era capaz de portar. De hecho, el “Peral” superó una gran variedad de pruebas, entre las cuales estaban: prueba de estanqueidad, inmersión estática y dinámica, navegación en superficie y en inmersión, pruebas de velocidad y autonomía y lanzamiento de torpedos. También se previó el paso del Estrecho de Gibraltar en inmersión, para no ser visto, aunque esta última prueba no llegó a realizarse. Pese a la fama que obtuvo, la Armada Española acabó cancelando el proyecto, por lo que no se continuó con su desarrollo [20].



Figura 2-5 Casco del submarino "Peral" expuesto en el Museo de Cartagena [21]

Tras el revuelo internacional que causó el prototipo español, se comenzaron a desarrollar nuevas tecnologías y armas submarinas. Así, en 1900 el francés Maxime Laubeuf y el español Raymondo Lorenzo d'Equivilley Montjustin, dieron vida al “Narval”, primer submarino en emplear un doble casco moderno, y el cual evolucionó al “Aigrette” en 1904, que incorporó un motor de combustión para navegación en superficie [17]. En los años siguientes llegaron curiosas innovaciones, como el submarino para portar aviones de patrulla, como el “HMS M2” (Figura 2-6); el submarino para aprovisionamiento a otros buques, o incluso el torpedo tripulado. A pesar de esto, el submarino en empleo militar no obtuvo la consideración e importancia, desde el punto de vista del planeamiento táctico, hasta la 1ª y 2ª Guerra Mundial, gracias a la influencia que tuvieron los U-Boote alemanes en el Atlántico [15].

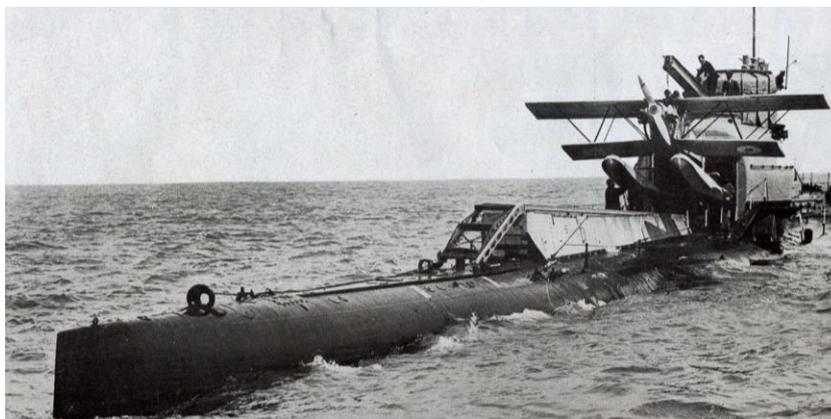


Figura 2-6 Hidroavión despegando desde el submarino "HMS M2" [22]

Posteriormente, en 1955 se botaría en Estados Unidos el primer submarino de propulsión nuclear, bautizado como “Nautilus” (Figura 2-7), y cuyo padre fue Hyman Rickover. Este consiguió diversas hazañas, tales como recorrer la distancia entre Connecticut y Puerto Rico en 84 horas, diez veces menos que el récord existente hasta entonces; consiguió mantenerse sumergido durante una hora a una velocidad de 23 nudos, y fue el primer submarino en atravesar el Polo Norte sumergido, demostrando la superioridad estratégica que aportaba la propulsión nuclear frente a la propulsión convencional [15].

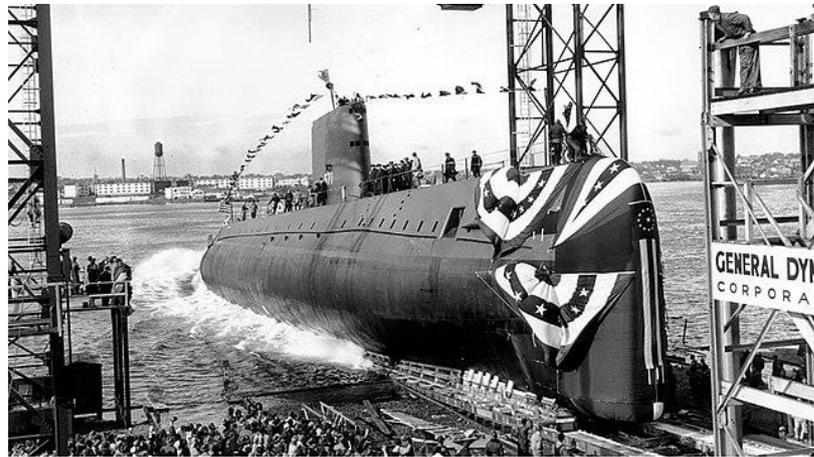


Figura 2-7 Botadura del SSN-571 "Nautilus" [23]

Desde entonces hasta nuestros días, submarinos nucleares y convencionales han convivido, siendo empleados cada uno en aquellas zonas geográficas donde obtienen mejores resultados, y efectuando las misiones para las que cada tipo de submarino fue diseñado, ya sea para misiones de disuasión nuclear, vigilancia marítima, inserciones de operaciones especiales (Figura 2-8), espionaje, etc.



Figura 2-8 Submarino en ejercicio de inserción de un equipo de operaciones especiales [24]

2.1.2 Necesidad de “respirar” y moverse bajo el agua

Desde los inicios del submarino, dos de los principales problemas básicos que fueron indispensables resolver han sido: la necesidad de proporcionar oxígeno a bordo suficiente para todos los ocupantes, si realmente se pretendía mantener sumergido durante un largo periodo de tiempo; y la capacidad de poder sumergirse, desplazarse por debajo de la superficie y emerger a discreción de sus ocupantes, venciendo a su vez la oposición del propio medio (Corrientes marinas, oleaje, rozamiento hidrodinámico, presión hidrostática...). Por ello, los distintos submarinos se han ido adaptando a los recursos, capacidades y conocimientos de la época para lograr los cometidos mencionados anteriormente.

Por un lado, enfocando primeramente el problema de “respirar” bajo el agua, los primeros submarinos no contenían más oxígeno que el que quedaba atrapado al cerrar la escotilla de acceso, por lo que sus tripulaciones se veían obligadas a navegar en superficie y sumergirse solo para el momento del ataque a su objetivo, lo que significaba que sus autonomías eran mínimas. Entre estos casos se pueden encontrar el submarino de Drebbel (Figura 2-1) o el “H.L Hunley” (Figura 2-3) entre otros [15].

Conforme se fueron ampliando los conocimientos y recursos, se pudieron implementar mejores sistemas, tales como el uso de tanques de aire comprimido en el “Alligator” de la Armada Estadounidense de la Unión; un sistema de renovación del aire como el “Flach” (Figura 2-9) chileno de Karl Flach; o el submarino español “Ictíneo II” (Figura 2-4) de Narciso Monturiol [15].



Figura 2-9 Recreación 3D del "Flach" [25]

De esta forma, se han ido empleando nuevas técnicas y materiales hasta llegar a los actuales submarinos, los cuales emplean la electrólisis para obtener oxígeno del agua del mar. Esto les permite permanecer sumergidos de forma indefinida, siempre y cuando dispongan de energía eléctrica suficiente para alimentar dichos equipos.

Por otro lado, una vez solucionado el primer problema, queda centrarse en el segundo. El hombre lo ha solucionado aplicando unas soluciones que, al igual que en el anterior caso, se han visto condicionadas por los conocimientos y los recursos disponibles en cada etapa de la historia. Por tanto, en los inicios del submarino, el problema del desplazamiento, tanto en superficie como en inmersión, se subsanó empleando la fuerza de las propias personas, que accionaban un mecanismo que creaba el empuje necesario; ya fuese mediante remos, como en el submarino de Drebbel (Figura 2-1); o empleando una hélice, como hizo Bushnell en su “Turtle” (Figura 2-2) o Wilhelm Bauer en su “Brandtaucher” (Figura 2-10) [15].



Figura 2-10 Submarino "Brandtaucher" expuesto en Dresden [26]

Años más tarde, el capitán Bourgeois y Charles Brun crearían el submarino “Plongeur” (Figura 2-11), el cual implantaría una alternativa a la propulsión humana, ya que fue el primero en utilizar aire comprimido para accionar una hélice [17]. Tras esto, surgiría otra alternativa, implementada en el “Ictíneo II” (Figura 2-4) de Monturiol, empleando un motor accionado por vapor, producido por la combustión del carbón o por una mezcla de peróxido de manganeso, zinc y clorato de potasio [19]. Gracias a esto, se llegó a la que ha sido la alternativa reinante en los submarinos convencionales, el motor eléctrico del submarino “Peral” (Figura 2-5). Este ha ido mejorando su eficiencia con el paso del tiempo, pero se ha mantenido hasta nuestros días, donde convive con la propulsión nuclear, tecnología surgida en 1955 con el “Nautilus” (Figura 2-7), el cual demostró ampliamente su superioridad en cuanto a potencia entregada y autonomía en inmersión se refiere.

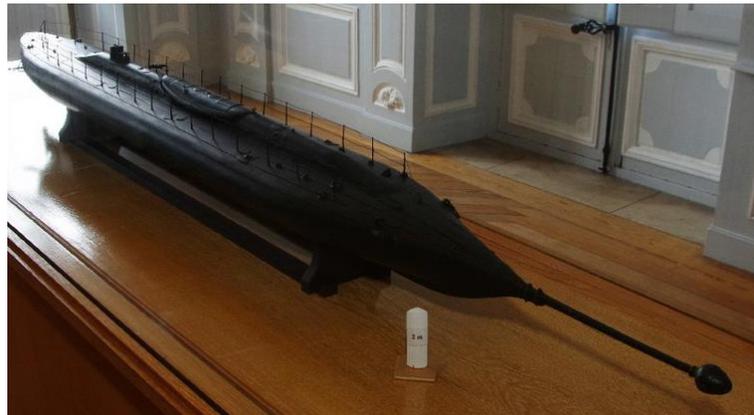


Figura 2-11 Maqueta a escala del submarino "Plongeur" [27]

2.2 Clasificación de submarinos

Realizando una visión global de los submarinos militares existentes hoy en día alrededor del globo, se pueden diferenciar tres grandes grupos, según el sistema empleado para propulsarse: submarinos de propulsión nuclear, submarinos convencionales, y submarinos con propulsión independiente del aire.

2.2.1 Convencional diésel-eléctrico

Siguiendo un orden cronológico, el primer tipo de submarino que se obtiene es el convencional de propulsión diésel-eléctrica (Figura 2-12). Este es aquel que emplea un motor diésel, asociado a uno o varios generadores, para generar electricidad y alimentar el conjunto de baterías, equipos auxiliares o el sistema de propulsión, formado principalmente por uno o varios motores eléctricos [28].

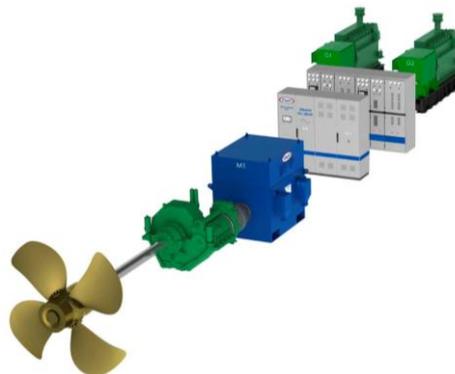


Figura 2-12 Esquema de funcionamiento de propulsión diésel-eléctrica [29]

Este sistema tiene, entre sus principales ventajas, la de que emplea una tecnología más que probada, conocida y fácil de integrar, además de que este tipo de propulsión, cuando se navega con los motores

de combustión apagados empleando únicamente las baterías, son muy silenciosos, dificultando en gran medida su detección [30].

Como mayor desventaja, el submarino convencional carece de una extensa autonomía cuando se trata de navegar en inmersión, donde no le es posible arrancar los motores de combustión, ya que el conjunto de baterías que emplea para alimentar todos los equipos y sistemas de a bordo no permiten permanecer más de uno o dos días sumergido sin recargarse. Esta recarga, se realiza mediante una maniobra ideada en Holanda, se denomina “snorkel” y consiste en una serie de operaciones mediante las cuales, el submarino emplea los motores diésel para propulsarse y recargar sus baterías, como se puede observar en la Figura 2-13, a costa de sacrificar la discreción e indetectabilidad que le caracteriza [30].

La maniobra de “Snorkel” comienza con el submarino ascendiendo hasta cota periscópica, que es aquella donde, al izar sus antenas, periscopios, etc, sobresalen de la superficie del mar; o emerge totalmente sobre la superficie, indistintamente. Una vez en la cota adecuada, se iza el mástil de inducción, por donde entrará el aire necesario para los motores de combustión, además de servir para renovar el aire interno del propio submarino. Este mástil dispone de una tapa, conocida como válvula de cabeza, para evitar que entre agua al interior en caso de oleaje o expulsarla en caso de que entrara, produciendo los llamados “taponazos”. Por último, los gases de combustión generados por los motores son evacuados a mayor presión que la ejercida por el agua a través de una válvula de exhaustación, lo que evita que entre agua al interior por el escape [31].



Figura 2-13 Submarino convencional realizando snorkel [32]

Adicionalmente, entre los submarinos convencionales de propulsión diésel-eléctrica se pueden distinguir dos variantes en función de las capacidades que posean: submarinos de ataque (SSK), destinados a misiones de inteligencia, operaciones especiales y ataque a unidades de superficie y/u otros submarinos, mediante torpedos y minas; y submarinos tácticos (SSG), que, a las capacidades citadas anteriormente, añade la de ataque a objetivos terrestres mediante el empleo de misiles [31].

2.2.2 *Energía nuclear*

En este tipo de submarinos se emplea material radioactivo consistente en una aleación de Uranio y Zirconio, con la salvedad de que está enriquecido en U-235 ya que son necesarios reactores más compactos [33]. Estos reactores, como el del esquema de la Figura 2-14, se componen de dos ciclos: un primer ciclo donde se produce la fisión nuclear en el reactor, el cual calienta un circuito cerrado de agua y genera vapor; y un segundo ciclo donde se extrae la energía del vapor, ya sea para generar electricidad o para mover el eje con la hélice; y posteriormente se condensa, reiniciando el ciclo completo.

Para el correcto control y seguridad del personal embarcado, existen sistemas de refrigeración del reactor (uno en cada ciclo), para evitar el sobrecalentamiento del mismo, y un blindaje dividido en dos

partes, uno primario, formado por materiales como agua y plomo, rodeando directamente el reactor para proteger de los neutrones, la radiación gamma y evitar la contaminación del segundo circuito de refrigeración; y uno secundario, formado por hormigón, plomo y polietileno, para frenar los neutrones que pudieran traspasar el primer blindaje y la expansión de la radiación por el resto del submarino [33].

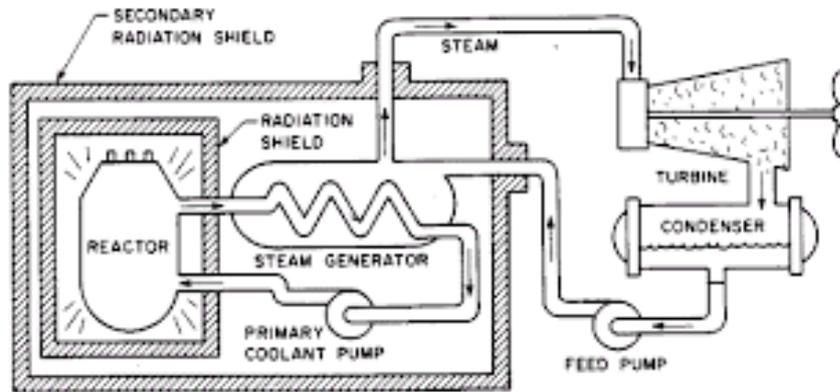


Figura 2-14 Esquema general de un reactor nuclear empleando una turbina de vapor [33]

La mayoría de los submarinos nucleares de hoy en día, emplean reactores del tipo de agua presurizada y, aunque se estudió un segundo tipo refrigerado por sodio líquido, el cual obtenía mayor densidad de energía, representaba una mayor peligrosidad. Respecto al número de estos, suele variar entre un único reactor, que alimenta todo el submarino, o dos reactores que se dividen los equipos y baterías, por un lado, y la propulsión por otro. En cuanto al funcionamiento de la planta, varía en función de la nación, ya que por ejemplo EE. UU., Rusia y Reino Unido emplean la propulsión por turbina de vapor; mientras que Francia y China emplea el reactor nuclear para generar electricidad que alimente un motor eléctrico y sus baterías [33].

Al igual que ocurre en los submarinos convencionales, dentro de los submarinos nucleares se pueden apreciar tres grupos, en función de la misión que llevan a cabo: submarinos de ataque (SSN), empleados para las mismas misiones que los SSK; submarinos tácticos (SSGN), capaces de portar misiles de ataque a objetivos en tierra; y submarinos balísticos o estratégicos (SSBN) (Figura 2-15), portadores de misiles balísticos y que hoy en día son empleados para la disuasión nuclear [34].



Figura 2-15 Submarino tipo SSBN ruso de la clase "Typhoon" [35]

2.2.3 Propulsión Independiente de Aire (AIP)

Por último, los últimos en establecerse en el mercado fueron los submarinos anaerobios, o con propulsión independiente de aire (AIP). Teniendo en cuenta el significado estricto del término, un submarino nuclear también obtiene su energía sumergidos y de forma independiente al aire atmosférico, pero el término “AIP” viene siendo empleado para aquellos submarinos convencionales que tratan de ampliar o mejorar sus prestaciones. Por ello, este sistema no sustituye al motor diésel, sino que lo complementa, por lo que en los submarinos actuales los sistemas AIP entran en acción en las situaciones donde no puede hacerlo el sistema convencional, como se puede apreciar en la Figura 2-16, por lo que consiguen un importante incremento en su autonomía en inmersión y una reducción de la firma acústica y térmica; además de ser más respetuosos medioambientalmente [36].

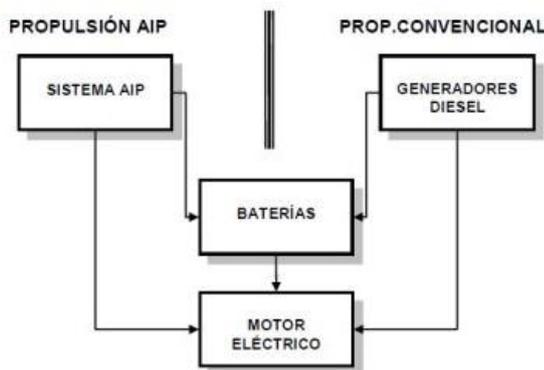


Figura 2-16 Esquema general de propulsión AIP [36]

Desde sus antecesores, que marcarían el nacimiento de esta tecnología, con el “Ictíneo II” de Narciso Monturiol (Figura 2-4) y su mezcla de zinc, peróxido de manganeso y clorato potásico; estos sistemas han sido muy variados ya que se han basado en tecnologías diferentes, pero actualmente, entre las distintas marinas del mundo se pueden distinguir cinco grandes grupos: el motor Stirling, empleado por Suecia (Figura 2-17), Singapur y Japón; el sistema francés MESMA, empleado por la marina de Pakistán (Figura 2-18), y el sistema mediante pilas de combustible, donde existen tres variantes principales, el sistema español de reformado de bioetanol, el sistema alemán de hidruros metálicos, y el sistema de depósitos criogénicos de hidrógeno empleado por la marina rusa [37].

2.2.3.1 Motor Stirling

Este sistema emplea un motor, como su propio nombre indica, de tipo Stirling de combustión externa para generar la electricidad requerida por el submarino. En su interior, existe una cantidad de Helio, sellado herméticamente, que es calentado por una cámara de combustión externa quemando gasoil y oxígeno. De esta forma, alterando la presión en el interior de los cilindros, se produce el movimiento del motor, que es transmitido a través de un cigüeñal a un alternador, produciendo así la electricidad necesaria para alimentar el motor eléctrico y el resto de los sistemas del submarino [36].



Figura 2-17 Submarino AIP sueco clase "Gotland" en dique seco [38]

2.2.3.2 MESMA (*Module d'Énergie Sous-Marine Autonome*)

Este sistema emplea una turbina de vapor de ciclo cerrado. Este funcionamiento es similar al de los submarinos nucleares, ya que está formado por dos etapas, una de generación de vapor y otra de obtención de la energía eléctrica para el motor eléctrico y cargar baterías. La principal diferencia respecto a la propulsión nuclear radica en el tipo combustible, pues en lugar de emplear material radioactivo para alimentar un reactor, se emplea etanol, o diésel, y oxígeno como combustibles para generar vapor y mover una turbina acoplada a un generador [37].



Figura 2-18 Submarino AIP pakistání PNS "Hamza" con sistema MESMA [39]

2.2.3.3 Pila de combustible

Una pila de combustible consiste en un dispositivo electroquímico que aprovecha la reacción química entre el hidrógeno y el oxígeno para obtener energía eléctrica. Esta ofrece ciertas ventajas respecto a un motor de combustión: un mayor rendimiento, lo que se traduce en mayores autonomías en inmersión; un menor impacto ambiental, menor firma infrarroja, menor firma acústica, ya que no requieren tantos elementos mecánicos; y el agua, generada como único residuo puede ser expulsada del submarino o empleada para la compensación de pesos a bordo [28].

Entre las distintas variantes de pilas de combustible, las existentes hoy en día son: la pila de combustible formada por hidruros metálicos, del grupo ThyssenKrupp Marine Systems, empleada en los submarinos "Tipo 212" de la Marina Militare italiana o la Deutsche Marine alemana; la pila de combustible de bioetanol de las empresas españolas Navantia/Hynergreen, que se implementará en los submarinos de la serie S-80 de la Armada Española (Figura 2-20); y la pila de combustible empleada

por la empresa Rubin Design Bureau, que emplea depósitos criogénicos de hidrógeno y oxígeno líquidos en los submarinos de la clase "Lada" (Figura 2-19) [37].



Figura 2-19 Submarino AIP ruso de la clase "Lada" [40]

En cuanto al funcionamiento de la pila de combustible basada en hidruros metálicos, el hidrógeno viene "almacenado" en cilindros que contiene a las aleaciones y, cuando se disminuye la presión a la que estas están sometidas, liberan el hidrógeno, que es llevado hacia la pila de combustible, donde se mezcla con el oxígeno, desprendiendo la energía necesaria para hacer funcionar los sistemas del submarino, como la propulsión. Su principal desventaja es que el aprovechamiento de los tanques de hidruros es escaso, pues la cantidad de hidrógeno supone entre el 1% y 7% en peso, lo que obliga a llevar grandes cantidades de hidruros, aumentando el desplazamiento del submarino y disminuyendo el espacio libre en el interior [41].

Respecto a la propuesta española, esta emplea bioetanol, una fuente de energía renovable, y cuyo proceso de obtención de electricidad se divide en dos etapas. En la primera, se obtiene el hidrógeno mezclando bioetanol con agua/oxígeno en un reformador; y en la segunda etapa se emplea el hidrógeno, junto con oxígeno líquido, para producir la electricidad en la pila de combustible. Como desecho solamente se genera monóxido de carbono, el cual es eliminado hacia el exterior [41].



Figura 2-20 Submarino AIP español S-81 "Isaac Peral" [42]

2.3 Los supercapacitores

2.3.1 Qué es un supercapacitor

Primeramente, un capacitor, o también llamado condensador, es un elemento capaz de almacenar energía eléctrica para suministrarla en cualquier otro momento. La unidad que hace referencia a la capacidad de un condensador es el faradio (F), en honor a Michael Faraday, aunque la capacidad de un condensador convencional es del orden de microfaradios (uF) o nano faradios (nF); mientras que la de

un supercapacitor, cuya principal diferencia reside en que su capacidad de almacenamiento de energía es mayor, es del orden de miles de Faradios [6].

Respecto a la estructura general de un supercapacitor, este se compone principalmente de dos electrodos, generalmente de un material de carbono muy poroso (carbón activo, grafeno, etc.); un electrolito y un material dieléctrico (Figura 2-21). Sobre el funcionamiento de un supercapacitor, cuando se le aplica una diferencia de potencial entre sus placas, el material entre los electrodos se polariza, lo que significa que el condensador comienza a cargarse. Este se cargará hasta alcanzar la misma cantidad de carga que la batería o fuente de tensión a la que esté conectado, pero con signo contrario; y se comenzará a descargar, cediendo la energía almacenada, cuando comience a disminuir la tensión en el circuito, volviendo el material dieléctrico a su estado inicial [43].

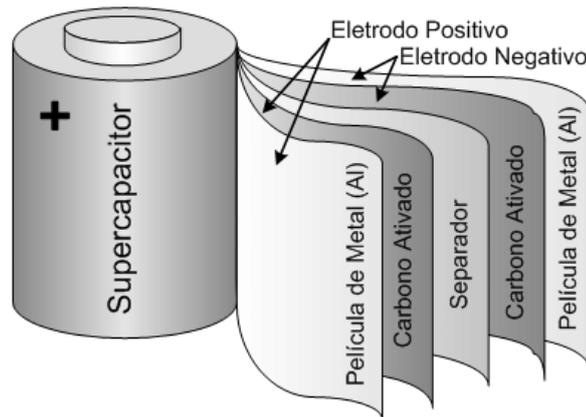


Figura 2-21 Dibujo esquemático de las partes de un supercondensador [44]

La capacidad, o capacitancia, de un supercapacitor se ve afectada por distintas variables, aunque, de forma general, tal y como se puede observar en la ecuación (Ec. 1), destacan tres: la superficie de los electrodos (A), que influye de forma directamente proporcional en la capacitancia, ya que cuanto mayor sea esta superficie, mayor cantidad de carga se podrá almacenar en su interior; la distancia existente entre las placas (e), que influye de manera inversamente proporcional, pues el campo eléctrico necesario para crear la carga en la placa contraria será mayor cuanto menor distancia haya entre placas; y el material del que esté compuesto el dieléctrico, que se traduce en la constante dieléctrica (k) e influye de manera directamente proporcional. Esta constante es la razón existente entre la capacidad del supercondensador con un dieléctrico de un determinado material y la capacitancia de un supercondensador cuyo dieléctrico es el vacío. Esta constante no debe confundirse con la ruptura dieléctrica, que equivale a la máxima diferencia de potencial que el dieléctrico es capaz de soportar sin conducir la electricidad. De alcanzarse ese valor, causaría la ruptura del dispositivo, ya que no se podría aislar un electrodo del otro [45].

$$C = k \frac{A}{e} \quad (\text{Ec. 1})$$

Puesto que el supercondensador almacena una cantidad de carga en su interior, esta se puede expresar en forma de energía, según la ecuación (Ec. 2), donde se puede observar cómo la cantidad de energía almacenada es función de la capacidad y de la diferencia de potencial existente entre sus placas [6].

$$E = \frac{C V^2}{2} \quad (\text{Ec. 2})$$

2.3.2 Tipos de supercapacitores

Los supercapacitores se pueden clasificar en tres tipos principales según su principio de funcionamiento: supercapacitores eléctricos de doble capa (EDLC), supercapacitores con pseudocapacitancia y supercapacitores híbridos [46].

2.3.2.1 Eléctricos de doble capa (EDLC)

Los EDLC, del inglés Electric Double-Layer Capacitor, se caracterizan por tener electrodos fabricados en carbono con una alta porosidad, como los carbonos activos, los aerogeles de carbono o los nanotubos de grafeno; ya que este material multiplica la superficie disponible en los electrodos. Su principio de funcionamiento consiste en que, al aplicar una diferencia de potencial entre sus electrodos, se polarizan tanto sus electrodos como el líquido electrolítico que contienen, dando lugar a la segunda capa electroquímica. Es por ello por lo que su funcionamiento se basa en un alineamiento de cargas, tal y como se puede apreciar en la Figura 2-22, es decir, un proceso puramente físico donde no se produce una transferencia de carga entre los electrodos y el electrolito, por lo que es un método más parecido al de un capacitor convencional, lo que permite muy altas tasas de reversibilidad y reutilización sin perder eficiencia. [47].

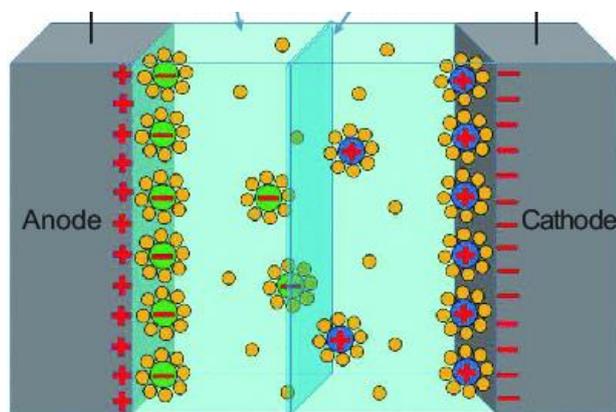


Figura 2-22 Esquema de un EDLC [48]

2.3.2.2 Supercapacitor con pseudocapacitancia

Este tipo de supercapacitores se caracterizan por utilizar esta propiedad, producida por una reacción química de oxidación-reducción entre electrodos y electrolito, para almacenar energía de una forma faradaica, tanto en los electrodos como en el electrolito. Estos, además destacan por tener una capacidad variable, ya que el fenómeno en que se basan varía con el voltaje, por lo que requieren cierto cuidado a la hora de someterse a una determinada diferencia de potencial o voltaje. Pese a esto, son capaces de trabajar en los rangos de voltaje habituales de un capacitor convencional y ofrecer una gran capacidad, la cual suele ser mayor que en los de doble capa [47].

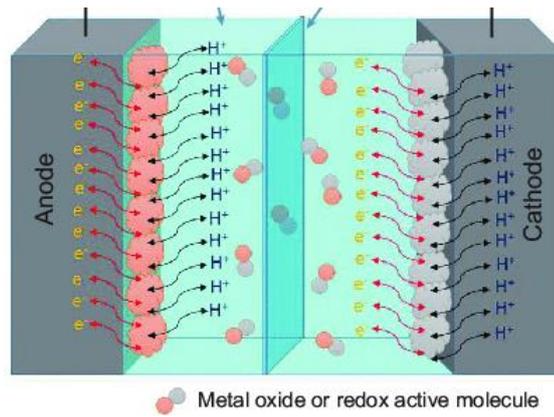


Figura 2-23 Esquema de un supercapacitor con pseudocapacitancia [48]

Dentro de este tipo de supercapacitores, se pueden encontrar dispositivos fabricados con electrodos de polímeros conductores, donde un electrodo hace de polo negativo y otro de positivo. Estos, pese a su menor coste y lograr una gran capacitancia en las pruebas de laboratorio, han sido lastrados por su eficiencia y por la disminución de su estabilidad tras muchos ciclos de carga y descarga. También se han desarrollado dispositivos con electrodos basados en óxidos metálicos (Figura 2-23), como el de óxido de Rutilio, capaces de conseguir mejores cifras de almacenamiento de energía que su competencia, pero poseen un precio de mercado muy superior a sus alternativas [49].

2.3.2.3 Híbridos

Estos buscan combinar las mejores características de los dos tipos mencionados anteriormente, en una, combinando procesos faradaicos y no faradaicos para conseguir almacenar una mayor cantidad de energía que los EDLC's sin que suponga tener que sacrificar parte de la estabilidad y asequibilidad en cada ciclo [46].

Dentro de los supercapacitores híbridos, existen tres variantes principales en función de la configuración de sus electrodos, los supercapacitores de electrodos compuestos, formados por carbono y polímeros conductores u óxidos metálicos en el mismo electrodo; los supercapacitores asimétricos, con un electrodo de carbón activo como polo negativo y otro de polímero conductor como polo positivo; y los supercapacitores electroquímicos de doble capa asimétricos (AEDLC, del inglés Asymmetric Electrochemical Double Layer Capacitors), también llamados popularmente “supercabatteries”, que emplean un electrodo tipo de un supercondensador y otro electrodo como el de una batería, los cuales han conseguido, en las primeras pruebas de laboratorio, combinar las características energéticas de las baterías con la potencia y durabilidad de los supercapacitores [49].

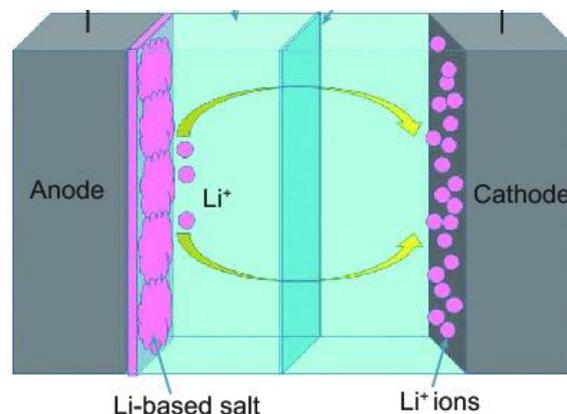


Figura 2-24 Esquema de supercapacitor híbrido tipo-batería [48]

2.3.3 Usos en la actualidad

Hoy en día, pese a que se siguen buscando nuevos posibles empleos para los supercapacitores, a la par que se siguen desarrollando mejoras de los actuales y analizando nuevas composiciones; ya se están empleando en la actualidad en gran cantidad de ámbitos y para diversas funciones. Algunas de estas son [50]:

- Sustitución de los actuales motores de arranque, principalmente en grandes vehículos, como en camiones o submarinos, gracias a su capacidad de aportar gran cantidad de energía en un corto periodo de tiempo.
- La compañía automovilística “Mazda” empleaba supercapacitores para su sistema “I-ELOOP” de frenada regenerativa, el cual conseguía almacenar y descargar mayor cantidad de energía en cuestión de segundos para alimentar los sistemas de climatización o de sonido, entre otros (Figura 2-25) [7].

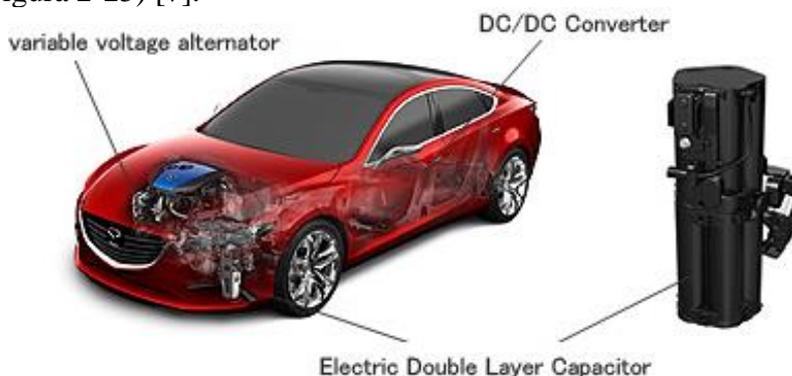


Figura 2-25 Ejemplo de sistema regenerativo de energía "I-Eloop" de Mazda [51]

- Estabilización de la tensión en sistemas de transferencia de potencia, en instalaciones de paneles solares o células fotovoltaicas, manteniendo constante la tensión del circuito y evitando posibles picos de tensión [50].
- En equipos electrónicos son empleados como sistemas de reserva energética ante cortes de suministro, evitando la pérdida de los datos almacenados en ordenadores, cámaras, ... [50].
- En instalaciones de energía eólica, como aerogeneradores, siendo empleados para mover los servomotores de las palas y ajustar el ángulo de alabeo, ya que requieren gran cantidad de energía en poco tiempo [50].
- Como apoyo a los sistemas de alimentación ininterrumpida, ya que, en caso de caída de tensión, pueden soportar la carga energética de la red durante el tiempo suficiente para arrancar los grupos generadores diésel o conectar los bancos de baterías [50].

2.3.4 Comparativa con una batería

Tras observar que los supercapacitores son un medio más para almacenar energía, no sería descabellado preguntarse en qué se diferencian estos con una batería convencional, ya que debe de existir diferencia entre ellos para que en la mayoría de los casos se decida por emplear baterías en lugar de supercapacitores.

Por un lado, debido a que emplean principios de funcionamiento distintos, un supercondensador es capaz de aportar una gran cantidad de energía en un breve periodo de tiempo, lo que viene reflejado en la propiedad llamada potencia específica, que suele ser del orden de diez veces mayor que en las baterías convencionales. A su vez, esto también le permite absorber energía, en el caso de necesitar recargarse, con la misma rapidez. Por el contrario, una batería, pese a no poder ofrecer las mismas cifras en cuanto a velocidad de carga/descarga y potencia específica, supera a un supercondensador en densidad energética, la cual expresa la cantidad de energía que es capaz de almacenar un dispositivo por unidad

de masa. Una forma clara de comparar estas cualidades es mediante el Diagrama de Ragone (Figura 2-26), el cual compara la densidad energética específica con la potencia específica de distintos dispositivos de almacenamiento de energía [6].

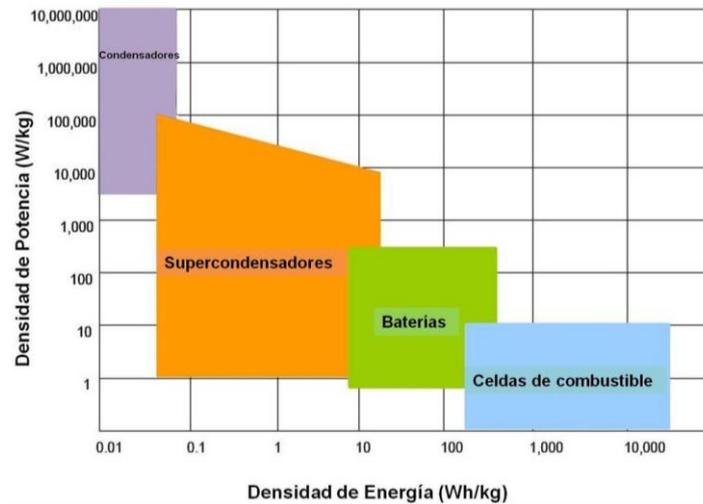


Figura 2-26 Ejemplo de Diagrama de Ragone [52]

Al centrarse en los parámetros bajo los que puede trabajar cada dispositivo, un supercondensador ofrece mayores rangos de temperaturas de trabajo que una batería convencional, al igual que, por lo general, desprenden menos calor que estas, lo que les otorga una mayor eficiencia de trabajo. De la misma forma, los supercondensadores no se ven afectados en caso de realizar repetidos ciclos de carga y descarga por completo, mientras que, en las baterías convencionales, sus fabricantes recomiendan mantenerlas entre unos porcentajes de carga mínimos y máximos para prolongar al máximo su vida útil, la cual también es menor que en los supercondensadores [53].

Como contrapartida, un supercondensador, pese a ofrecer su energía de forma más rápida, no lo hace de forma lineal, como sí lo hace una batería, lo que imposibilita poder emplear todo el espectro de energía de este. De igual forma, poseen una tasa de auto descarga mayor que las baterías, y durante su carga y descarga, requieren un control de la tensión más sofisticado, al igual que una tensión de trabajo inferior, por lo que, en caso de necesitar altos voltajes, requieren montajes de varios supercapacitores en serie [53].

Desde un punto de vista medioambiental, los supercapacitores ofrecen mayores ventajas que las baterías. Estos son más seguros que las baterías y, a su vez, emplean piezas no tóxicas para el medio ambiente en su estructura, lo que los hace más fáciles de reciclar y reutilizar, aunque como desventaja, su precio promedio medio es superior al de las actuales baterías [47]. A modo de resumen, en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se comparan las principales ventajas y desventajas de los supercapacitores respecto a las baterías convencionales.

Ventajas	Desventajas
Gran potencia específica	Poca densidad energética
Velocidad de carga/descarga	Sin descarga lineal de energía
Mayor vida útil	Mayor tasa de auto descarga
Desprenden poco calor	Requieren control sofisticado de tensión
Mayor rango de temperaturas	Más caros

Tabla 2-1 Comparativa ventajas/desventajas de un supercapacitor frente a una batería

2.4 Metodología de Superficie de Respuesta (MSR)

La metodología de superficie de respuesta consiste en un conjunto de técnicas, tanto estadísticas como matemáticas, que son empleadas para analizar diversos problemas en los que una variable de interés, también llamada variable de respuesta se ve influenciada por otras variables, llamadas factores, que son de carácter cuantitativo. A su vez, también busca optimizar, determinando un modelo matemático que se ajuste a los resultados obtenidos durante la experimentación, la variable de respuesta, aportando unos valores determinados para los factores que generarían la máxima optimización de dicha variable de respuesta. La expresión general de esta metodología refleja la respuesta óptima (Y) como función de los factores cuantitativos (X_1) más un error (ϵ), de carácter experimental, tal y como se muestra en la expresión (Ec. 3) [54].

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_k) + \epsilon \quad (\text{Ec. 3})$$

Es debido a la relación entre la variable de respuesta con los distintos factores, de número total k, que, al representarse gráficamente, se obtendrá una superficie, la cual se encontrará en un número de dimensiones k+1. Por lo tanto, si el número de factores es 1, la superficie de respuesta se encontrará en 2 dimensiones [55]. En cuanto a la forma de representar la región experimental, donde se puede apreciar los valores óptimos, esta se puede hacer mediante gráficas de contornos y gráficas de superficie.

En las gráficas de contorno (Figura 2-27) se pueden apreciar con mayor facilidad la forma de las distintas capas que posee la superficie de respuesta, ya que, de manera análoga a un mapa topográfico o a un mapa de isobaras, los valores iguales de respuesta vienen representados por una única curva que los une, como en caso de las alturas de un terreno o las zonas con igual presión en los ejemplos anteriores; lo que ayuda a centrarse en aquellas regiones donde ocurren cambios de altura en la superficie de respuesta [55].

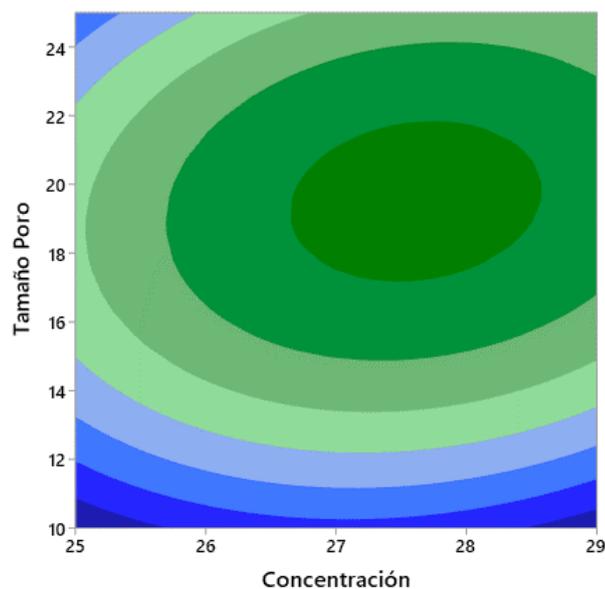


Figura 2-27 Ejemplo de gráfica de contorno Concentración-Tamaño de poro

Por otro lado, las gráficas de superficies muestran con mayor facilidad la forma que tiene toda la superficie de respuesta, es decir, permiten ver los valores de la variable de respuesta según los factores que se tengan en cuenta. De modo práctico, permite ver qué inclinaciones y formas tiene la región experimental, tomando como ejes de coordenadas los distintos factores estudiados en el ensayo.

Respecto a las formas de superficies que pueden encontrarse, destacan la de montaña, con un máximo; con forma de valle, con un mínimo; forma de silla de montar (Figura 2-28), donde la respuesta aumenta o disminuye desde el centro de la superficie; con cresta ascendente, donde se presupone que existe un máximo, pero al no encontrarse dentro de la región estudiada no puede visualizarse; y la forma de cresta descendente, de similares características que la anterior, pero donde se presupone la existencia de un mínimo.

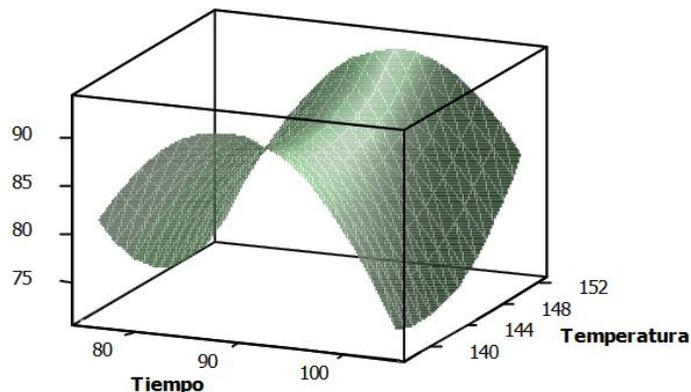


Figura 2-28 Ejemplo de gráfica de superficie con forma de silla de montar [56]

Entrando en detalle en la metodología paso a paso, el método parte de la base de que no se conoce en qué lugar de la región nos encontramos, si en un lugar llano o en mitad de una pendiente, al igual que se desconoce la relación entre la respuesta y el resto de las variables. Por tanto, se debe realizar una reducción de dimensionalidad, donde se escojan los factores que más significativos sean en la respuesta. Para ello, existen métodos como el análisis de varianza (ANOVA) o la realización de un experimento factorial, por ejemplo [56].

Tras la reducción, se debe emplear un diseño de primer orden, como los diseños de Placket-Burman o diseños fraccionados, entre muchas otros. Todos ellos emplean un polinomio de primer orden para expresar las relaciones entre los factores y la respuesta, al igual que cualquiera de ellos servirá para confirmar la influencia significativa de los factores escogidos sobre la variable de respuesta y estimar un modelo que describa el comportamiento de la respuesta en función de estos, lo que nos permitirá conocer en qué dirección se debe continuar para comenzar a “subir la pendiente” [56].

Por último, una vez se haya localizado una región de menor tamaño donde se encuentre el posible punto óptimo, se emplearán diseños con polinomios de segundo orden, entre los que destacan por ser los más comunes, el diseño Central Compuesto (DCC) y el diseño de Box-Behnken.

Tras este proceso, se concluiría con un proceso de análisis, donde se comprobaría la significancia de cada uno de los factores y si la curvatura de la superficie de respuesta en dicha región corresponde a un máximo o un mínimo, en función si se desea maximizar o minimizar la respuesta [54].

3 DESARROLLO DEL TFG

3.1 Metodología

Este trabajo toma como punto de partida la actual y creciente influencia que están teniendo los supercapacitores en el ámbito del almacenamiento de energía en el mundo del transporte, donde se está produciendo un gran cambio hacia la hibridación y electrificación de vehículos como autobuses urbanos, motocicletas, camiones, turismos e incluso barcos. Por lo tanto, este trabajo tratará de realizar un estudio sobre la posibilidad de implementación de supercapacitores de, tipo EDLC, en las unidades de la Armada Española, y más en particular, en los submarinos de los que se dispone actualmente, los S-70 de la clase “Galerna”, y los futuros S-80, de la clase “Isaac Peral”.

Para ello, se ha decidido que se analizarán dos prototipos cuyos componentes se ha tratado que fueran abundantes en la naturaleza, de fácil obtención y respetuosos con el medio ambiente, tanto de una forma directa, no emitiendo residuos durante su uso, como indirectamente, tras el fin de su vida útil y sea necesario su reciclado. Teniendo en cuenta estos criterios, y en base a la disponibilidad en el centro de trabajo, para fabricar los supercapacitores ha sido necesario agua destilada, cloruro de sodio (NaCl), o sal común, papel de filtro cualitativo con tres tamaños distintos de poro, papel de grafito, carbón activo, silicato de sodio (Na_2SiO_3) y sulfato de zinc ($ZnSO_4$). En la Figura 3-1 se puede observar una imagen del conjunto de los componentes requeridos para la elaboración de ambos dispositivos.

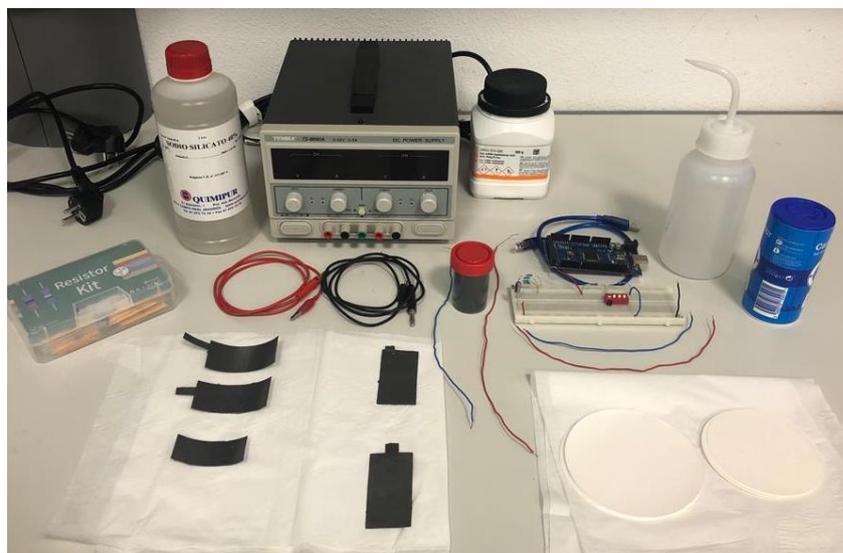


Figura 3-1 Conjunto de materiales empleados para el montaje

Respecto a los elementos empleados para medición y montaje del circuito, estos han sido una balanza de laboratorio, una placa de Arduino, una protoboard, cables para unir los distintos elementos y una fuente de alimentación de corriente continua para alimentar el circuito diseñado (Figura 3-2). Dicho circuito ha sido diseñado con el objetivo de que, mediante un interruptor, se pudiera cambiar entre un circuito que realizara la carga del supercapacitor, a través de la fuente de alimentación, y un circuito por donde se realizara la descarga de este, tras desconectarse la fuente de alimentación; tratando de evitar intervenir en la medida de lo posible en el circuito, y evitando vernos obligados a modificar parte del cableado cada vez que se quisiera cambiar de un modo a otro.

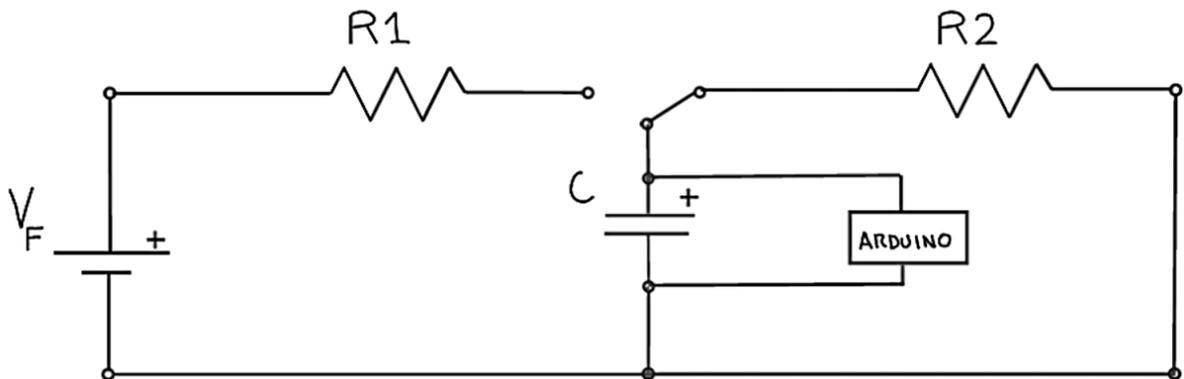


Figura 3-2 Esquema del circuito empleado en el montaje

Debido a la cantidad de factores bajo los que se ve afectado un supercondensador, como el voltaje, resistencia del circuito, concentración de electrolito, etc, y los cuales generarían un gran número de combinaciones posibles, en caso de querer probar todos y cada uno de ellos sería necesaria una cantidad de tiempo de la que no se disponía, por lo que, para estudiar el comportamiento obtenido como respuesta en la capacitancia, la densidad energética y la potencia específica media, se ha optado por emplear una metodología de superficie de respuesta para diseñar el experimento, en particular, un diseño del tipo Box-Behnken, el cual se ha llevado a cabo a través del software “Minitab”. En este tipo de diseño se requieren 3 factores considerados de carácter continuo, los cuales serán la concentración de la disolución en el electrolito, el tiempo de secado del mismo antes de realizar la medición y el tamaño de poro del separador; así como conocer los valores máximos y mínimos de estos entre los que se va a experimentar, los cuales serán determinados en los apartados siguientes. El diseño Box-Behnken ha sido elegido por ser menos costoso de realizar, ya que requieren menos puntos de diseño, además de que garantiza que todos los puntos de diseño empleados se encontrarán dentro de la zona de operación y no habrá puntos fuera de esta, como sí puede ocurrir en otros diseños.

Por otro lado, debido a que este tipo de diseño sólo permite el estudio de una única variable de respuesta, para realizar un análisis de las respuestas en capacitancia, densidad energética y en potencia específica media, se ha tenido que realizar un triple ensayo, donde las combinaciones de los factores continuos han permanecido iguales y se han variado únicamente las variables de respuesta.

Por último, puesto que se van a analizar 2 prototipos, y este tipo de diseño requiere de un mínimo de 15 combinaciones para poder realizar el ensayo completo, se han realizado un total de 30 combinaciones, 15 por cada dispositivo. En la Tabla 3-1 se muestran las combinaciones realizadas para uno de los análisis, en este caso, para la capacitancia, en el primero de los prototipos.

En cada una de estas combinaciones se ha empleado una versión diferente, donde se ha modificado la concentración de electrolito, el tipo de papel de filtro para poder variar el tamaño de poro del separador, y el tiempo de secado del electrolito antes de tomar las medidas.

Combinación	Concentración (%)	Tamaño de poro (um)	Tiempo de secado (min)
1	10	10	5
2	10	25	5
3	10	20	0
4	10	20	10
5	20	10	0
6	20	25	0
7	20	10	10
8	20	25	10
9	20	20	5
10	20	20	5
11	20	20	5
12	30	10	5
13	30	25	5
14	30	20	0
15	30	20	10

Tabla 3-1 Combinación de diseño Box-Behnken para respuesta en capacitancia

Antes de comenzar con los prototipos, se comprobó el correcto funcionamiento del circuito, al igual que el software de Arduino programado previamente, con otro dispositivo de prueba con placas de zinc como electrodos y un papel separador. Tras apreciar que los datos eran coherentes y gráficamente coincidían con los procesos de carga y descarga se procedió a la toma de medidas.

Para realizar las mediciones de voltaje en el dispositivo durante su descarga, se realizaron segundo a segundo a través de una placa de Arduino, previamente programada para dicha función. De igual forma, se realizaron 3 repeticiones en cada toma de medidas para obtener un valor medio final, el cual se pudiera estimar como más realista, pues de esta forma los resultados no se verían tan influenciados por posibles errores de medición puntuales, a diferencia de si se realizara una única medición. En la Figura 3-3 se puede apreciar, además de qué es cada uno de los elementos, cómo quedó el circuito tras conectarse a los equipos auxiliares de alimentación y medición para la realización de las pruebas.

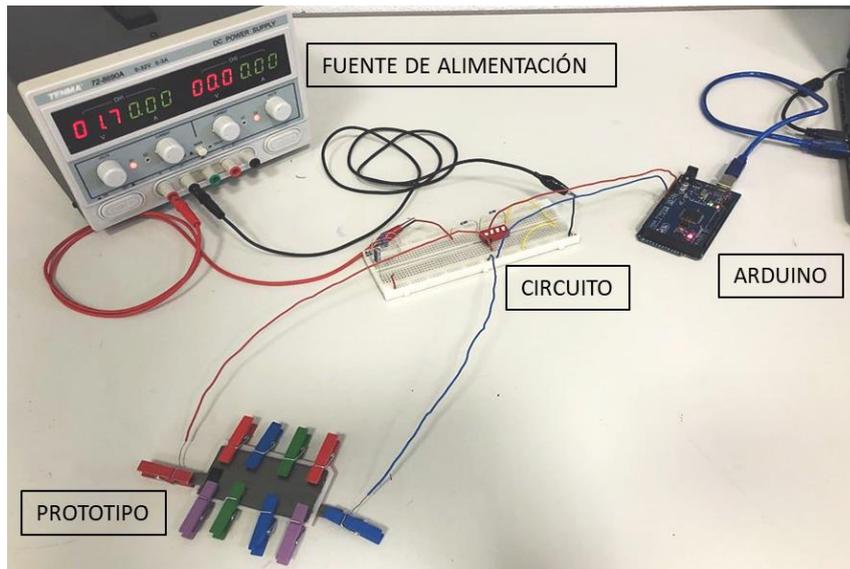


Figura 3-3 Disposición del circuito montado con equipos auxiliares durante una medición

Tras la toma de todos los valores, se introdujeron en una hoja de Excel, disponibles en el Anexo I y Anexo II, y donde, posteriormente, se realizaron los cálculos para obtener los valores de capacitancia, densidad energética y potencia específica del dispositivo, disponibles en el Anexo III y Anexo IV.

La capacitancia se obtendría empleando como base la ecuación (Ec. 4), donde V equivale al valor instantáneo del voltaje en el supercondensador, V_0 equivale al voltaje existente en el supercapacitor en el instante 0, R equivale a la resistencia existente del circuito, t se corresponde con el tiempo transcurrido, desde el comienzo de la medición, y C , a la capacitancia del dispositivo en cuestión [57].

$$V = V_0 e^{\frac{-t}{RC}} \quad (\text{Ec. 4})$$

Puesto que estos valores se corresponderían con un instante determinado, para obtener un valor de la capacidad genérico, se representará gráficamente la expresión (Ec. 5), de donde se obtendrá una recta de regresión de tipo lineal y de igual estructura que la expresión (Ec. 6), tal y como se muestra en la Figura 3-4. Por último, al conocer la constante α , permite obtener el valor de la capacitancia.

$$\ln\left(\frac{V}{V_0}\right) = \frac{-t}{RC} \quad (\text{Ec. 5})$$

$$\alpha t = \frac{t}{RC} \quad (\text{Ec. 6})$$

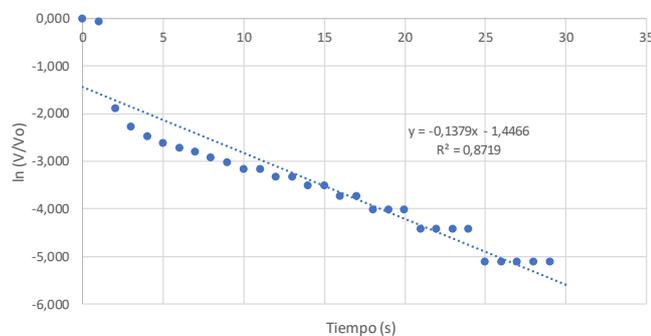


Figura 3-4 Ejemplo de gráfica de una de las mediciones

Para calcular la densidad energética del supercapacitor (U), se empleará la expresión (Ec. 2), la cual se dividirá por la masa del electrolito (m), según la expresión (Ec. 7). Para el cálculo de la potencia específica media (Pe) se empleará la expresión (Ec. 8), donde Δt equivale al período de tiempo total de la descarga [6].

$$U = \frac{E}{m} \quad (\text{Ec. 7})$$

$$P_e = \frac{E}{m \Delta t} \quad (\text{Ec. 8})$$

R (Ω)	S (m ²)	espesor (m)	α	m (kg)	C (F)	E (Wh)	U (Wh/kg)	Pe (W/kg)
10	0,00245	0,0002	0,1379	0,0003	0,725	0,000274	0,914	11

Tabla 3-2 Datos del prototipo y resultados obtenidos a partir de la Figura 3-4

3.1.1 Prototipos

Primeramente, cabe destacar que ambos prototipos pertenecen al grupo de los supercapacitores EDLC. El primero está compuesto por dos láminas de grafito, empleadas como electrodos, papel de filtro cualitativo a modo de separador y una disolución de agua y cloruro de sodio a modo de electrolito. Respecto al segundo prototipo, está compuesto con láminas de grafito, que trabajan como electrodos, papel de filtro cualitativo como separador y una disolución de agua y sulfato de zinc como electrolito. Además, se han recubierto las caras de los electrodos con una mezcla de agua, silicato de sodio y carbón activo, y que será empleada para aumentar la superficie de los electrodos, con el fin de obtener una mayor capacidad y mejor rendimiento del dispositivo.

Supercondensador 1	Supercondensador 2
Láminas de grafito	Láminas de grafito
Agua	Agua
Cloruro de sodio	Sulfato de zinc
Papel de filtro	Papel de filtro
	Silicato de sodio
	Carbón Activo

Tabla 3-3 Comparación de los componentes de cada uno de los prototipos escogidos

3.2 Factores estudiados

3.2.1 Voltaje

Este factor es el más sencillo de controlar, ya que es seleccionable desde la fuente de alimentación, por lo que no se ha considerado como un factor interesante de estudiar. Respecto al comportamiento del supercapacitor, que equivaldría a la variable de respuesta, aplicando la expresión (Ec. 2) se puede deducir que cuanto mayor sea el voltaje, mayor será la cantidad de energía almacenada. De igual forma, al aumentar la cantidad de energía almacenada, en aplicación de las expresiones (Ec. 7) y (Ec. 8), también aumentarán la densidad energética y la potencia específica del dispositivo. Ante esto, cabe mencionar

que no se debe aumentar el voltaje indiscriminadamente, ya que, de alcanzarse el valor de rotura dieléctrica, el condensador fallará, convirtiéndose en conductor y no almacenando energía alguna. Es por este motivo por lo que se ha optado por emplear un valor de 1,7 voltios en el circuito, ya que se presupone un valor adecuado, pese a que este dispositivo permite un mayor voltaje de operación antes de llegar a la ruptura dieléctrica.

3.2.2 Superficie de los electrodos

La alteración de este factor consiste en emplear placas de mayor o menor tamaño como electrodos, por lo que no supone una gran dificultad. Por otro lado, puesto que su influencia sobre la capacidad viene reflejada por la expresión (Ec. 1), donde muestra una relación directamente proporcional, no suponía un gran interés en su análisis. Respecto a la respuesta esperada en cuanto a la densidad energética y la potencia específica, solo bastaría con apreciar las expresiones (Ec. 7) y (Ec. 8) para deducir que ambas aumentan de forma proporcional a la superficie de las placas. Por lo tanto, puesto que es un factor del que se conoce el comportamiento con el dispositivo, y se ha primado el estudio de factores cuya influencia no es apreciable de un simple vistazo, se optó por emplear placas de papel de grafito de dimensiones 3,5 x 7 cm, dando una superficie de 24,5 cm² cada placa.



Figura 3-5 Estado de los electrodos de carbón activo tras su uso

En este apartado, cabe mencionar la dificultad encontrada durante la elaboración de los electrodos del supercapacitor 2, ya que, al aplicar la capa de carbón activo con silicato de sodio y agua sobre la superficie de estos, no quedó repartida de forma homogénea, al igual que tras secarse y emplearse en las mediciones. Al desmontarlo, dicha capa quedaba descascarillaba, dejando zonas de la lámina de grafito al descubierto, tal y como se puede observar en la Figura 3-5.

3.2.3 Distancia entre placas

La distancia entre ambos electrodos viene determinada por el grosor del elemento dieléctrico situado entre ambas placas. Tal y como se puede observar en la expresión (Ec. 1), cuanto mayor sea este grosor, menor capacidad ofrecerá el supercapacitor, lo que también se traducirá en una disminución de la densidad energética y la potencia específica, según las expresiones (Ec. 7) y (Ec. 8). Puesto que la significancia de este factor es fácilmente apreciable, y al igual que ocurre con los factores anteriores, se ha optado por considerarlo constante, con un valor de 0,2 mm, correspondiente al grosor de los 3 tipos distintos de papel de filtro empleados en el ensayo.

En este apartado, la principal dificultad encontrada consistió en la necesidad de sujetar con pinzas, tal y como se muestra en la Figura 3-6, ambas partes del supercapacitor para tratar de mantener en todo momento el máximo contacto posible entre placas, ya que, por la propia forma curvada de las láminas de grafito, tendían a separarse en la zona central de los electrodos.

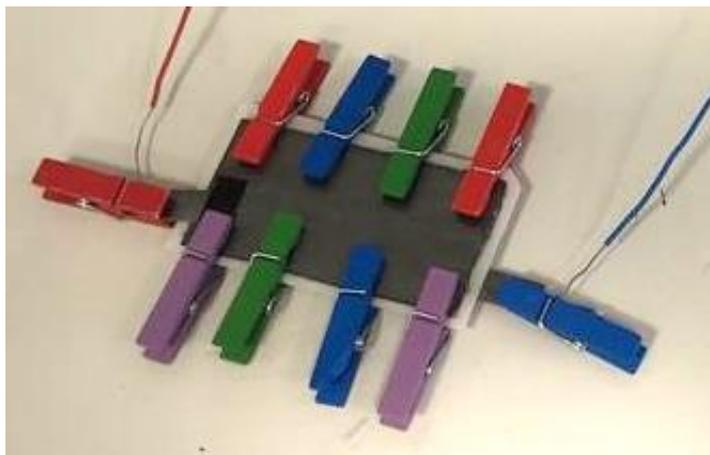


Figura 3-6 Prototipo sujetado con pinzas durante la toma de medidas

3.2.4 Tamaño de poro del separador

El factor del tamaño de poro del material separador ha sido empleado en este caso con papel de filtro cualitativo (Figura 3-7), y ha sido tomado como un factor variable, ya que, en las expresiones estudiadas anteriormente no se podía observar de forma directa cómo afectaba este factor al supercapacitor. Para ello, se han empleado 3 diferentes tipos de papel de filtro, con tamaños de poro de 0,01 mm, 0,02 mm y 0,025 mm. Puesto que este es uno de los tres factores elegidos para estudiar su significancia en la respuesta del supercapacitor, tanto en capacidad, densidad energética y potencia específica; no se podrán conocer, hasta una vez realizados los ensayos y analizados los resultados, cómo variarán las citadas variables de respuesta.



Figura 3-7 Dos de los tres tipos de papel de filtro cualitativo empleados durante los ensayos

3.2.5 Concentración del electrolito

Este es el segundo factor que se ha elegido que sea variable para estudiar su significancia en las 3 variables de respuesta establecidas. Puesto que se han empleado 2 prototipos distintos, en cada uno se emplearán 3 valores distintos de concentración en la disolución que baña el papel separador. En el supercondensador 1, la disolución de cloruro de sodio tendrá unas concentraciones del 10%, 20% y 30% en peso, ya que el límite de saturación se encuentra en torno al 32-33%; mientras que en el supercondensador 2, la disolución formada por agua destilada y sulfato de zinc tendrá unas concentraciones de 25%, 27% y 29%, por el mismo motivo que el dispositivo anterior.

En este apartado, caben destacar ciertas dificultades encontradas durante la preparación de las disoluciones, como que la balanza empleada solo tenía un decimal de precisión (Figura 3-8), por lo que

se ha tenido presente la existencia de cierto error de centésimas de gramo en cuanto a las cantidades aplicadas en cada disolución.



Figura 3-8 Balanza empleada para la preparación de las disoluciones

3.2.6 Resistencia en el circuito

En el caso de las resistencias empleadas en el circuito, sin contar la propia resistencia interna del dispositivo, se emplearon por seguridad para el circuito y como simulación de la conexión de una carga al mismo. En este caso, las resistencias empleadas fueron de 10 ohmios, ya que, cuanto mayor era el valor de estas, mayor eran las duraciones de las fases de carga y descarga de los supercapacitores, además de que, puesto que se estableció que se debía llegar a cargar siempre hasta el mismo valor de voltaje, en algunos casos donde la resistencia era mayor, el tiempo empleado para llegar a dicho valor de voltaje era excesivamente alto; mientras que, cuando las resistencias eran inferiores, los ciclos de carga y descarga eran demasiado cortos, lo que provocaba escasez de datos a la hora de realizar las mediciones. Respecto a la significancia de este factor en los resultados de las variables de respuesta, aplicando la expresión (Ec. 8) se puede observar que, al aumentar el tiempo de la descarga, la potencia específica disminuirá, lo que indica que la relación entre ambas es inversamente proporcional.

3.2.7 Tiempo de secado del electrolito

Este factor consistió en que, tras empapar el papel de filtro en la disolución con la concentración correspondiente a cada caso, se dejaba secar durante un tiempo establecido. Los 3 valores de tiempos de secado fueron de 0, 5 y 10 minutos, y, una vez finalizado ese tiempo, se procedía a montar el supercapacitor para realizar las distintas mediciones. En este apartado, la dificultad principal consistió en tratar de obtener un secado uniforme por toda la superficie, ya que, al apoyar el papel mojado para dejarlo secar, debido a la forma de la superficie donde se sustentaba, tendía a secarse más rápido por aquellas zonas donde no existía contacto con la superficie de apoyo que por donde sí apoyaba el papel mojado.

4 RESULTADOS

4.1 Gráficas y resultados Box-Behnken

Tras tomar todas las medidas necesarias, se han calculado los 3 factores de respuesta a estudiar, la capacitancia, la densidad energética y la potencia específica media para cada una de las mediciones tomadas, sumando un total de 135 resultados, es decir, lo que inicialmente serían 3 resultados para cada medición, un resultado por cada factor de respuesta, se triplicaba para cada tipo de combinación del dispositivo, 3 mediciones por combinación, y a su vez, se multiplicaba por un total de 15 combinaciones diferentes, llegando al total de 135 resultados por prototipo. En la Figura 4-1 se refleja, a modo esquemático lo explicado anteriormente.

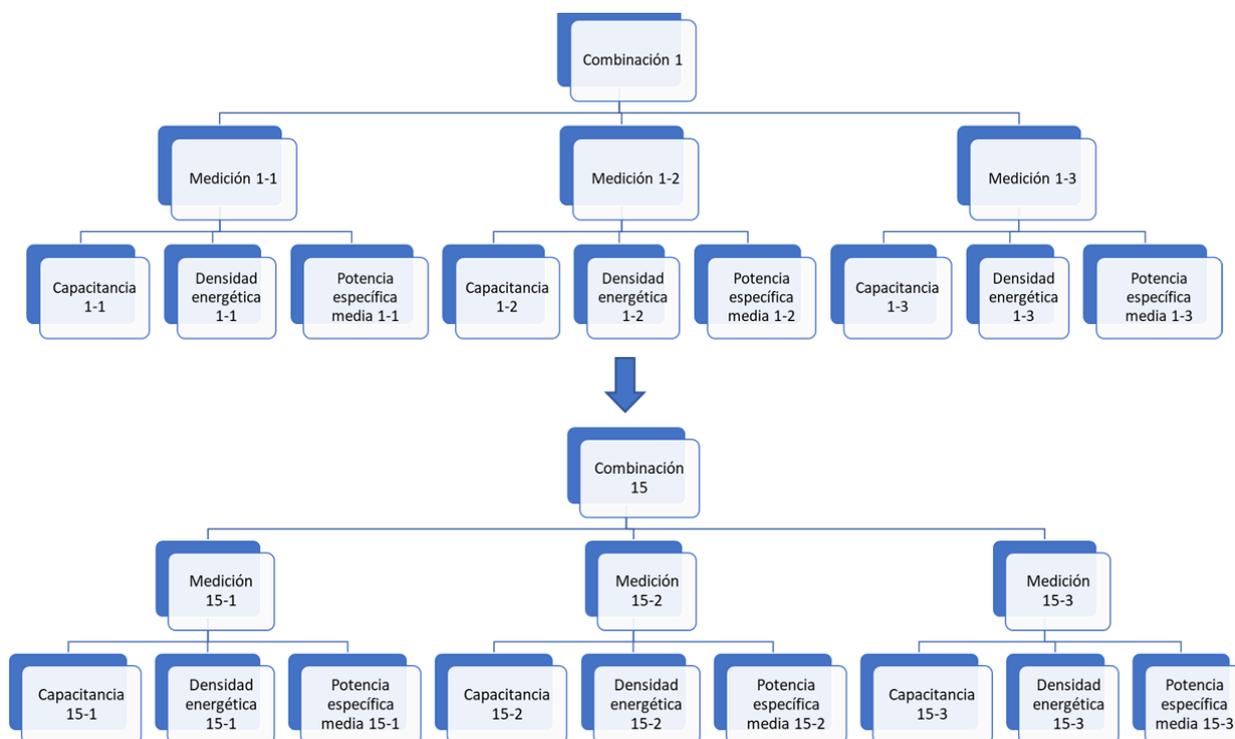


Figura 4-1 Esquema de la organización inicial de los resultados de uno de los prototipos

Tras la organización inicial, esta se redujo a 45 resultados, cada prototipo, con una media aritmética de aquellos del mismo factor de respuesta. En la Figura 4-2 se muestra lo expuesto anteriormente.

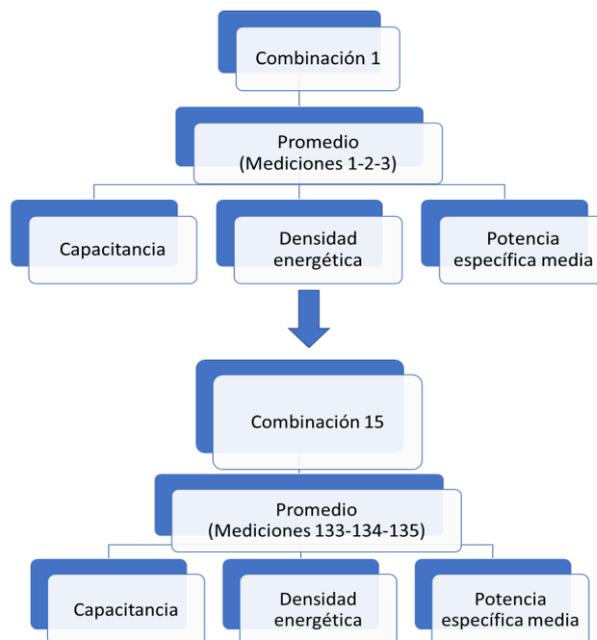


Figura 4-2 Esquema de la organización final de los resultados de uno de los prototipos

A modo de resumen, en la Tabla 4-1 se muestran los resultados obtenidos de capacidad, densidad energética y potencia específica de las 15 combinaciones del supercapacitor número 1.

Combi.	Concentración (%)	Tamaño de Poro (um)	Tiempo de secado (min)	C (F)	U (Wh/kg)	Pe (W/kg)
1	10	10	5	1,020	0,969	88,6
2	10	25	5	0,830	0,785	10,9
3	10	20	0	0,698	0,660	82,0
4	10	20	10	0,550	0,520	82,0
5	20	10	0	0,865	0,817	79,9
6	20	25	0	1,000	0,946	84,4
7	20	10	10	0,393	0,372	76,9
8	20	25	10	0,887	0,839	84,9
9	20	20	5	0,333	0,315	69,0
10	20	20	5	0,513	0,485	80,6
11	20	20	5	0,685	0,647	84,2
12	30	10	5	0,984	0,930	85,9
13	30	25	5	1,310	1,230	84,0
14	30	20	0	0,826	0,781	84,2
15	30	20	10	0,799	0,755	84,9

Tabla 4-1 Resultados obtenidos de cada combinación del prototipo 1

Respecto al prototipo 2, el procedimiento para estructurar los datos y la metodología para la obtención de los resultados fue similar, por lo que, en la Tabla 4-2 se muestran, a modo de resumen, los resultados pertenecientes al segundo prototipo de supercapacitor.

Combi.	Concentración (%)	Tamaño de Poro (um)	Tiempo de secado (min)	C (F)	U (Wh/kg)	Pe (W/kg)
1	10	10	5	1,020	0,969	88,6
2	10	25	5	0,830	0,785	10,9
3	10	20	0	0,698	0,660	82,0
4	10	20	10	0,550	0,520	82,0
5	20	10	0	0,865	0,817	79,9
6	20	25	0	1,000	0,946	84,4
7	20	10	10	0,393	0,372	76,9
8	20	25	10	0,887	0,839	84,9
9	20	20	5	0,333	0,315	69,0
10	20	20	5	0,513	0,485	80,6
11	20	20	5	0,685	0,647	84,2
12	30	10	5	0,984	0,930	85,9
13	30	25	5	1,310	1,230	84,0
14	30	20	0	0,826	0,781	84,2
15	30	20	10	0,799	0,755	84,9

Tabla 4-2 Resultados obtenidos de cada combinación del prototipo 2

Tras obtener los 15 resultados de cada variable de respuesta y para cada uno de los supercapacitores, se realizará un análisis sobre la validez de los modelos matemáticos establecidos para caracterizar el comportamiento de cada una de las variables de respuesta en función de los 3 factores establecidos.

Antes de comenzar, debido a la cantidad existente de datos, tablas y gráficas, y con el fin de facilitar la correcta comprensión del lector, los apartados pertenecientes a la capacitancia, densidad energética y potencia específica media se han estructurado de la forma en la que se refleja en la Figura 4-3.

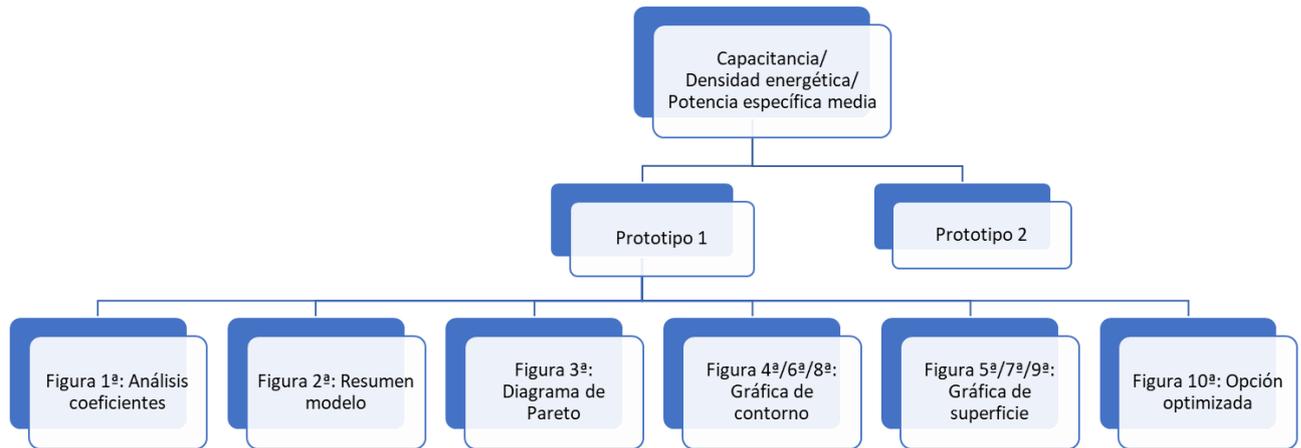


Figura 4-3 Estructuración general del análisis de los resultados

Con el fin de no repetir la misma información en cada uno de los apartados y evitar el cansancio del lector, a continuación, se expondrá el contenido y significado de las primeras 2 figuras expuestas en el comienzo de cada apartado para cada prototipo. De esta forma, en caso de que se deseara consultar el significado de alguna de las columnas, se podría consultar en este apartado.

En las figuras que ocupan el primer puesto en el análisis de cada variable de respuesta en cada prototipo, se mostrará una tabla de análisis de coeficientes y significancia, compuesta por 6 columnas, cuyos títulos son: Término, Coeficiente, Error estándar del coeficiente, valor T, valor p y “FIV”.

En la primera columna se muestra el “Término”, es decir, el nombre de cada uno de los factores de los cuales se está estudiando su significancia respecto a la variable de respuesta, así como de las posibles combinaciones entre los propios factores.

En la segunda columna, se encuentran los valores de los coeficientes en cuestión. Estos, son los números que multiplican a los valores de cada factor en la ecuación generada para explicar el comportamiento de la variable de respuesta con respecto al factor estudiado. Esta ecuación se conoce como ecuación de regresión. Los coeficientes también representan el cambio de la respuesta media con el cambio del propio término, mientras el resto de los términos permanecen constantes; por lo que su signo indicará la dirección en la que se moverá la respuesta. Si es negativo, cuando el término aumente el valor de la respuesta media disminuirá; si es positivo, cuando el término aumente, también lo hará la respuesta media [58].

En la tercera columna se muestra el error estándar de los coeficientes y estima la variabilidad entre las estimaciones del coeficiente que se obtendrían en caso de repetir la toma de muestras del mismo conjunto de datos, es decir, mide la precisión de la estimación de cada coeficiente, por lo que cuanto menor sea este, más precisa será dicha estimación [58].

En la cuarta columna se muestra el valor T, el cual mide la relación entre el coeficiente y su error estándar, por lo que se calcula a partir del error estándar de los coeficientes.

En la quinta columna se muestran los valores p. Estos miden la significancia de cada factor, es decir, la evidencia en contra de la hipótesis nula, lo que significa que el coeficiente del término al que hace referencia sería igual a 0, indicando que no existe relación entre el término y la respuesta. De forma ejemplificada, un nivel de significancia, la cual se asocia con el valor α , igual a 0,05; indica que existe un riesgo del 5% de equivocarse al afirmar que existe una relación entre el factor determinado y la variable de respuesta, cuando en realidad no la hay, por lo que, de forma práctica, en aquellos casos donde el valor de α sea inferior a 0,05, indicará que existe una relación significativa entre el término y la variable de respuesta [58].

Por último, en la sexta columna se indica el valor del factor de inflación de la varianza (FIV), el cual indica cuánto se infla la varianza de un coeficiente debido a la relación existente entre los predictores del modelo. Si este es igual a 1 indicará que no están correlacionados, mientras que, si el valor es mayor de 5, indicará que el coeficiente de regresión se estimó de forma ineficiente [58].

A continuación, en las figuras que ocupan el segundo puesto, se mostrará una tabla con 2 columnas. En la primera columna se mostrará el valor de la desviación estándar, denotado como “S”, de la distancia entre los valores de los datos obtenidos y los valores ajustados por el modelo propuesto, lo que indicará cómo de efectivo es el modelo a la hora de describir la respuesta. Por lo tanto, cuanto más bajo sea este valor, mejor será descrita la respuesta por el modelo. Aun así, este valor no es por sí solo el único indicador para confirmar la validez del modelo, por lo que serán necesarias más comprobaciones [58].

En la segunda columna se mostrará el valor, denotado como R^2 , del porcentaje de variación en la respuesta que puede ser explicada por el modelo, es decir, cómo de bien se ajusta el modelo a los datos obtenidos. Cuanto mayor sea este porcentaje, mejor se adaptará el modelo a los datos [58].

Estas dos columnas establecen, a modo de resumen, el nivel de validez del modelo matemático establecido para describir el comportamiento de la variable de respuesta en función de los distintos factores.

4.2 Capacitancia

4.2.1 Prototipo 1 (Cloruro de sodio)

Tras la introducción de los resultados anteriores en el software de Minitab, los resultados para el análisis de la capacitancia vienen reflejados en la Tabla 4-3. En ella se puede observar, fijándose en la tercera columna, cómo el error estándar de los coeficientes es bajo, lo que indica una buena precisión a la hora de estimar los coeficientes.

Término	Coef.	EE del coef.	Valor T	Valor p	FIV
Constante	0,4374	0,0930	4,70	0,005	
Concentración [%]	0,0827	0,0536	1,54	0,183	1,05
Tamaño Poro [um]	0,0956	0,0522	1,83	0,127	1,05
Tiempo Secado [min]	-0,1119	0,0536	-2,09	0,091	1,05
Concentración [%]*Concentración [%]	0,2288	0,0769	2,98	0,031	1,01
Tamaño Poro [um]*Tamaño Poro [um]	0,3698	0,0887	4,17	0,009	1,06
Tiempo Secado [min]*Tiempo Secado [min]	-0,0209	0,0769	-0,27	0,796	1,01
Concentración [%]*Tamaño Poro [um]	0,1196	0,0719	1,66	0,157	1,05
Concentración [%]*Tiempo Secado [min]	0,0302	0,0739	0,41	0,699	1,00
Tamaño Poro [um]*Tiempo Secado [min]	0,1012	0,0719	1,41	0,218	1,05

Tabla 4-3 Significancia de los factores estudiados en el supercapacitor 1

Si se observa la columna de los p-valores, se puede apreciar cómo no existe un factor que sea significativo por sí mismo, pues sólo lo es la propia constante; mientras que, al analizar la significancia que tienen las combinaciones entre los propios factores, el único caso donde existe significancia respecto a la variable de respuesta es en el caso de la concentración-concentración, ya que es inferior a 0,05.

Por último, respecto al FIV, en todos los casos tienen un valor muy cercano a la unidad, por lo que indica que el coeficiente de regresión se estimó de forma eficiente, ya que apenas existiría multicolinealidad, o correlación entre los predictores, en el análisis de regresión.

A continuación, respecto a los valores del resumen del modelo, se ha obtenido un valor de 0,148 para la desviación estándar, lo que indica una buena descripción de la respuesta por parte del modelo, y un porcentaje para la variación en la respuesta del 88,42%, lo que se traduce en una buena adaptación del modelo a los datos obtenidos.

A modo de representación gráfica, se ha empleado un diagrama de Pareto para representar la significancia de los factores en la respuesta de la variable. Este representa los valores absolutos de los efectos estandarizados, desde el más grande hasta el más pequeño y para conocer cuáles de los factores son significativos se muestra una línea de referencia de color rojo, la cual viene referenciada a partir del valor de α , en un valor de 2,571. Por lo tanto, coincidiendo con la tabla de coeficientes codificados, todo factor que sea significativo en la variable de respuesta será mayor que el valor de α , sobrepasando la línea de referencia. De esta forma, en la Figura 4-4 se puede apreciar los dos factores, correspondientes a la combinación entre sí de la concentración y el tamaño de poro, que son significativos en la respuesta de la capacitancia, coincidiendo con los resultados mostrados en la Tabla 4-3 mediante los p-valores.

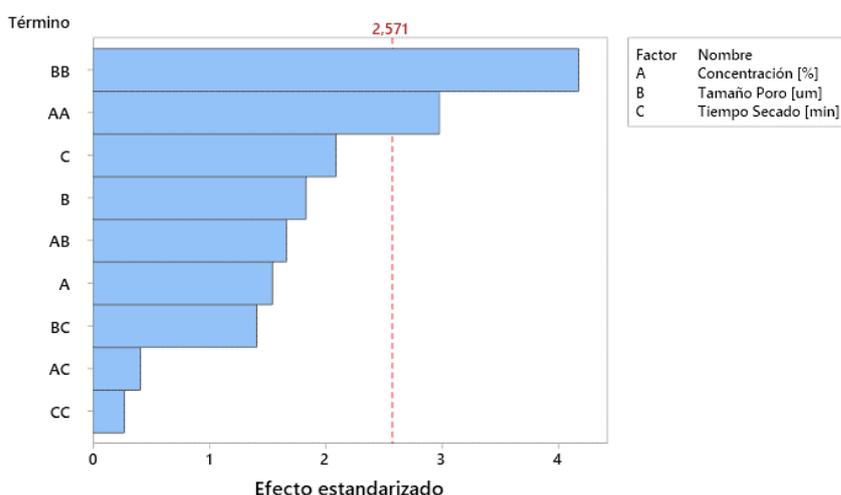


Figura 4-4 Diagrama de Pareto para la respuesta a la capacitancia

Tras esto, para tratar de hacerse una idea de la forma que tiene la superficie de respuesta, se han empleado gráficas de contorno y gráficas de superficie. Estas, muestran de forma simplificada, las formas que obtiene la superficie de respuesta asociada a la capacitancia en función de los factores establecidos como continuos al inicio del experimento.

En la Figura 4-5 se puede observar cómo, empleando la concentración y el tamaño de poro como ejes de referencia, los mayores valores de capacitancia se sitúan en la esquina superior derecha, correspondiéndose con valores de concentración y tamaño de poro cercanos a los máximos de los empleados durante el ensayo, de lo que puede deducirse que este tipo de electrolito, debido a la disolución empleada, requiere de poros de mayor tamaño.

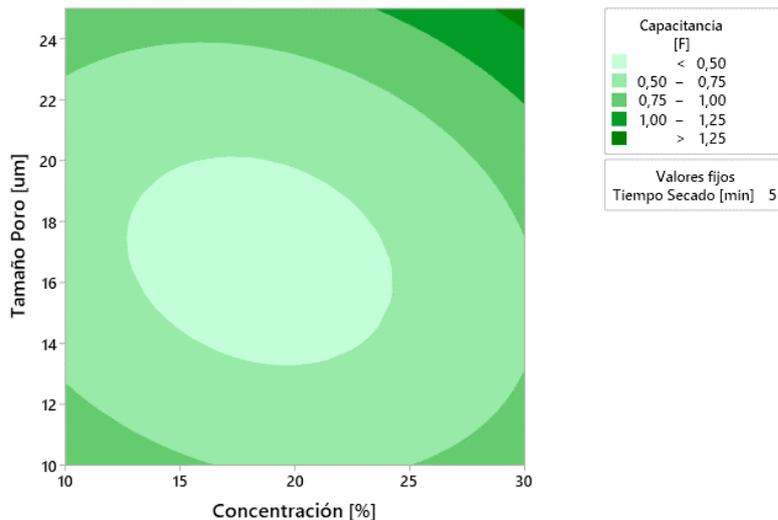


Figura 4-5 Grafica de contorno con respuesta en capacitancia

En la Figura 4-6 se muestra esta misma superficie de forma tridimensional, ofreciendo una superficie con forma de valle, donde los valores óptimos se encuentran en los extremos, en lugar de en la zona central de la figura.

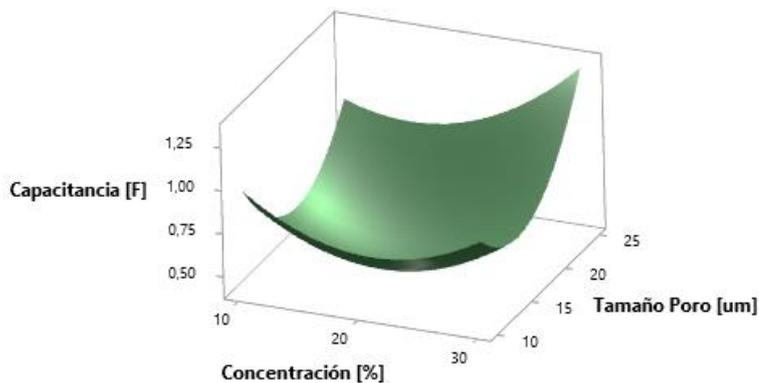


Figura 4-6 Gráfica de superficie con respuesta en capacitancia

En la Figura 4-7 se puede observar cómo, empleando la concentración y el tiempo de secado como ejes de referencia, los mayores valores de capacitancia se sitúan en la esquina inferior derecha, correspondiéndose con valores de concentración máximos y tiempos de secado mínimos, lo que hace deducir que este tipo de dispositivo necesitaría estar continuamente empapado por el electrolito.

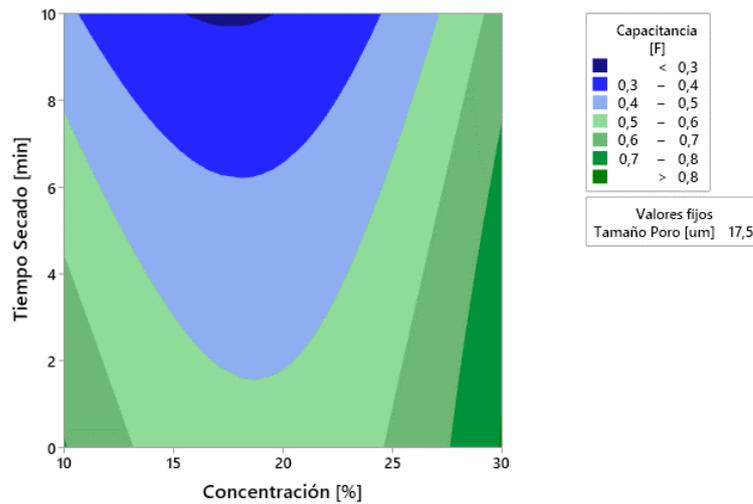


Figura 4-7 Gráfica de contorno con respuesta en capacitancia

En la Figura 4-8 se puede observar la forma de esta superficie, empleando los mismos ejes de referencia. Tal y como se puede apreciar, tiene una forma de silla de montar, pero con unos laterales más uniformes, donde las zonas de mayor valor se sitúan en zonas de mayor concentración de disolución en el electrolito y en las de menor tiempo de secado.

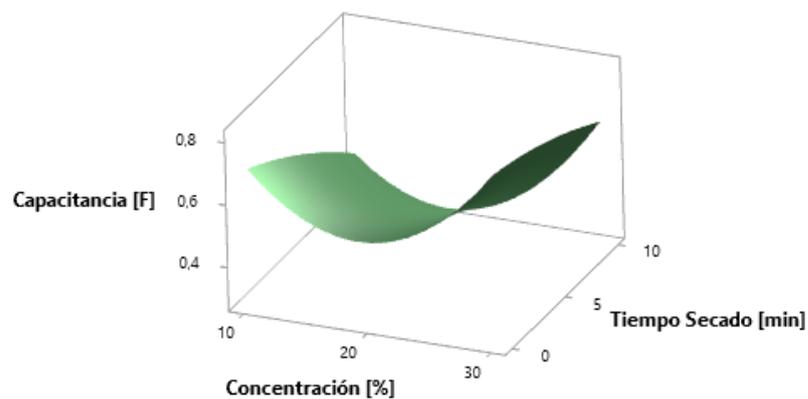


Figura 4-8 Gráfica de superficie con respuesta en capacitancia

En la tercera combinación posible para expresar las relaciones entre los factores continuos y la respuesta de la capacitancia se emplean el tamaño de poro y el tiempo de secado como ejes de referencia, tal y como se muestra en la Figura 4-9. En ella, se puede apreciar como los rangos superior y central de valores abarcan las respuestas en capacitancia con valores mínimos, mientras que los máximos se encuentran en los rangos de mayor tamaño de poro y menor tiempo de secado, correspondiéndose con los extremos derecho e inferior izquierdo de la gráfica.

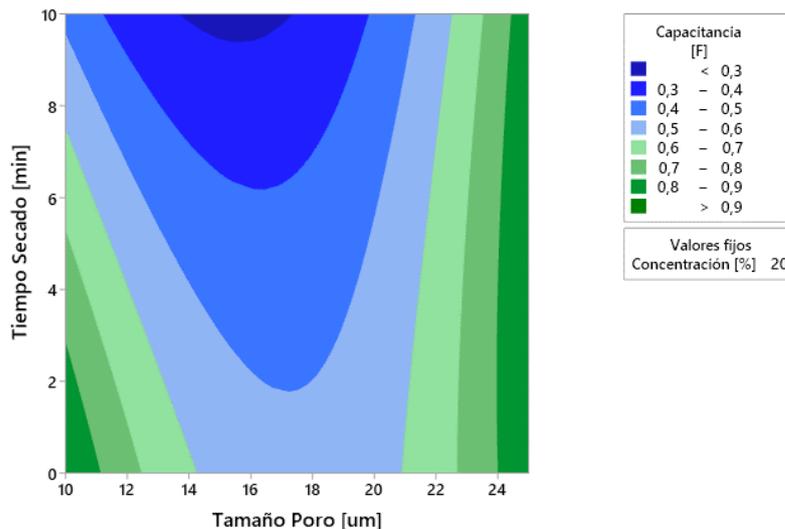


Figura 4-9 Gráfica de contorno con respuesta en capacitancia

En la Figura 4-10 se muestra la gráfica de superficie tridimensional para aportar una mayor claridad a la hora de entender qué forma obtiene la superficie de la capacitancia en función de estos dos factores. A la vista de estos resultados, se puede observar que tiene una forma similar a la generada en la Figura 4-8, con la diferencia de que esta, en su zona central, obtiene valores inferiores, por lo que tiene una pendiente más pronunciada.

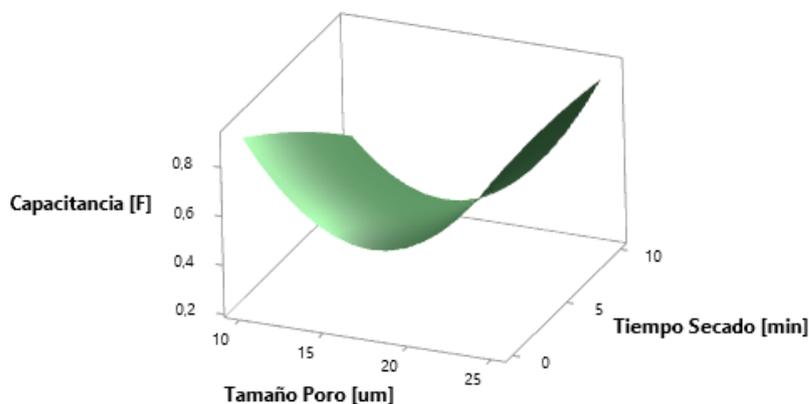


Figura 4-10 Gráfica de superficie con respuesta en capacitancia

Por último, en la Tabla 4-4 se muestra la opción con la que se obtendría la mayor optimización posible según el modelo matemático propuesto, es decir, aquella configuración con la que se obtendría la mayor capacitancia. Esta corresponde a una concentración del 30% en masa de agua con sal, un tamaño de poro de 0,025 mm y un tiempo de secado de unos 7 minutos y 22 segundos, obteniendo una capacitancia estimada de 1,33 Faradios.

Solución	Concentración (%)	Tamaño de poro (um)	Tiempo de secado (min)	Capacitancia (F)
1	30	25	7,37	1,34

Tabla 4-4 Combinación con mayor optimización de respuesta en capacitancia

4.2.2 Prototipo 2 (Sulfato de zinc)

A continuación, se llevará a cabo un análisis similar al realizado en el apartado anterior con el segundo dispositivo, representado numéricamente en la Tabla 4-5, correspondiente al supercapacitor que emplea carbón activo y sulfato de zinc.

En este caso, al igual que en el apartado anterior, se obtienen unos valores del error estándar de los coeficientes son bajos, lo que nos lleva a la conclusión de que los coeficientes tienen gran precisión. Respecto a la significancia de cada uno de los factores, reflejada por los valores p, así como de la combinación entre ellos; en referencia a la capacitancia del supercapacitor, se puede apreciar cómo no existe significancia con ninguno de estos, ya que todos los valores son superiores a 0,05, lo que lleva a concluir que la alteración de estos factores no es tan importante a la hora de tener en cuenta el funcionamiento de este tipo de dispositivo, ya que no produce grandes cambios en la respuesta.

Por último, respecto al factor de inflación de la varianza, FIV, en todos los casos tienen un valor muy cercano a la unidad, llegando en uno de los casos a la unidad; lo que indica que el coeficiente de regresión se ha estimado eficientemente, pues apenas existe correlación entre los predictores.

Término	Coef.	EE del coef.	Valor T	Valor p	FIV
Constante	0,1234	0,0560	2,20	0,079	
Concentración [%]	-0,0134	0,0322	-0,42	0,694	1,05
Tamaño Poro [um]	-0,0566	0,0314	-1,80	0,132	1,05
Tiempo Secado [min]	-0,0738	0,0322	-2,29	0,071	1,05
Concentración [%]*Concentración [%]	-0,0815	0,0463	-1,76	0,139	1,01
Tamaño Poro [um]*Tamaño Poro [um]	0,0752	0,0534	1,41	0,218	1,06
Tiempo Secado [min]*Tiempo Secado [min]	0,0669	0,0463	1,45	0,208	1,01
Concentración [%]*Tamaño Poro [um]	0,0080	0,0433	0,19	0,860	1,05
Concentración [%]*Tiempo Secado [min]	-0,0013	0,0444	-0,03	0,978	1,00
Tamaño Poro [um]*Tiempo Secado [min]	0,0989	0,0433	2,29	0,071	1,05

Tabla 4-5 Significancia de los factores estudiados en el supercapacitor 2

Tras esto, los resultados para la validez del modelo matemático obtuvieron unos valores de 0,089 para la desviación estándar, la cual indica una mejor descripción de la respuesta que en el apartado anterior; y un porcentaje del 80,88%, el cual es menor que en el dispositivo 1, lo que nos indica que la adaptación de este modelo a los datos obtenidos será peor que en el caso anterior.

Como complemento a los resultados mostrados, en la Figura 4-11 se muestran la significancia de los factores estudiados a través de un diagrama de Pareto. Tal y como se ha explicado anteriormente mediante resultados numéricos, en el diagrama se puede observar cómo ninguno de los factores, o

combinaciones de ellos, sobrepasan la línea de referencia, lo que indica la poca significancia de estos en la respuesta de la capacitancia.

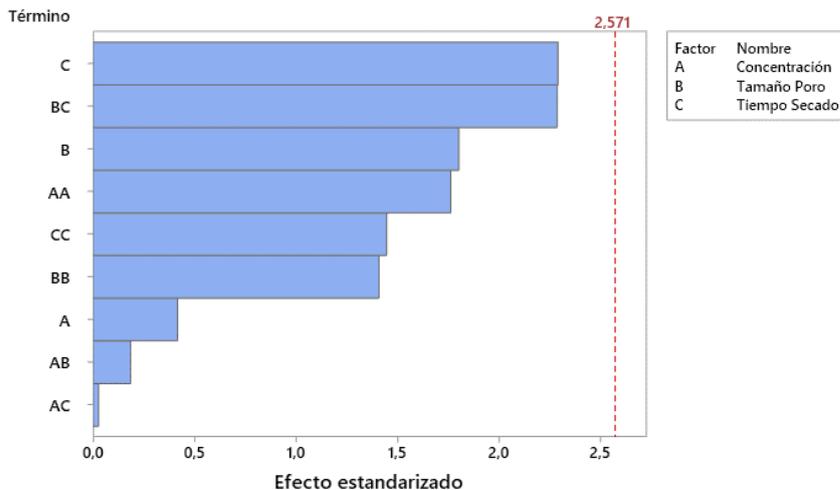


Figura 4-11 Diagrama de Pareto para la respuesta a la capacitancia

Continuando con la exposición de los resultados, de la misma forma que se ha realizado en el apartado anterior, se van a exponer de forma gráfica las formas y valores de la superficie de respuesta asociados a la capacitancia, formada por los factores de carácter continuo.

En la Figura 4-12 se muestra, tomando como ejes de referencia la concentración de sulfato de zinc y el tamaño de poro del papel de filtro, los valores de la capacitancia. Empleando la leyenda adjunta se puede determinar que los valores máximos de capacitancia se obtienen en la zona inferior central, donde los valores de concentración son intermedios, y el tamaño de poro, mínimo.

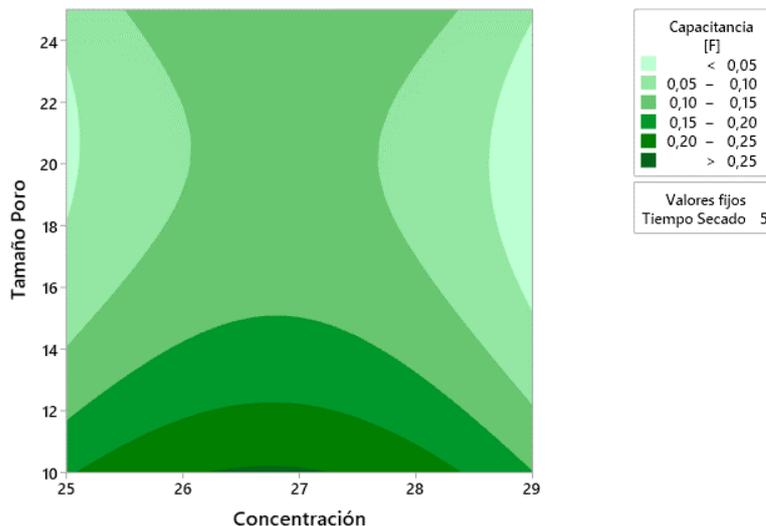


Figura 4-12 Grafica de contorno con respuesta en capacitancia

A modo ampliatorio, en la Figura 4-13 se muestra la forma, de silla de montar en este caso, creada por la respuesta de la capacitancia en función de los factores continuos de concentración y tamaño de poro. Esta, coincidiendo con su correspondiente gráfica de contorno, muestra la tendencia ascendente en el eje correspondiente al tamaño de poro conforme este disminuye.

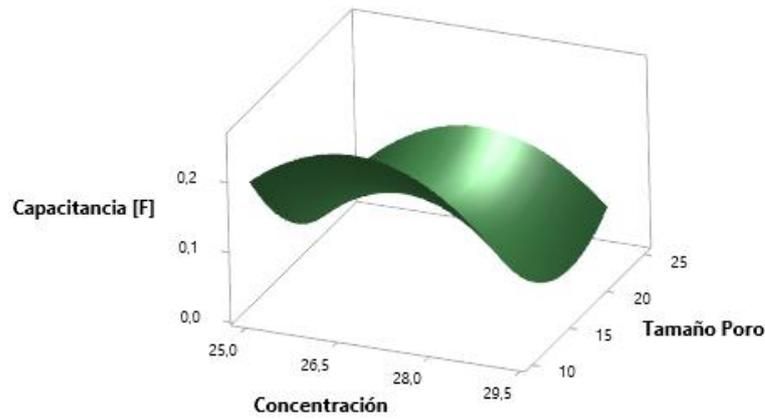


Figura 4-13 Gráfica de superficie con respuesta en capacitancia

En la Figura 4-14 se muestran las capas de los distintos valores de capacitancia obtenidos en función de la concentración del electrolito y el tiempo de secado. En ella se aprecia una tendencia similar a la gráfica anterior, mostrando los mayores valores de capacitancia en la región intermedia del factor de concentración y en la región inferior del factor de tiempo de secado, lo que indica que este dispositivo necesitaría permanecer constantemente húmedo.

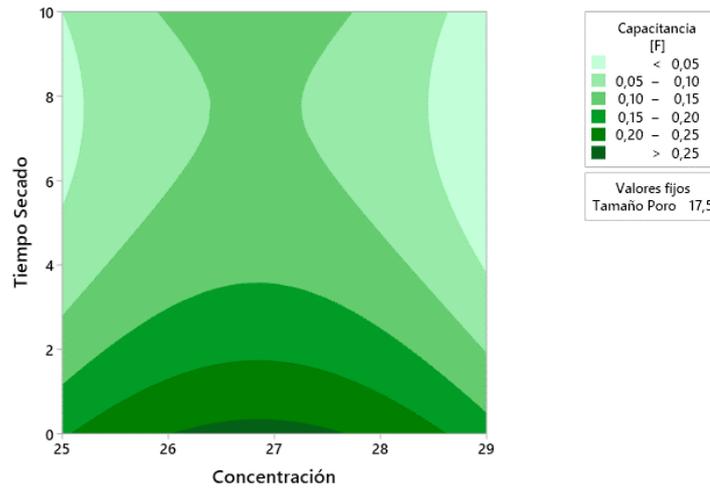


Figura 4-14 Grafica de contorno con respuesta en capacitancia

Respecto a la forma tridimensional de esta superficie, en la Figura 4-15 se puede observar una superficie similar a la gráfica de superficie anterior, siendo también de tipo silla de montar, pero con una pendiente menor, lo que indica que la alteración en los factores continuos genera una respuesta con unos valores menos distantes entre sí.

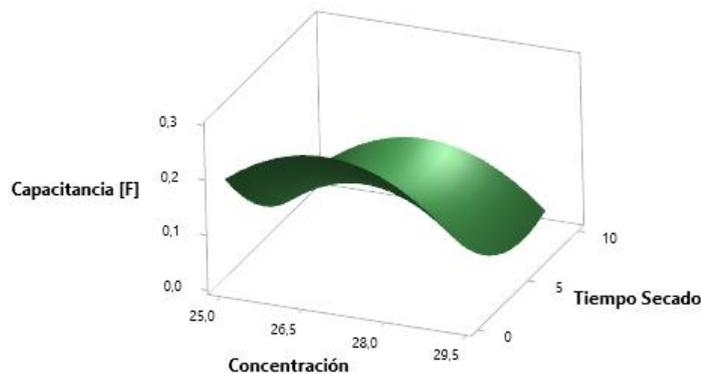


Figura 4-15 Gráfica de superficie con respuesta en capacitancia

Respecto a la gráfica con la tercera combinación posible, expresa la respuesta en función del tamaño de poro del papel y del tiempo de secado y viene representada en la Figura 4-16, donde puede observarse, en la esquina inferior izquierda, una pequeña región donde se dan los mayores valores de capacitancia, correspondiéndose esta con los valores mínimos de tamaño de poro, así como de tiempo de secado.

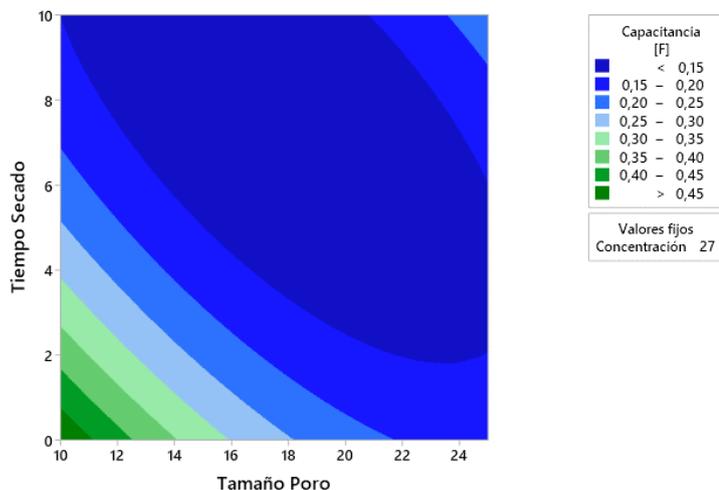


Figura 4-16 Gráfica de contorno con respuesta en capacitancia

Como información ampliatoria, para facilitar la visión espacial de cómo es la superficie generada, en la Figura 4-17 se muestra, empleando los mismos ejes de coordenadas, la respuesta de la capacitancia. En este caso, puede apreciarse una ligera forma de valle, no tan pronunciada como en el caso de su homólogo formado con una disolución de agua y cloruro de sodio como electrolito, pero cuya forma general es similar.

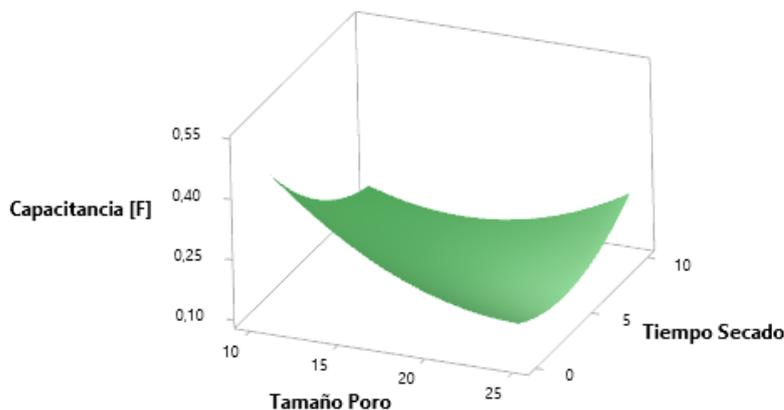


Figura 4-17 Gráfica de superficie con respuesta en capacitancia

Por último, empleando el modelo matemático creado a partir de los datos obtenidos en las distintas mediciones, se ha obtenido una opción optimizada (Tabla 4-6) en donde se logra obtener una capacitancia de 0,49 Faradios, mediante una concentración en la disolución de sulfato de zinc del 26,7% en peso, un tamaño de poro de 0,01 mm y no dejando secar el separador.

Solución	Concentración (%)	Tamaño de poro (um)	Tiempo de secado (min)	Capacitancia (F)
1	26,74	10	0	0,49

Tabla 4-6 Combinación con mayor optimización de respuesta en capacitancia

4.3 Densidad energética

4.3.1 Prototipo 1 (Cloruro de sodio)

En la Tabla 4-7 se muestran los resultados obtenidos para los coeficientes de cada uno de los términos del modelo propuesto. Observando la columna del error estándar de los coeficientes, se aprecia un bajo valor, indicando una gran precisión en la estimación de los coeficientes. Respecto a lo p-valores, se observan 3 factores cuya significancia es apreciable, ya que poseen valores inferiores a 0,05, lo que indica una probabilidad de error inferior al 5% al afirmar que son significativos.

Término	Coef.	EE del coef.	Valor T	Valor p	FIV
Constante	0,4139	0,0882	4,69	0,005	
Concentración [%]	0,0765	0,0508	1,51	0,193	1,05
Tamaño Poro [um]	0,0890	0,0495	1,80	0,132	1,05
Tiempo Secado [min]	-0,1056	0,0508	-2,08	0,092	1,05
Concentración [%]*Concentración [%]	0,2158	0,0729	2,96	0,031	1,01
Tamaño Poro [um]*Tamaño Poro [um]	0,3487	0,0841	4,15	0,009	1,06
Tiempo Secado [min]*Tiempo Secado [min]	-0,0192	0,0729	-0,26	0,803	1,01
Concentración [%]*Tamaño Poro [um]	0,1127	0,0682	1,65	0,159	1,05
Concentración [%]*Tiempo Secado [min]	0,0285	0,0700	0,41	0,701	1,00
Tamaño Poro [um]*Tiempo Secado [min]	0,0953	0,0682	1,40	0,221	1,05

Tabla 4-7 Significancia de los factores estudiados en el supercapacitor 1

Respecto al resumen sobre la validez del modelo, se han obtenido unos valores de 0,14 para la desviación estándar, S, lo que indica que, al tener unos valores tan bajos supone una buena descripción de la respuesta por parte del modelo; y un valor del porcentaje de variación de la respuesta, R^2 , del 88,26%, lo que infiere una buena adaptación del modelo a los datos obtenidos en las mediciones de laboratorio. Como resumen gráfico a los datos mostrados en la Tabla 4-7, se han representado en la Figura 4-18 mediante un diagrama de Pareto cada uno de los factores estudiados, al igual que el nivel de significancia de estos, la cual viene reflejada en aquellos que sobrepasan la línea de referencia.

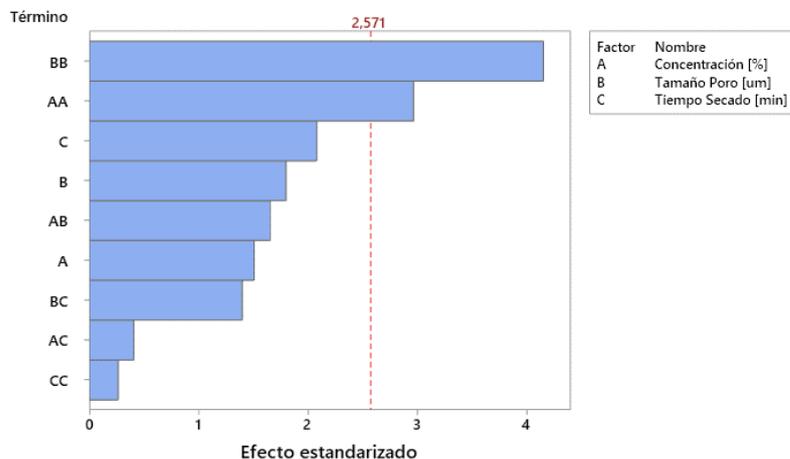


Figura 4-18 Diagrama de Pareto para la respuesta a la densidad energética

A continuación, en la Figura 4-19 se muestra una gráfica de contorno de la respuesta en densidad energética empleando como ejes de coordenadas la concentración de cloruro de sodio en el electrolito y el tamaño de poro del papel de filtro empleado como separador. En ella se pueden apreciar distintas capas, las cuales van disminuyendo de manera concéntrica hacia el centro de la gráfica, por lo que, al sernos de mayor interés las zonas de mayor respuesta, hay que fijarse en la esquina superior derecha, coloreada de verde oscuro, ubicada en la región donde, tanto la concentración como el tamaño de poro son máximos, con valores del 30% en masa y de 25 μm , respectivamente.

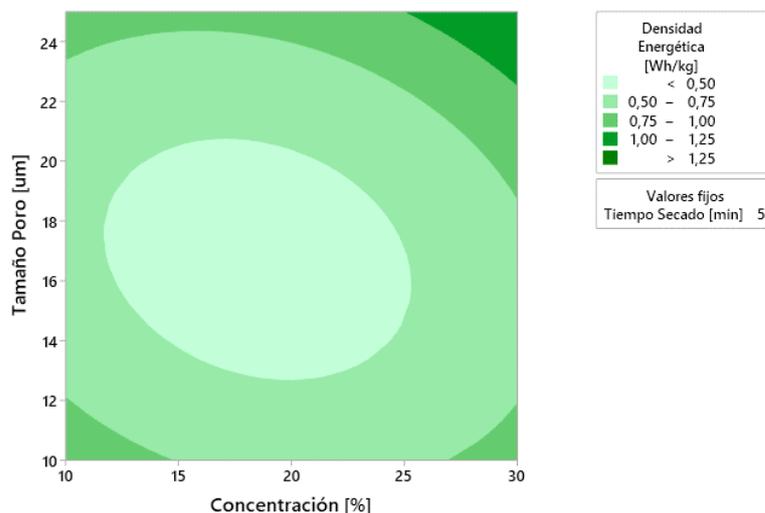


Figura 4-19 Gráfica de contorno con respuesta en densidad energética

Al representar esta misma gráfica en 3 dimensiones, se obtiene la gráfica representada en la Figura 4-20, la cual tiene una clara forma de valle con un mínimo situado en la zona equivalente al centro de la gráfica de la Figura 4-19, mientras que los valores de mayor respuesta se encuentran en las esquinas.

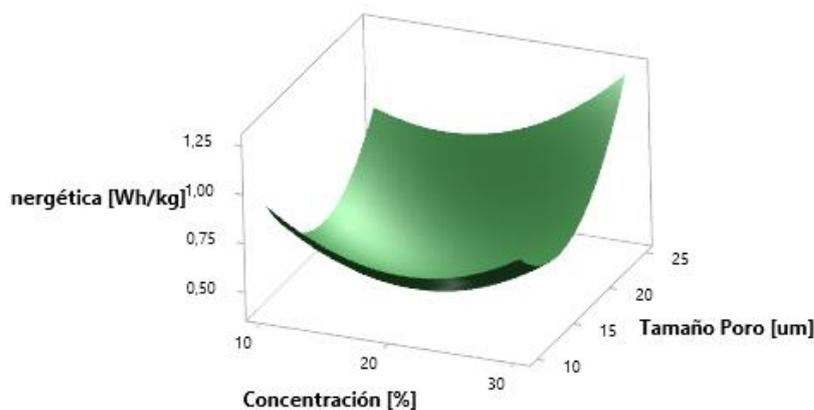


Figura 4-20 Gráfica de superficie con respuesta en densidad energética

En la segunda configuración, con los ejes de la gráfica de la Figura 4-21 formados por la concentración y el tiempo de secado, se observa que la zona de mayor respuesta se da en la de máxima concentración, al 30% en masa; y en las regiones de mínimo tiempo de secado, es decir, de 0 minutos.

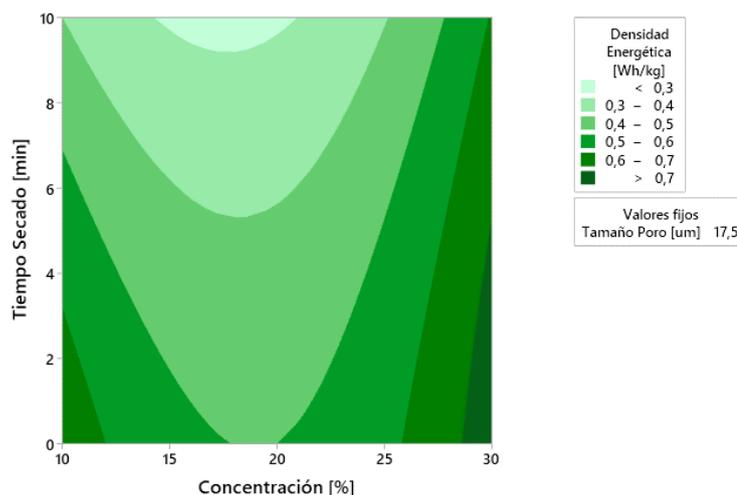


Figura 4-21 Gráfica de contorno con respuesta en densidad energética

Como representación en 3 dimensiones de la gráfica anterior, en la Figura 4-22 se muestra que esta tiene una forma de valle, donde las mayores respuestas se encuentran en la región derecha, equivalente a la intersección de los ejes en la figura.

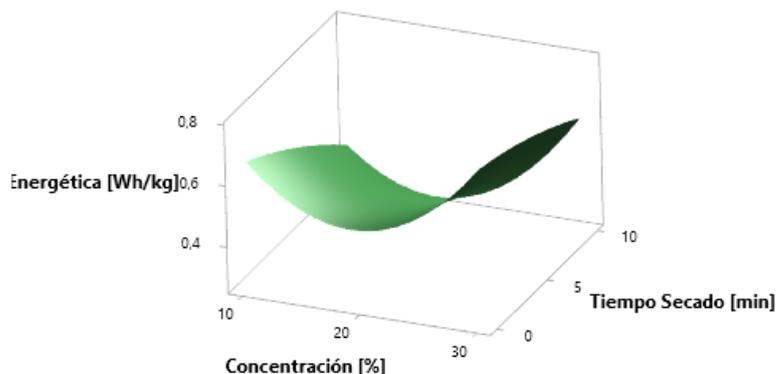


Figura 4-22 Gráfica de superficie con respuesta en densidad energética

En la Figura 4-23 se muestra la tercera combinación de representación, formada por los ejes horizontal, con el tamaño de poro, y el vertical, formado por el tiempo de secado. En ella se pueden apreciar diferentes capas de la superficie de respuesta, cuyos valores más altos se encuentran de forma prácticamente vertical, en los extremos del rango de concentración, tanto en la mínima, del 10%, como en la máxima, del 30%.

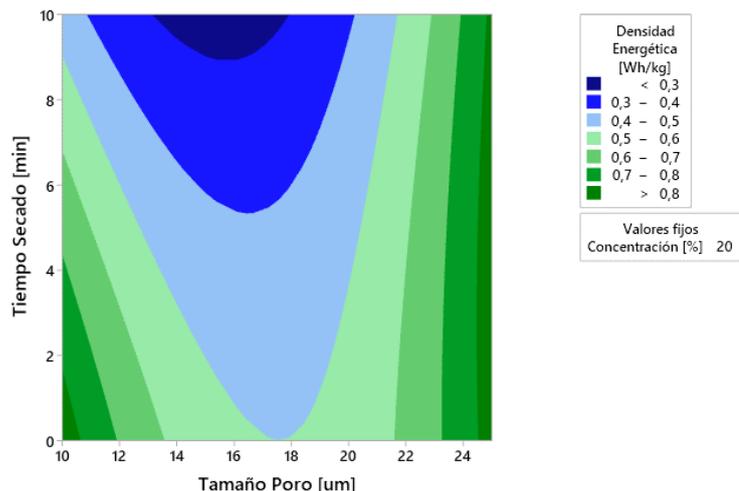


Figura 4-23 Grafica de contorno con respuesta en densidad energética

Como representación tridimensional de la gráfica de contorno anterior, se muestra en la Figura 4-24 una gráfica de superficie donde se puede apreciar la forma creada por la variable de respuesta. Esta es del tipo valle, presentando un mínimo en la zona central, y una zona de ascenso pronunciado hacia el lateral derecho, región donde aumenta el tamaño de poro.

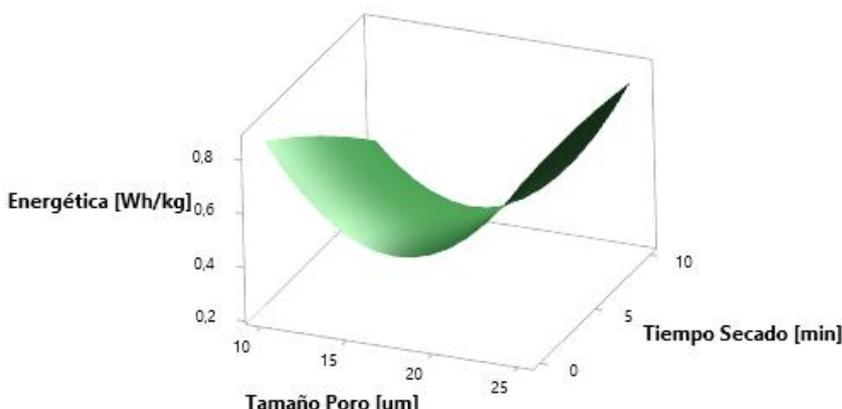


Figura 4-24 Gráfica de superficie con respuesta en densidad energética

Como resultado final, aplicando el modelo establecido para este ensayo, se ha propuesto la combinación que se estima como óptima para una máxima densidad energética, tal y como se aprecia en la Tabla 4-8. En esta se emplea una concentración del 30% en masa, un tamaño de poro de 25 μm y un tiempo de secado de en torno a 7 minutos 20 segundos, obteniendo una densidad energética de 1,26 Wh/kg.

Solución	Concentración (%)	Tamaño de poro (μm)	Tiempo de secado (min)	U (Wh/kg)
1	30	25	7,37	1,26

Tabla 4-8 Combinación con mayor optimización de respuesta en densidad energética

4.3.2 Prototipo 2 (Sulfato de zinc)

Tras el análisis del prototipo 1, toca centrarse en analizar cómo se comporta la densidad energética del prototipo 2 en función de los factores escogidos de carácter continuo, al igual que es imprescindible conocer la significancia de estos últimos, respecto a la variable de respuesta, pues de esta forma sabremos cómo afecta cualquier tipo de modificación de estos al resultado final. Cabe destacar que es de esperar

un comportamiento similar al obtenido en el análisis de la capacitancia, ya que ambas variables de respuesta se encuentran muy relacionadas y, los factores continuos en ambos casos conservan la misma relación con las variables de respuesta.

Comenzando con un análisis numérico del modelo general propuesto, representado por la Tabla 4-9, puede observarse una gran precisión en la estimación de los coeficientes representada en la 2ª columna por el error estándar de los coeficientes. Respecto a los valores p, son los que indican el grado de significancia de cada factor, o combinación entre ellos, que cada uno posee con respecto a la respuesta que se obtendrá en forma de densidad energética. En este caso, al igual que ocurría con la respuesta en la capacitancia, no hay un factor que sea altamente significativo, lo que viene a decir que, en caso de afirmar que existe una relación entre los factores continuos y la respuesta, existe una posibilidad superior al 5% de equivocarnos, es decir, que en realidad no exista relación alguna. Por lo tanto, al asumir que este porcentaje es elevado, se considera que una alteración de estos factores no causará una alteración acusada en la variable de respuesta.

Término	Coef.	EE del coef.	Valor T	Valor p	FIV
Constante	0,1556	0,0704	2,21	0,078	
Concentración [%]	-0,0171	0,0406	-0,42	0,691	1,05
Tamaño Poro [um]	-0,0714	0,0395	-1,81	0,131	1,05
Tiempo Secado [min]	-0,0930	0,0406	-2,29	0,070	1,05
Concentración [%]*Concentración [%]	-0,1025	0,0582	-1,76	0,138	1,01
Tamaño Poro [um]*Tamaño Poro [um]	0,0947	0,0671	1,41	0,217	1,06
Tiempo Secado [min]*Tiempo Secado [min]	0,0842	0,0582	1,45	0,207	1,01
Concentración [%]*Tamaño Poro [um]	0,0101	0,0544	0,19	0,859	1,05
Concentración [%]*Tiempo Secado [min]	-0,0015	0,0559	-0,03	0,980	1,00
Tamaño Poro [um]*Tiempo Secado [min]	0,1247	0,0544	2,29	0,071	1,05

Tabla 4-9 significancia de los factores estudiados en el supercapacitor 2

Tras este análisis factor a factor, se indicará un resumen del grado de adaptación del modelo matemático propuesto a los datos obtenidos experimentalmente. En este se ha obtenido un valor de 0,11 en la desviación estándar (S), indicando una buena descripción de la respuesta por parte del modelo. El porcentaje de variación de la respuesta (R^2) es del 80,94%, lo que indica un nivel alto de adaptación del modelo a los datos obtenidos.

Finalmente, como método gráfico para una mejor comprensión sobre el nivel de significancia de cada factor, o combinación de ellos, respecto a la variable de respuesta viene representada por la Figura 4-25, a través de un diagrama de Pareto, donde se puede observar cómo ningún factor supera el valor de la línea de referencia roja, asociada al valor α de 0,05, confirmando la ausencia de significancia.

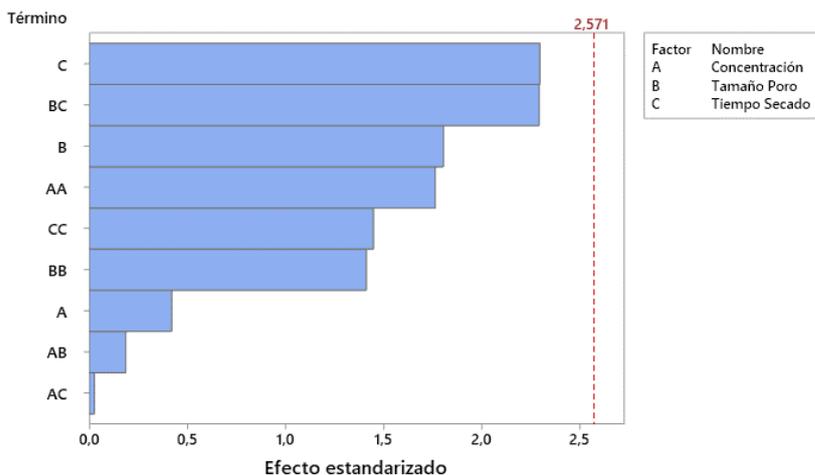


Figura 4-25 Diagrama de Pareto para la respuesta a la densidad energética

Tras el análisis numérico, es conveniente realizar un análisis gráfico para obtener de forma más clara y sencilla las formas creadas por la superficie de respuesta, correspondiente a la densidad energética del dispositivo, ante los factores de carácter continuo establecidos desde un inicio.

En la Figura 4-26 se puede observar que las capas donde se obtienen las mayores cifras de densidad energética son en los rangos de concentración medios y en los rangos inferiores de tamaños de poro, lo que viene a coincidir con la tendencia observada en el análisis de la capacitancia.

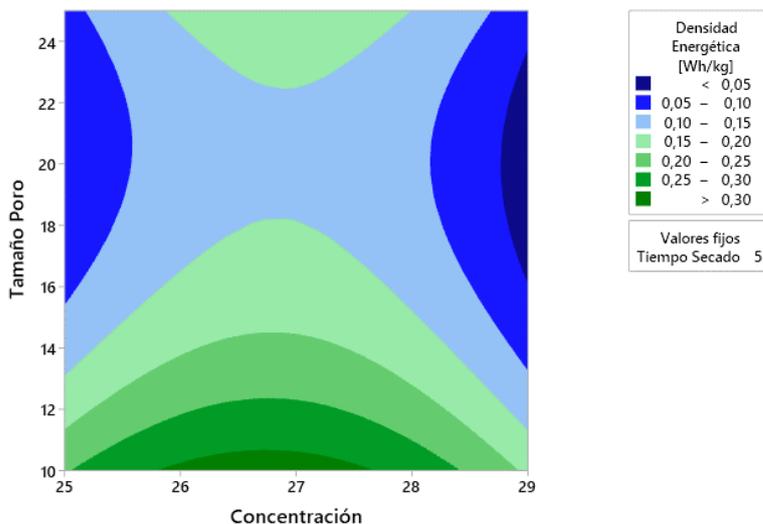


Figura 4-26 Grafica de contorno con respuesta en densidad energética

En la Figura 4-27 se representa, tridimensionalmente, la superficie generada al emplear los mismos ejes de coordenadas que en la gráfica anterior, la cual es de tipo silla de montar, al igual que ocurría en el análisis de la capacitancia al emplear los mismos factores como ejes de referencia.

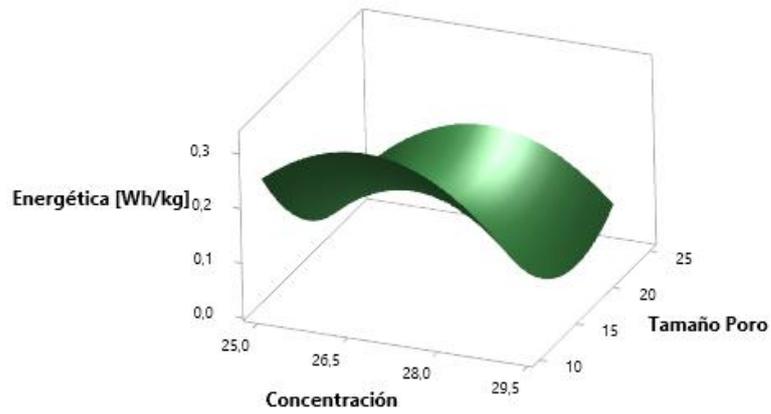


Figura 4-27 Gráfica de superficie con respuesta en densidad energética

En la siguiente combinación se representa, a través de la Figura 4-28, la densidad energética en función de la concentración de disolución empleada como electrolito y el tiempo de secado permitido antes de comenzar a medir. En ella se observa que los valores máximos se encuentran en la zona de concentración media y en la zona de mínimo tiempo de secado, al igual que en el caso anterior, lo que permite inferir que se requiere mantener el dispositivo mojado en todo momento.

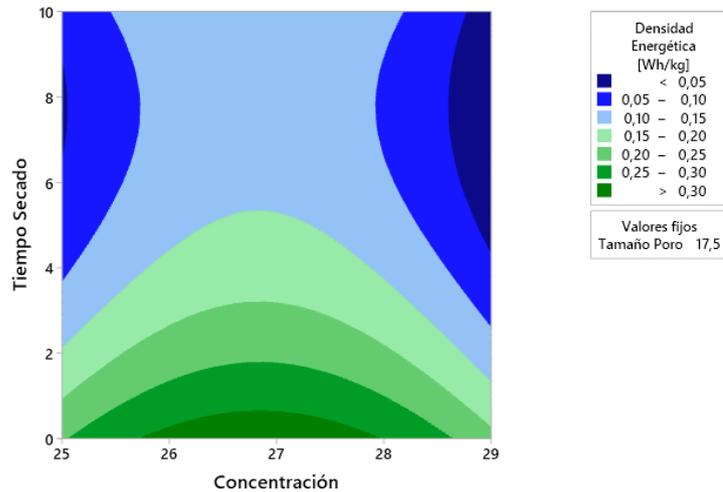


Figura 4-28 Gráfica de contorno con respuesta en densidad energética

Respecto a su representación en 3 dimensiones, se puede observar en la Figura 4-29 que la superficie de respuesta creada es de tipo silla de montar, al igual que ocurría en el análisis de la capacitancia, y en la gráfica anterior, donde se emplea el tamaño de poro.

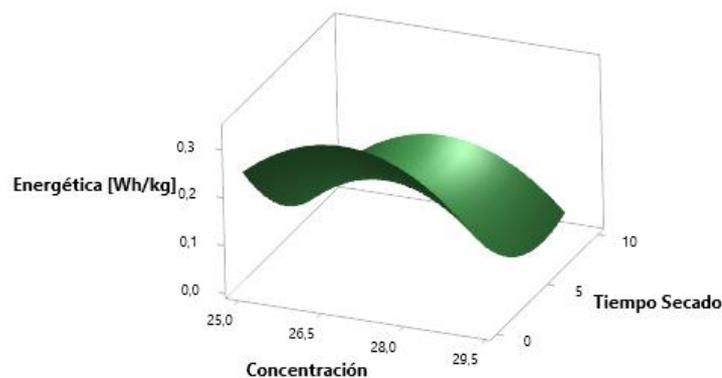


Figura 4-29 Gráfica de superficie con respuesta en densidad energética

Como última combinación a representar en este análisis, resta la de la densidad energética frente al tamaño de poro y el tiempo de secado (Figura 4-30). En esta se aprecian distintas capas de la superficie, lo que equivale a zonas con similar valor de respuesta. Cabe destacar que las regiones con mayores valores son las de menor tamaño de poro y mínimo tiempo de secado, lo que viene a corresponderse con la zona inferior izquierda de la gráfica.

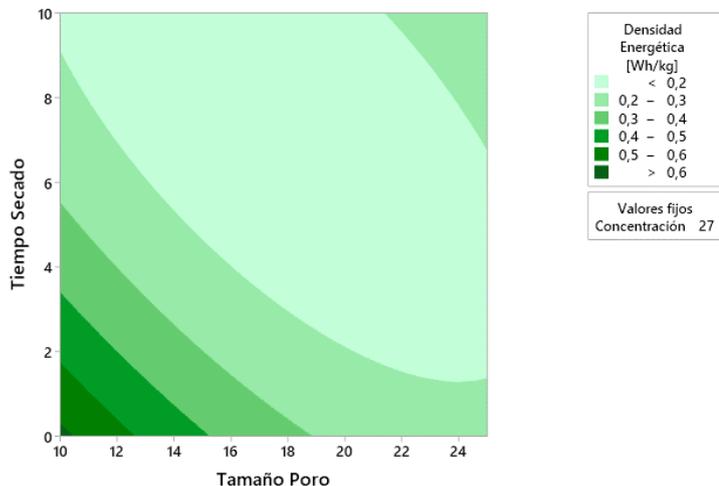


Figura 4-30 Gráfica de contorno con respuesta en densidad energética

Respecto a la representación tridimensional de la misma gráfica, se aprecia en la Figura 4-31 que su forma característica es la de una gráfica tipo valle. Esta, coincide con la gráfica del análisis de capacitancia, lo que refuerza la idea inicial de que se obtendrían resultados similares.

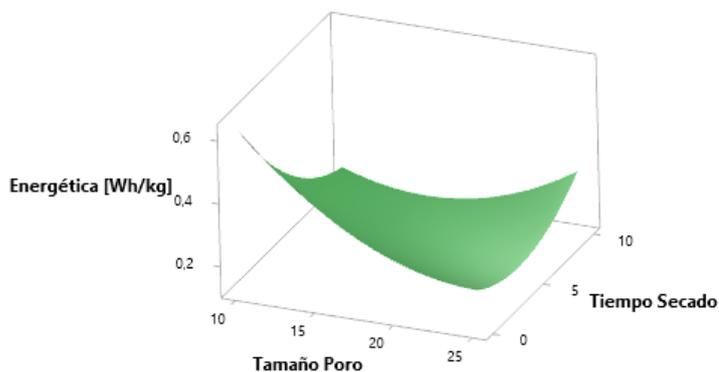


Figura 4-31 Gráfica de superficie con respuesta en densidad energética

Por último, empleando el modelo matemático propuesto, obtenido del estudio de los datos medidos en la experimentación, en la Tabla 4-10 se muestra la opción de máxima optimización para la respuesta en densidad energética, donde, empleando una concentración del 26,7%, un tamaño de poro de 0,01 mm y no dejándolo secar, se obtendría una densidad energética de 0,62 Wh/kg.

Solución	Concentración (%)	Tamaño de poro (um)	Tiempo de secado (min)	U (Wh/kg)
1	26,74	10	0	0,625

Tabla 4-10 Combinación con mayor optimización de respuesta en densidad energética

4.4 Potencia específica media

4.4.1 Prototipo 1 (Cloruro de sodio)

El análisis realizado en este apartado viene reflejado en la Tabla 4-11, donde, si se observan los valores p, se puede apreciar que no existe ningún factor que tenga una significancia destacable con la respuesta.

Término	Coef.	EE del coef.	Valor T	Valor p	FIV
Constante	81,8	13,1	6,25	0,002	
Concentración [%]	6,88	7,54	0,91	0,403	1,05
Tamaño Poro [um]	-8,39	7,35	-1,14	0,305	1,05
Tiempo Secado [min]	-0,38	7,54	-0,05	0,961	1,05
Concentración [%]*Concentración [%]	-4,4	10,8	-0,41	0,700	1,01
Tamaño Poro [um]*Tamaño Poro [um]	-10,1	12,5	-0,81	0,456	1,06
Tiempo Secado [min]*Tiempo Secado [min]	9,8	10,8	0,90	0,408	1,01
Concentración [%]*Tamaño Poro [um]	15,4	10,1	1,52	0,189	1,05
Concentración [%]*Tiempo Secado [min]	0,2	10,4	0,02	0,987	1,00
Tamaño Poro [um]*Tiempo Secado [min]	1,0	10,1	0,09	0,928	1,05

Tabla 4-11 Significancia de los factores estudiados en el supercapacitor 1

En cuanto a la validez del modelo matemático establecido para describir el comportamiento de dicha variable, los valores obtenidos muestran un porcentaje de variación en la respuesta del 57,24%, lo que supone una adaptación un tanto justa por parte del modelo a los datos obtenidos experimentalmente; y un valor de 20,77 para la desviación estándar.

Como suplemento añadido de forma gráfica a los resultados de significancia de la Tabla 4-11, en la Figura 4-32 se muestra un diagrama de Pareto donde se observa de forma inequívoca la poca significancia de los factores establecidos respecto a la respuesta obtenida en forma de potencia específica media, ya que en ninguno de los casos se consigue aproximar a la línea establecida como referencia.

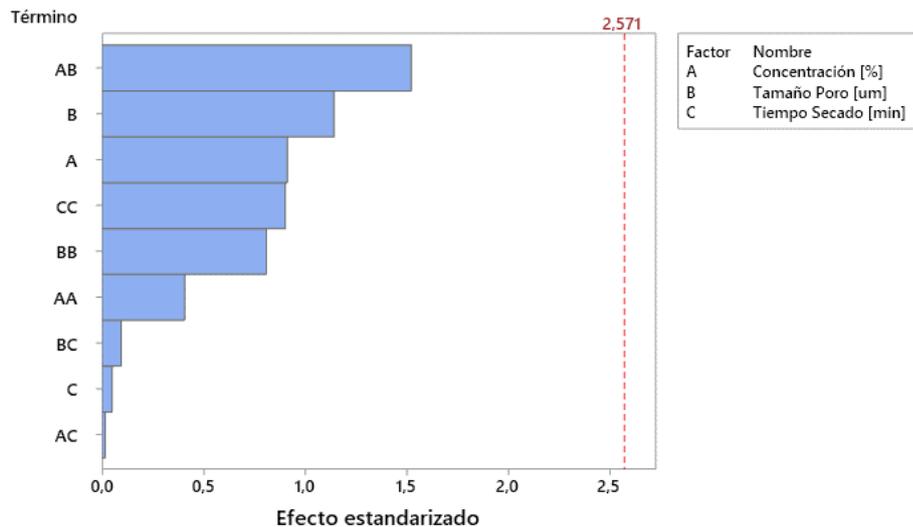


Figura 4-32 Diagrama de Pareto para la respuesta a la potencia específica media

Una vez analizados analíticamente los factores, mediante gráficas de contorno, seguidas de gráficas de superficie se aportará algo de luz respecto a la forma creada por cada superficie de respuesta para cada casuística.

En primer lugar, en la Figura 4-33, donde se emplea la concentración de la disolución de agua y cloruro de sodio como eje horizontal, y el tamaño de poro del papel separado como eje de profundidad; se puede observar que la capa donde se dan los valores máximos de potencia específica media recorre en forma diagonal la gráfica, como si de una función de pendiente constante se tratara. De esta forma, comienza con la región en donde la concentración y el tamaño de poro son mínimas, en torno al 10% en peso y 10 μm respectivamente, llegando hasta regiones donde la concentración es máxima y el tamaño de poro se sitúa en la zona media superior, en torno a los 22 μm .

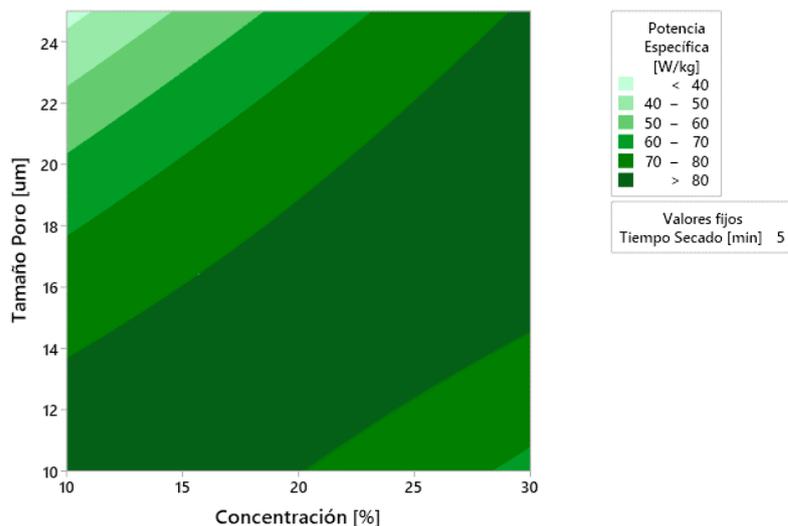


Figura 4-33 Grafica de contorno con respuesta en potencia específica media

Respecto a su representación tridimensional, en la Figura 4-34 se puede observar claramente la forma de cresta, en este caso estacionaria, ya que no se observa que aumente o disminuya la respuesta a lo largo de su extensión.

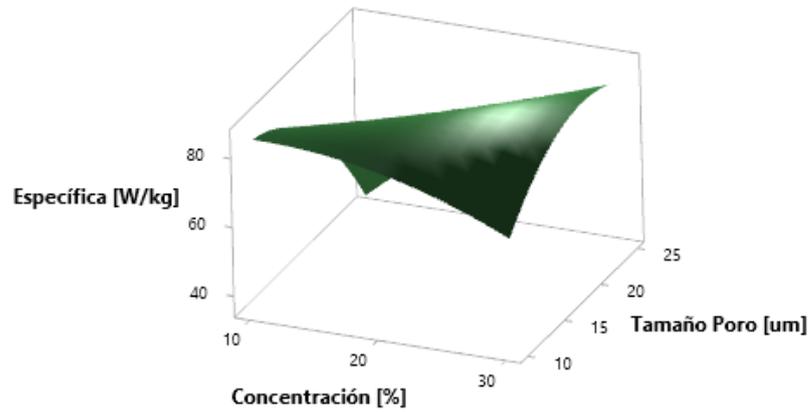


Figura 4-34 Gráfica de superficie con respuesta en potencia específica media

En la segunda representación, mostrada por la Figura 4-35, se puede observar que la respuesta en la potencia específica media aumenta en dos direcciones, mientras que en la zona central esta es menor. Por un lado, la respuesta aumenta para altas concentraciones, mientras que también lo hace con tiempos de secado extremos, es decir, cuando no se deja secar el papel separador, y cuando este se deja secar durante el máximo tiempo.

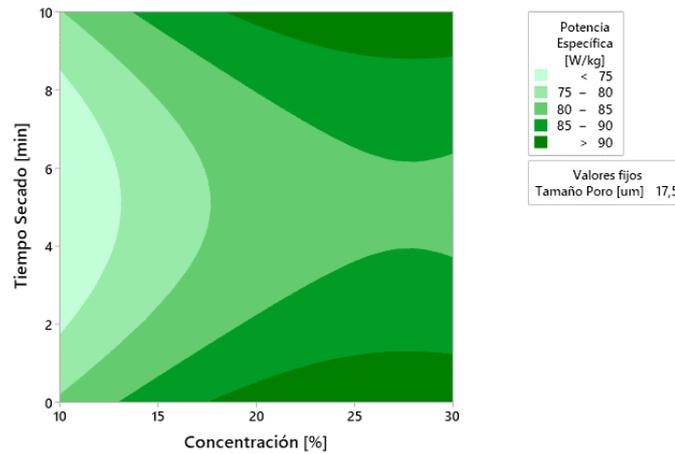


Figura 4-35 Grafica de contorno con respuesta en potencia específica media

En cuanto a su representación en 3 dimensiones, en la Figura 4-36 viene representada empleando los mismo ejes que la gráfica de contorno anterior para una mejor comprensión. Esta superficie muestra una forma de silla de montar un tanto inclinada, ya que los valores donde aumenta la respuesta se encuentran en los extremos, a la vez que las regiones centrales provocan una disminución de la respuesta.

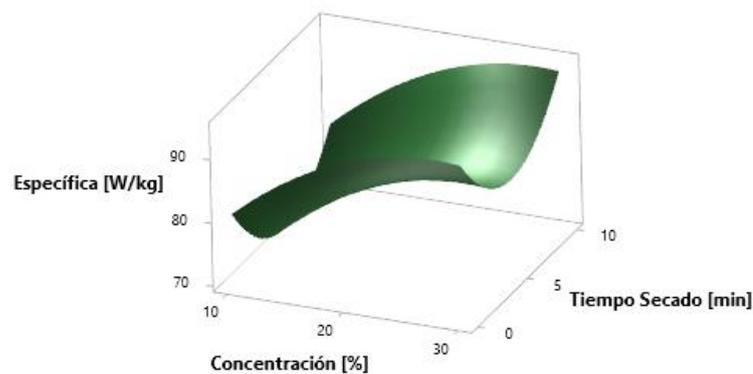


Figura 4-36 Gráfica de superficie con respuesta en potencia específica media

En la tercera combinación a representar, se muestra el tamaño de poro y el tiempo de secado como ejes, tal y como se muestra en la Figura 4-37. En ella, al igual que en la representación anterior, se aprecia que los máximos valores de respuesta se encuentran hacia dos direcciones, en zonas de concentración media-baja y, tanto en zonas donde el tiempo de secado es mínimo y máximo.

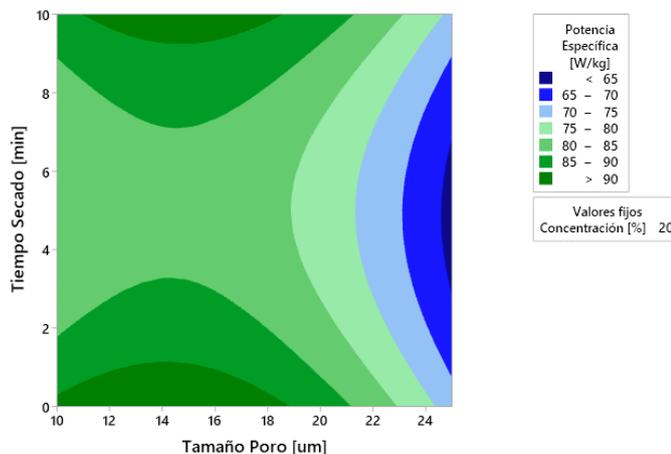


Figura 4-37 Grafica de contorno con respuesta en potencia específica media

Como representación tridimensional, se obtiene en la Figura 4-38 una forma de silla de montar, resultado similar a la anterior representación, aunque, en este caso, la mayor pendiente de descenso se encuentra en la zona opuesta a la anterior, hacia la zona derecha, donde el tamaño de poro aumenta.

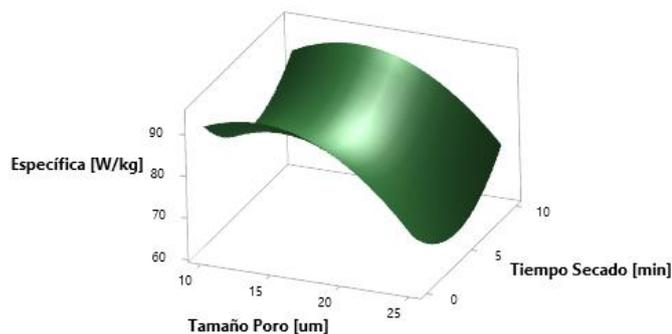


Figura 4-38 Gráfica de superficie con respuesta en potencia específica media

Por último, se obtiene como solución más optimizada la representada en la Tabla 4-12, aquella que emplea una concentración del 10,2%, un tamaño de poro de 10um y sin tiempo de secado, donde se obtiene una potencia específica media de unos 95,5 W/kg.

Solución	Concentración (%)	Tamaño de poro (um)	Tiempo de secado (min)	U (Wh/kg)
1	10,20	10	0	95,51

Tabla 4-12 Combinación con mayor optimización de respuesta en potencia específica media

4.4.2 Prototipo 2 (Sulfato de zinc)

En este apartado se llevará a cabo el análisis de la significancia de los factores respecto a la potencia específica media del dispositivo. Este viene reflejado en la Tabla 4-13 y, observando la 5ª columna, referida a los p-valores, se puede apreciar cómo no hay factores con una significancia reseñable, ya que ninguno de ellos es inferior al valor de 0,05. Por otro lado, en la última columna se pueden apreciar los valores del FIV, los cuales indican que los coeficientes de regresión se obtuvieron eficientemente.

Término	Coef.	EE del coef.	Valor T	Valor p	FIV
Constante	100,0	14,0	7,13	0,001	
Concentración [%]	3,70	8,07	0,46	0,666	1,05
Tamaño Poro [um]	8,66	7,87	1,10	0,321	1,05
Tiempo Secado [min]	12,97	8,07	1,61	0,169	1,05
Concentración [%]*Concentración [%]	-7,4	11,6	-0,64	0,551	1,01
Tamaño Poro [um]*Tamaño Poro [um]	-17,9	13,4	-1,34	0,237	1,06
Tiempo Secado [min]*Tiempo Secado [min]	-17,5	11,6	-1,51	0,191	1,01
Concentración [%]*Tamaño Poro [um]	3,1	10,8	0,29	0,783	1,05
Concentración [%]*Tiempo Secado [min]	-2,1	11,1	-0,19	0,854	1,00
Tamaño Poro [um]*Tiempo Secado [min]	-18,7	10,8	-1,72	0,145	1,05

Tabla 4-13 Significancia de los factores estudiados en el supercapacitor 2

Como resumen de los resultados del modelo propuesto, se ha obtenido que el valor de la desviación estándar (S) tiene un valor de 22,25, un tanto elevado, lo que nos indica que la descripción de la respuesta no será tan buena como en los apartados anteriores, mientras que, el porcentaje de variación en la respuesta (R^2) es del 68,59%, mucho más pequeño que en los 2 análisis anteriores de las variables de respuesta, lo que implica una peor adaptación del modelo a los resultados obtenidos experimentalmente.

Como complemento gráfico a los resultados de significancia anteriores, en la Figura 4-39 se muestra el diagrama de Pareto, donde se puede observar con claridad la poca significación de los factores establecidos respecto a la respuesta obtenida en forma de potencia específica media, ya que en ninguno de los casos queda siquiera cerca de la línea establecida como referencia.

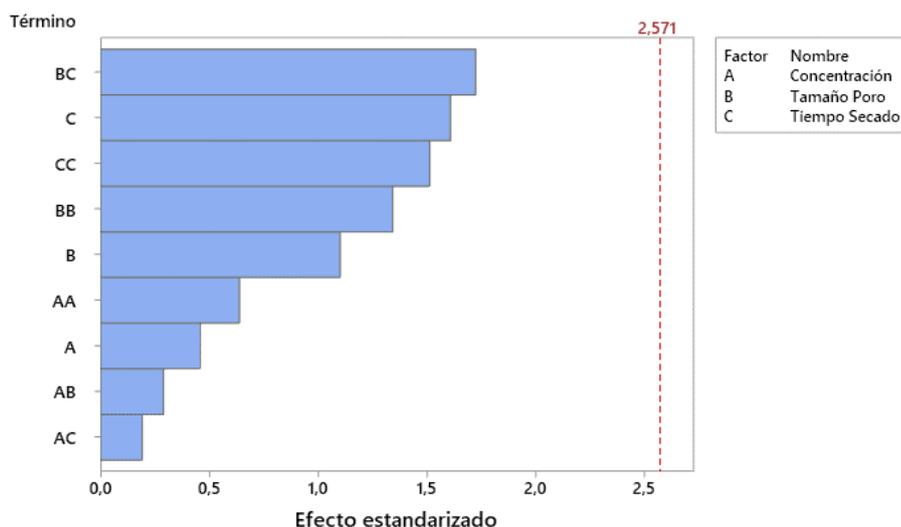


Figura 4-39 Diagrama de Pareto para la respuesta a la potencia específica

A continuación, se va a realizar la complementación de los resultados obtenidos numéricamente mediante un conjunto de gráficas, tanto de contorno como de superficie tridimensionales. En la Figura 4-40 se puede observar de una forma clara las distintas capas de la superficie de respuesta generada al

utilizar la concentración de disolución en el electrolito y el tamaño de poro como ejes de referencia. En ella se aprecia que los valores máximos de potencia específica media se encuentran en la zona media superior de ambos ejes, es decir, en torno al 28% de concentración y los 20 μm de tamaño de poro.

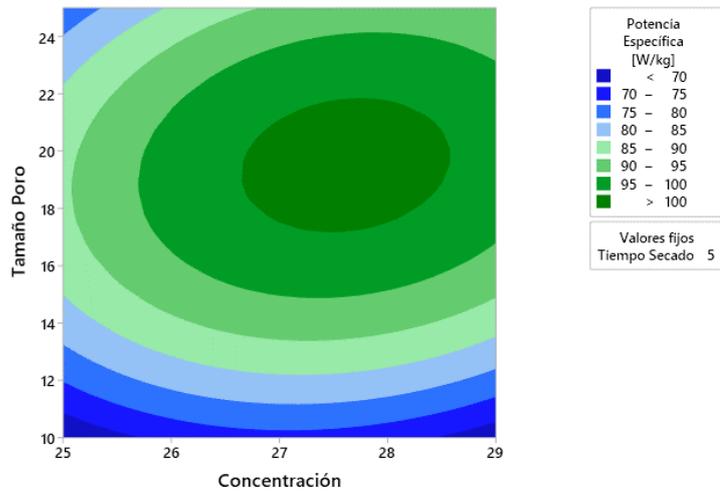


Figura 4-40 Gráfica de contorno con respuesta en potencia específica media

Como complemento a la gráfica anterior, en la Figura 4-41, se muestra la forma generada en esta respuesta. Esta tiene una clara forma de montaña, donde se aprecia fácilmente una cima, asociada a una región donde los valores de la variable de respuesta son máximos.

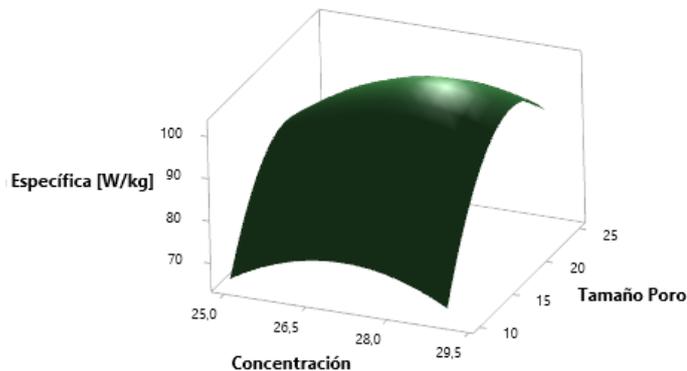


Figura 4-41 Gráfica de superficie con respuesta en potencia específica media

En la siguiente gráfica de contorno, representada por la Figura 4-42, se emplea una representación de la respuesta en potencia específica media en función de la concentración y el tiempo de secado. Al igual que en la gráfica anterior, la capa donde se encuentran los máximos está en la zona media superior, en torno al 27,5% de concentración y los 7 minutos de tiempo de secado.

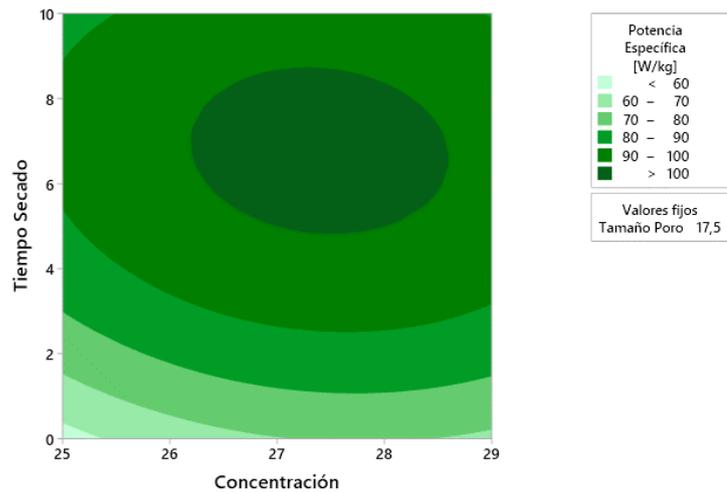


Figura 4-42 Gráfica de contorno con respuesta en potencia específica media

En la Figura 4-43 se muestra la representación en 3 dimensiones de la gráfica anterior, donde, al igual que en el caso anterior, tiene una forma claramente de montaña, cuya cima se encuentra en la región asociada al color verde más oscuro de la Figura 4-42.

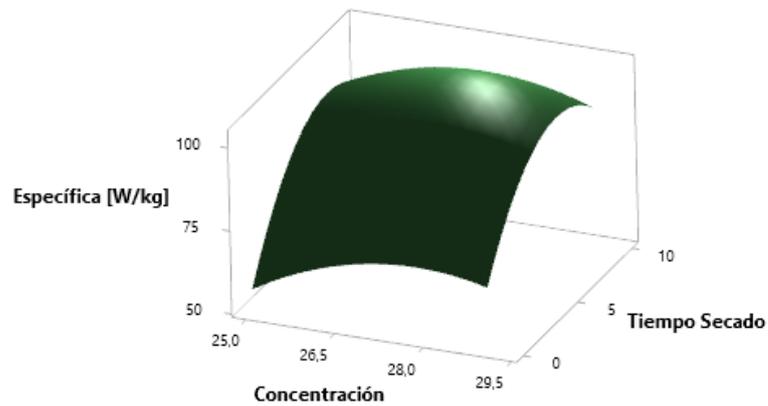


Figura 4-43 Gráfica de superficie con respuesta en potencia específica media

Como última combinación de representación, se muestra en la Figura 4-44 una representación con el tamaño de poro y el tiempo de secado como ejes. De forma análoga a las dos anteriores representaciones, la región de mayor valor de respuesta se encuentra en ambas zonas medias superiores.

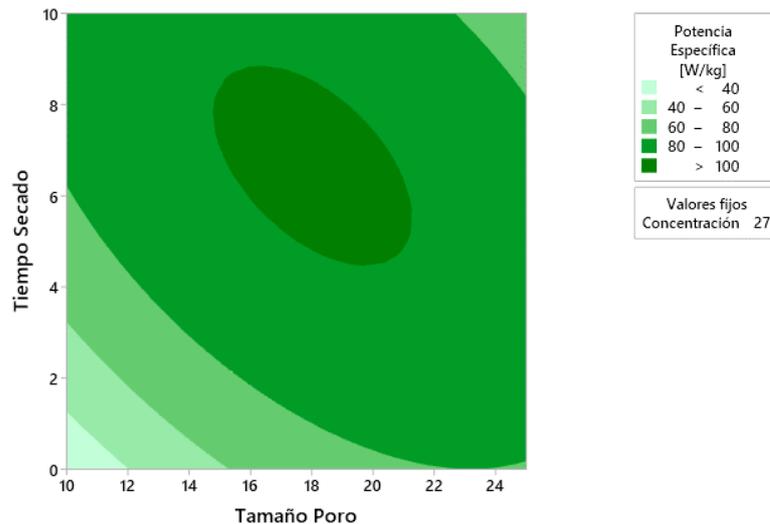


Figura 4-44 Grafica de contorno con respuesta en potencia específica media

Como información ampliatoria, en la Figura 4-45 se representa la gráfica de superficie, equivalente tridimensional a la gráfica de contorno anterior, cuya forma característica es la de montaña, con un máximo simple en la cima de esta, y cuya región se encuentra en las zonas mencionadas anteriormente.

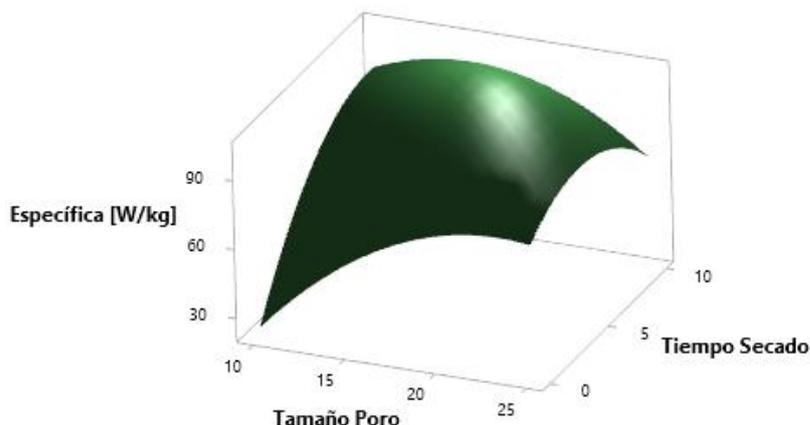


Figura 4-45 Gráfica de superficie con respuesta en potencia específica media

Por último, en la Tabla 4-14 se muestra la solución de máxima optimización para esta variable de respuesta, donde, aplicando una concentración de en torno al 27,4%, un tamaño de poro de 18,2 μm y un tiempo de secado de aproximadamente 6 minutos 30 segundos, se obtendría una potencia específica media de 102,8 W/kg.

Solución	Concentración (%)	Tamaño de poro (μm)	Tiempo de secado (min)	U (Wh/kg)
1	27,46	18,18	6,56	102,79

Tabla 4-14 Combinación con mayor optimización de respuesta en potencia específica media

4.5 Comparación con soluciones actuales

Primeramente, cabe mencionar que, pese a que existe un gran número de elementos disponibles para emplear en este tipo de dispositivos, al igual que un inmenso número de combinaciones posibles en las que intercambiar distintos materiales; se ha decidido emplear únicamente los resultados de los dos prototipos fabricados en este trabajo, ya que son de los que se tiene datos y mediciones tomadas bajo unas condiciones experimentales conocidas. Debido a esto mismo, se ha optado por emplear, mediante

el modelo matemático creado a partir de los datos obtenidos experimentalmente, la opción donde se optimicen las 3 variables de respuesta estudiadas, la capacitancia, la densidad energética y la potencia específica media, de cada dispositivo.

De esta forma, en la Tabla 4-15 se muestran las opciones propuestas para la optimización de las 3 variables de respuesta a la vez. En ella, se aprecia que la mejor combinación en el supercapacitor 1 supone un 30% en peso de cloruro de sodio como concentración, un papel con tamaño de poro de 25 μm y un tiempo de secado de 10 minutos, para obtener una capacitancia de 1,33 Faradios, 1,25 Wh/kg de densidad energética y 91,7 W/kg de potencia específica media. Para la optimización triple en el segundo supercapacitor, se puede apreciar unos resultados en capacitancia de 0,39 Faradios, 0,5 Wh/kg en densidad energética, y de 44,9 W/kg de potencia específica media, gracias a la combinación que emplea un 26,9% de concentración en masa de sulfato de zinc, un papel con un tamaño de poro de 10 μm y un tiempo de secado de aproximadamente 1 minuto 42 segundos.

Disp.	Concentración (%)	Tamaño de poro (μm)	Tiempo de secado (min)	C (F)	U (Wh/kg)	Pe (W/kg)
Supercap. 1	30	25	10	1,33	1,25	91,71
Supercap. 2	26,89	10	1,71	0,39	0,50	44,94

Tabla 4-15 Combinaciones para triple máxima optimización en ambos supercapacitores

Tras haber obtenido las combinaciones con las que conseguir los resultados óptimos, se han introducido en un Diagrama de Ragone, ya que este tipo de gráfico permite, con un simple vistazo, reflejando la densidad energética en función de la potencia específica; conocer cuál es la posición que ocupa esta tecnología frente a las otras opciones, cuál podría ser el empleo óptimo de las tecnologías que se están estudiando, para aprovechar al máximo tanto las capacidades energéticas que dispone como el tipo de comportamiento que ofrece.

En la Figura 4-46 se muestra un Diagrama de Ragone donde se emplea una escala adecuada a los resultados obtenidos, y donde se pueden distinguir las distintas tecnologías existentes hoy en día, permitiendo de esta forma que, en base a unos resultados, pueda enmarcarse cada dispositivo en cualquiera de los grupos establecidos. Una vez disponible el diagrama, solo basta con fijarse en los resultados optimizados, obtenidos en base a un modelo matemático creado a partir de unos datos experimentales, para obtener el lugar en el que se encuadran los dos prototipos de supercapacitores con los que se ha ensayado.

El primer dispositivo, formado con electrodos de grafito y empapado en electrolito de disolución de cloruro de sodio con agua, obtuvo una densidad energética optimizada de 1,255 Wh/kg y una potencia específica media, también optimizada matemáticamente, de 91,71 W/kg, por lo que se ubicaría en la zona central del grupo de supercondensadores coloreado en naranja, tal y como se muestra en la Figura 4-46 con el número 1.

Respecto al segundo dispositivo, está formado por electrodos de grafito, con una mezcla de carbón activo y silicato de sodio adherida a cada una de las caras, y por una disolución de sulfato de zinc y agua, empleada como electrolito para empapar el dispositivo. Este, obtuvo una densidad energética optimizada de 0,5 Wh/kg, y una potencia específica media de 44,9 W/kg, también optimizada matemáticamente; por lo tanto, se ubicaría ligeramente más retrasado en el eje horizontal y en una posición inferior en el eje vertical, que el prototipo 1, pero igualmente dentro del grupo perteneciente al de los supercondensadores, tal y como muestra la Figura 4-46 con el número 2.

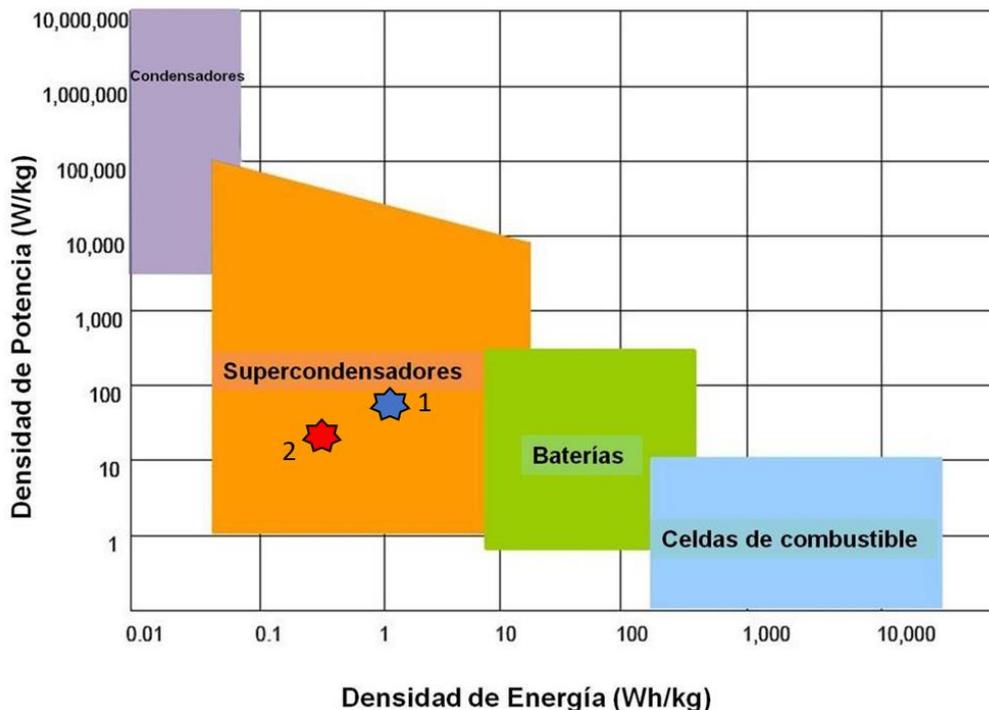


Figura 4-46 Ubicación de los prototipos dentro del Diagrama de Ragone [59]

En base a estos resultados, y ya que el prototipo 1, formado por cloruro de sodio como electrolito, ha obtenido una mayor densidad energética que el prototipo 2, formado por un electrolito de sulfato de zinc; así como una mayor potencia específica media; consigue una mejor posición en el Diagrama de Ragone, por lo que será este último el prototipo que se empleará para enfrentarlo a las baterías, empleadas actualmente en los submarinos de la Armada, y analizar si dicha tecnología es capaz de sustituir a la tecnología actual.

4.6 Estudio de aplicación en los submarinos de la Armada

Antes de entrar en detalle acerca de los cálculos necesarios para realizar una estimación de la cantidad necesaria de supercondensadores, es necesario conocer cuáles son los equipos en los que se va a tratar de implementar, al igual que los requerimientos energéticos de estos.

En primer lugar, nos centraremos en los submarinos empleados actualmente, los de la serie S-70, clase “Galerna” (Figura 4-47). Estos tienen una eslora de 67,57 metros, una manga de 6,8 metros, un diámetro del casco resistente de 5,3 metros y un calado de 5,4 metros, lo que se traduce en un desplazamiento de 1750 toneladas en inmersión [59].

Respecto a su sistema de propulsión, emplea un motor eléctrico principal (MEP) de corriente continua de 2200 kW de potencia y un motor eléctrico, empleado para las velocidades de crucero, (MEC) de 23,4 kW de potencia [60].

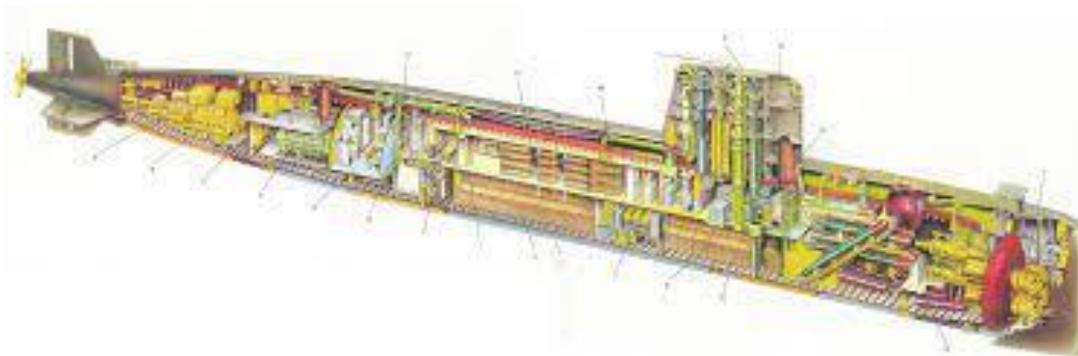


Figura 4-47 Interior de los submarinos S-70 [61]

Unos de los sistemas auxiliares, vital para poder navegar, el cual también se tratará de alimentar con la energía almacenada en los supercapacitores; es el sistema de aire de alta presión, empleado para desalojar las 250 toneladas de agua, alojada en sus distintos lastres, cuando necesita emerger a la superficie. Este sistema también se emplea para arrancar los motores de los 2 diésel-generadores, de 850 kW cada uno. Este sistema emplea distintas potencias, en función del nivel de carga al que se sometan los compresores, variando desde los 19,2 kW hasta los 22,6 kW de potencia [60].

Por último, el último apartado a mencionar de los S-70 es sobre su sistema de almacenamiento de energía, formado por un conjunto de baterías de Plomo-ácido, cuya densidad energética se encuentra entre los 33-42 Wh/kg y cuya potencia específica es de unos 180 W/kg, y las cuales ofrecen una capacidad total de 10.000 Ah, aportando una autonomía de 9000 millas náuticas a unos 9 nudos y un incremento de peso de 160 toneladas [62].

En segundo lugar, se pasará a describir las características de los futuros submarinos de la serie S-80, clase “Isaac Peral” (Figura 4-48). Estos tienen una eslora total de 80,81 metros, una manga de 11,68 metros, un diámetro del casco resistente de 7,3 metros y un calado de unos 5 metros, lo que se traduce en un desplazamiento de hasta 2960 toneladas en inmersión [63].

Respecto a su sistema de propulsión, emplea un motor eléctrico principal (MEP) de 3500 kW de potencia. A continuación, en relación con las siguientes características citadas de este submarino, puesto que estos submarinos se encuentran aún en fases de pruebas y los datos precisos no se encuentran disponibles, cabe reseñar que los siguientes datos han sido obtenidos de distintas fuentes periódicas, en lugar de una fuente oficial.

En cuanto a sus sistemas de aire a alta presión, los compresores empleados para llenar las botellas de aire a presión, las cuales son las que realizan el “soplado”, corresponden a la “Serie 5000” de la empresa “Sauer y Rubeda” [64], y cuyas características técnicas corresponden a una potencia requerida de entre 34,4 kW y 52 kW de potencia [65].

Por último, en cuanto a su sistema de baterías, fabricado por la empresa “Tudor”; estará formado por 360 elementos de acumuladores de plomo-ácido [66], el cual pesa 665 kg cada uno, lo que suma un peso total de 240 toneladas [67]. En base a estos datos y en ausencia de un dato de capacidad oficial, se ha estimado, aplicando una relación de proporcionalidad directa con las baterías, de igual composición que su antecesor, de los S-70, que su capacidad sería de unos 15.000 Ah.

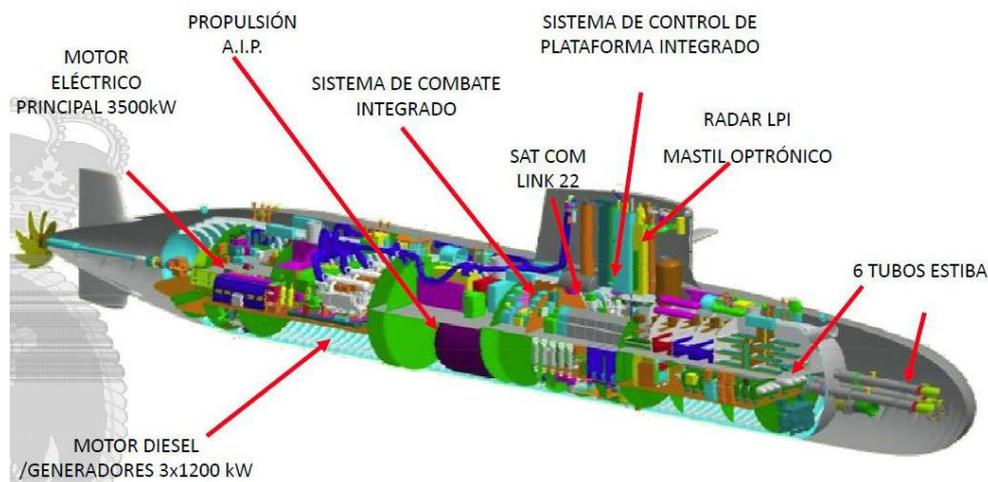


Figura 4-48 Interior de los submarinos S-80 [68]

A continuación, en la Tabla 4-16 se adjuntan, una tabla comparativa entre las principales características principales de ambas plataformas, con el fin de poder observar con mayor facilidad la evolución que se ha llevado a cabo.

Característica principal	S-70 Clase “Galerna”	S-80 Clase “Isaac Peral”
Eslora [m]	69,7	80,81
Manga [m]	6,8	11,68
Diámetro [m]	5,3	7,3
Desplazamiento (inmersión) [t]	1.750	2.960
Potencia máx. del MEP [kW]	2.200	3.500
Compresores [kW]	19,2 – 22,6	43 - 62
Capacidad de batería [Ah]	10.000	15.000

Tabla 4-16 Comparación de las características principales de los submarinos S-70 y S-80

4.6.1 S-70 Clase “Galerna”

A continuación, se realizará una estimación de la cantidad de energía de la que se dispondría empleando únicamente dispositivos similares al prototipo propuesto en el apartado anterior, lo que nos permitirá estimar una autonomía aproximada de los equipos anteriormente caracterizados.

Por un lado, los datos de la batería actual son conocidos. Una capacidad de 10.000 Ah y un peso total de 160 toneladas, mientras que, por otro lado, del prototipo se conoce su densidad energética, que es de 1,25 Wh/kg y su potencia específica media, que es de 91,71 W/kg, por lo que, si se emplea una cantidad, cuyo peso sea el mismo que el del conjunto de las baterías, se obtendría una capacidad energética de 200 kWh.

4.6.1.1 Motores eléctricos

El motor eléctrico principal (MEP) es accionado por un sistema de conmutaciones que le permite trabajar a 3 distintos regímenes de potencia, 2.200 kW, 663 kW y 235 kW, a 520 V, 320 V y 160 V, respectivamente. Estas unidades se ven relacionadas a través de la ecuación (Ec. 9), ya que su funcionamiento es mediante corriente continua, donde P representa la potencia, V representa el voltaje al que trabaja el equipo, e I representa la intensidad de corriente que circula a través del equipo [69].

$$P = V I \quad (\text{Ec. 9})$$

Si se emplea el motor a 520V, 320 V y 160 V de forma continua, y asumiendo que no existen pérdidas de carácter mecánico o caloríficas, entre otras; se obtendrían unos consumos de 4.230,8 A, 2.071,9 A y 1.468 A, respectivamente; obteniendo unas autonomías de 2 horas y 20 minutos, 4 horas y 50 minutos, y 6 horas y 48 minutos. En cuanto al motor eléctrico de crucero (MEC), requiere una potencia de 23,4 kW trabajando a 320V, lo que supone un consumo de 73 Amperios y una autonomía estimada de 136 horas y 45 minutos.

A continuación, para obtener las autonomías logradas empleando el supercapacitor, solo basta con tomar la energía total almacenada, 200 kWh, y dividirlo la potencia consumida por cada equipo para cada situación, obteniendo una autonomía de 5 minutos para el motor a máxima potencia, 18 minutos a potencia media y 51 minutos para la situación de mínima potencia en el MEP. Respecto al MEC, en este caso se obtendría una autonomía de 8 horas y 32 minutos. A modo de resumen gráfico, en la Tabla 4-17 se muestra una comparación de las autonomías estimadas para cada régimen de cada motor eléctrico, en función de la tecnología empleada.

Regímenes de potencia	Baterías de plomo-ácido	Supercapacitor de cloruro de sodio
MEP a 2.200 kW	2 horas 20 minutos	5 minutos
MEP a 663 kW	4 horas 50 minutos	18 minutos
MEP a 235 kW	6 horas 48 minutos	51 minutos
MEC	136 horas 45 minutos	8 horas 32 minutos

Tabla 4-17 Comparación de autonomías de los motores eléctricos en los S-70

4.6.1.2 Compresores

En este apartado, siguiendo con la dinámica del apartado anterior, se calcularán las autonomías estimadas para los compresores del circuito de aire de alta presión en función de la tecnología empleada como fuente de almacenamiento de energía.

Los compresores empleados a bordo de estos submarinos, al igual que el motor principal, funcionan a 3 distintos regímenes. La máxima potencia equivale a 22,6 kW y trabaja a 440 V, la potencia media equivale a 21 kW y trabaja a 320 V, y mínima potencia equivale a 19,2 kW, trabajando a un voltaje de 240 V. El rendimiento obtenido por estos equipos en la tarea de desalojar, también llamado soplar, el agua de los distintos lastres del submarino hacia el exterior, para poder emerger, varía en función de la profundidad a la que se encuentre y de los grupos de compresores que se empleen para ello. Estos datos se resumen en la Tabla 4-18, donde se muestran, para cada configuración de grupos de compresores encendidos, la cantidad de agua desalojada en 10 segundos, la cota de profundidad y el tiempo total requerido para el vaciado completo de los lastres.

N.º Grupos activos	Agua desalojada en 10s [toneladas]	Profundidad [metros]	Tiempo total de soplado [minutos]
1	15,5	50	2,6
1	8,5	100	4,9
2	17	100	2,45
2	6,4	300	6,5

Tabla 4-18 Resumen de rendimientos de los compresores durante el soplado de los lastres

En el caso de emplear las baterías de plomo-ácido, cuya capacidad era de 10.000 Ah, aplicando la expresión (Ec. 9), al igual que en el caso anterior, de los motores eléctricos, se obtendrían unos consumos de 51,3 A, 65 A y 80 A, lo que se traduciría en unas autonomías de 194 horas y 40 minutos, 152 horas y 22 minutos, y 125 horas, respectivamente.

En el caso de emplear un banco con supercapacitores como los del dispositivo propuesto, las autonomías logradas serían de 8 horas y 50 minutos para máxima potencia, 9 horas y 30 minutos para media potencia, y 10 horas y 25 minutos para mínima potencia.

A modo de resumen visual, en la Tabla 4-19 se muestran las autonomías logradas para cada régimen de potencia, en función de la tecnología de almacenamiento de energía empleada.

Régimen de potencia	Baterías de plomo-ácido	Supercapacitor de cloruro de sodio
Potencia máxima	194 horas 40 minutos	8 horas 50 minutos
Media potencia	152 horas 22 minutos	9 horas 30 minutos
Potencia mínima	125 horas	10 horas 25 minutos

Tabla 4-19 Comparación de autonomías de los compresores en los S-70

4.6.2 S-80 Clase “Isaac Peral”

En este apartado, al igual que se realizó en el anterior del submarino de la serie S-70, se va a realizar un análisis sobre la autonomía que se obtendría para el motor eléctrico principal y para sus compresores empleando, en primer lugar, las baterías de las que dispone actualmente, de plomo-ácido; y en segundo lugar, empleando únicamente un banco de supercapacitores como el prototipo que se propone.

En este caso, los submarinos de la serie S-80 se ha estimado que poseen una batería con una capacidad de 15.000 Ah.

Por otro lado, nuestro prototipo posee una densidad energética de 1,25 Wh/kg y una potencia específica media de 91,71 W/kg. Empleando una cantidad cuyo peso total sea equivalente al conjunto de baterías de plomo, 240 toneladas, se obtendría una capacidad total de 300 kWh.

4.6.2.1 Motor eléctrico

En este caso, los datos obtenidos acerca de estos submarinos sólo indican la potencia máxima de su motor eléctrico principal, que es de 3.500 kW y, puesto que se desconoce el voltaje de trabajo, se ha estimado, para poder realizar los cálculos, en base a los datos conocidos de los S-70 que será de unos 640 V. Esto, aplicando el mismo procedimiento matemático que en el apartado anterior, con la expresión (Ec. 9), implica un consumo de 5468,7 A. Obtenido este dato, solo queda dividirlo a la capacidad total de 15.000 Ah, obteniendo una autonomía de 2 horas y 44 minutos.

Respecto al segundo caso, empleando íntegramente un banco de supercapacitores como el prototipo 1, el cual ofrece una capacidad de 300 kWh. Por último, al dividir este valor entre la potencia consumida, se obtiene una autonomía de 5 minutos. Como resumen, en la Tabla 4-20 se comparan ambas autonomías, según el tipo de tecnología que se emplee para almacenar la energía a bordo.

Regímenes de potencia	Baterías de plomo-ácido	Supercapacitor de cloruro de sodio
MEP a 2.200 kW	2 horas 44 minutos	5 minutos

Tabla 4-20 Comparación de autonomías del motor eléctrico en los S-80

4.6.2.2 Compresores

En este caso, los compresores empleados en estos submarinos poseen también 3 regímenes distintos de trabajo en función de la carga que deban soportar: máxima potencia, requiriendo 52 kW a un voltaje estimado de 620 V, media potencia, empleando 43,2 kW a un voltaje estimado de 440 V, y mínima potencia, lo que equivale a una potencia de 34,4 kW a un voltaje estimado de 320 V.

En este caso, no se dispone de los rendimientos obtenidos en la fase de soplado, por lo que se asumirá que, pese al aumento del volumen inundado en el nuevo submarino respecto a su antecesor, al ser equipos más potentes, obtendrá unos parámetros de funcionamiento similares a los de la serie S-70.

Una vez aclaradas las hipótesis iniciales, se empleará un procedimiento similar al cálculo de autonomía en los compresores del S-70. En base a la ecuación (Ec. 9), el consumo de un compresor para un régimen de máxima potencia será de 84 A, 98 A para régimen de media potencia, y de 107,5 A para un régimen de baja potencia. Aplicando la división de loa 15.000 Ah entre cada uno de los consumos se obtienen unas autonomías de 178 horas y 34 minutos, 153 horas y 3 minutos y de 139 horas y 32 minutos, respectivamente.

En caso de emplear los 300 kWh aportados por los supercapacitores, las autonomías serían de 5 horas 46 minutos para el régimen máximo, 6 horas y 56 minutos para el intermedio, y de 8 horas 43 minutos para el régimen de menor potencia.

A continuación, en la Tabla 4-21 se puede observar, a modo de resumen, cuáles serían las autonomías obtenidas por cada tecnología en función del régimen de potencia escogido.

Régimen de potencia	Baterías de plomo-ácido	Supercapacitor de cloruro de sodio
Máxima	178 horas 34 minutos	8 horas 43 minutos
Media	153 horas 3 minutos	6 horas 56 minutos
Mínima	139 horas 44 minutos	5 horas 46 minutos

Tabla 4-21 Comparación de autonomías de los compresores en los S-80

5 CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

5.1 Conclusiones

Tras obtener todos los resultados, podemos observar que el sistema de baterías obtiene una autonomía superior, por lo que, esto lleva a la conclusión de que existe una notable diferencia entre los resultados de autonomía obtenidos con el prototipo y los obtenidos mediante las baterías de plomo-ácido. Por lo tanto, un banco de estos supercapacitores, no serviría, al menos por ahora, para emplearse como fuente de almacenamiento energético principal, pues como podemos observar, pese a que aportaría beneficios en el ámbito medioambiental, supondría una disminución de la autonomía del submarino.

Esta conclusión, encaja en su totalidad con lo que podemos observar en la actualidad, pues tal y como se ha reseñado en apartados anteriores, esta clase de dispositivos no son empleados como sistemas únicos, sino como complementación a los sistemas actuales de baterías o de combustión, ya que, es en este ámbito donde se consigue obtener el máximo potencial de ambas tecnologías. De esta forma, el banco de supercapacitores se encargaría de absorber la energía de forma más rápida y de entregarla en situaciones puntuales, repetitivas y de corta duración, tales como los cambios de velocidad o el proceso de arranque de los motores; mientras que el sistema de baterías se emplearía para tareas con una continuidad, como mantener la velocidad de crucero, donde logran mejor desempeño.

Otro detalle que cabe mencionar es que algunos de los equipos de un submarino, como los compresores, a diferencia de los motores eléctricos, no están en continuo funcionamiento, ya que, al ser empleados para arrancar los motores o desalojar el agua contenida en los lastres; una vez se ha realizado la tarea, la cual conlleva unos pocos minutos como se muestra en la Tabla 4-18, estos no tienen por qué permanecer en funcionamiento. Por lo tanto, pese a que el prototipo analizado obtiene unas autonomías inferiores a las baterías, de ser empleado para equipos menos exigentes energéticamente, como los compresores, sería más que suficiente para cumplir con los requisitos de los mismos.

Tras esto, analizando cada uno de los objetivos propuestos al comienzo de este trabajo (1.3 Objetivos), podemos llegar a las siguientes conclusiones:

- El primer objetivo se ha alcanzado, ya que se ha conseguido aportar, y demostrar su validez para determinados equipos, de dos alternativas cuyos materiales son económicos, abundantes y fáciles de obtener, a la vez que no suponen un peligro para el medio ambiente.
- Se ha conseguido realizar un análisis del comportamiento de ambos prototipos, obteniendo unos resultados que han sido analizados en el presente documento.

- Se ha realizado un dimensionamiento en función de las necesidades energéticas requeridas por los equipos y sistemas de la plataforma, tanto en los submarinos actuales, de la serie S-70, como de los futuros sustitutos, los de la serie S-80.
- En base a los resultados obtenidos en el análisis experimental y al dimensionamiento necesario para satisfacer las necesidades de la plataforma, se han obtenido unas conclusiones claras sobre la viabilidad de estos a bordo de ambos submarinos.

5.2 Líneas futuras

Una vez finalizado el presente trabajo, habiendo cumplido los objetivos marcados, de cara a proporcionar unas líneas generales para todo aquel que quiera continuar en la línea de este trabajo, a continuación se propondrán unas ideas generales sobre qué posibles líneas futuras se pueden seguir, con el fin de, manteniendo las bases de eficiencia, economía y cuidado medioambiental propuestas por este trabajo, se pueda alcanzar una solución que mejore los resultados obtenidos, satisfaga íntegramente las necesidades energéticas de los actuales submarinos de la Armada y disminuya el impacto medioambiental de los actuales sistemas de almacenamiento energético.

5.2.1 Optimización del prototipo actual

Buscar la mejora del rendimiento del prototipo actual sin modificar su estructura es una de las distintas posibles opciones, pero no la única, ya que, también se podría tratar de disminuir el espesor entre las placas de los electrodos mediante un papel más fino, o aumentado el tamaño de las placas de los propios electrodos.

Centrándonos en la primera opción planteada, tal y como se especificó en el desarrollo de esta memoria, antes de comenzar los ensayos experimentales, el voltaje empleado para las mediciones fue de 1,7 Voltios, un valor conservador, teniendo en cuenta que estos dispositivos pueden soportar valores mayores, tal y como muestran otros ensayos con un prototipo similar al empleado en el presente trabajo [70]. De esta forma, empleando un valor mayor de voltaje, del orden de 2,5 Voltios, el cual seguiría sin llegar al punto de ruptura dieléctrica, y empleando las expresiones (Ec. 2), (Ec. 7) y (Ec. 8), se obtendría una densidad energética de 2,88 Wh/kg y una potencia específica media de 198,96 W/kg, lo que supone un aumento del 130% y del 117%, respectivamente. Ante estos valores de los que poder partir, los resultados de autonomías que se obtendrían en cada uno de los equipos de ambos submarinos serían los que se encuentran reflejados en la Tabla 5-1 y en la Tabla 5-2, donde se comparan estos nuevos con los obtenidos en el prototipo a un voltaje de 1,7 V.

Equipo	Supercapacitor a 1,7 V	Supercapacitor a 2,5 V
MEP (2.200 kW)	5 minutos	11 minutos
MEP (663 kW)	18 minutos	37 minutos
MEP (235 kW)	51 minutos	1 hora 42 minutos
MEC (23,4 kW)	8 horas 32 minutos	17 horas 26 minutos
Compresor a 22,6 kW	8 horas 50 minutos	18 horas 3 minutos
Compresor a 21 kW	9 horas 30 minutos	19 horas 25 minutos
Compresor a 19,2 kW	10 horas 25 minutos	21 horas 15 minutos

Tabla 5-1 Comparación de autonomías en función del voltaje de trabajo en un submarino S-70

Equipo	Supercapacitor a 1,7 V	Supercapacitor a 2,5 V
MEP (3.500 kW)	5 minutos	11 minutos
Compresor a 52 kW	8 horas 43 minutos	20 horas 5 minutos
Compresor a 43,2 kW	6 horas 56 minutos	16 horas
Compresor a 34,4 kW	5 horas 46 minutos	13 horas 17 minutos

Tabla 5-2 Comparación de autonomías en función del voltaje de trabajo en un submarino S-80

5.2.2 Estudio de otras composiciones

Cabe mencionar que en este trabajo se han analizado dos prototipos de entre todas las distintas composiciones que hoy en día existen. Los prototipos analizados en este trabajo, pese a obtener unos buenos resultados, sus composiciones no son las más habituales ni las que mejores resultados prometen, por lo que, en caso de que querer llegar a una combinación cuyas características sean similares a las baterías, sería necesario también buscar y analizar nuevas composiciones.

Tal y como se ha mencionado en el presente trabajo, existen 3 tipos principales de supercapacitores, dentro de los cuales se están realizando nuevas investigaciones y nuevos descubrimientos, por lo que no es de extrañar que, en un relativo corto período de tiempo, se consigan no solo igualar, sino superar las capacidades que ofrecen las baterías.

5.2.3 Estudio de implementación de un sistema híbrido

Esta última opción, pese a no involucrar íntegramente el empleo de supercapacitores, supone una línea de investigación que se está desarrollando en la actualidad, tal y como se ha mostrado en distintos ejemplos de este trabajo.

Ante esta situación, se propone la investigación de un sistema que implemente el funcionamiento de un pequeño conjunto de supercapacitores, cuyo incremento en el peso y volumen del conjunto no suponga una desventaja de mayor importancia que las posibles ventajas que pueda aportar; de tal forma que los supercapacitores sirvan para absorber y ceder energía de forma inmediata y con una capacidad de ofrecer unas potencias mayores a las de la batería, beneficiándose también de su amplia ventaja en cuanto a ciclos de uso se refiere, logrando alargar la vida útil de la batería, la cual sería empleada en momentos donde se requiera una cesión de energía constante y bajo unas condiciones donde la degradación sea mínima.

6 BIBLIOGRAFÍA

- [1] Armada Española, «Armada.defensa.gob,» [En línea]. Available: <https://armada.defensa.gob.es/ArmadaPortal/page/Portal/ArmadaEspañola/buquessubmarinos/prefLang-es/03s70--01galerna-s-71>. [Último acceso: 7 Marzo 2022].
- [2] C. L. SAIZ, «Armada.defensa.gob,» Diciembre 2015. [En línea]. Available: <https://armada.defensa.gob.es/archivo/rgm/2015/12/cap05.pdf>. [Último acceso: 2 Marzo 2022].
- [3] Armada Española, «Armada.defensa.gob,» [En línea]. Available: <https://armada.defensa.gob.es/ArmadaPortal/page/Portal/ArmadaEspañola/conocenosorganizacion/prefLang-es/03Flota--06FLOSUB>. [Último acceso: 3 Marzo 2022].
- [4] A. C. D. L. R. y. J. D. P. GARCÍA, «Armada.defensa.gob,» Julio 2020. [En línea]. Available: <https://armada.defensa.gob.es/archivo/rgm/2020/07/rgmjul20cap04.pdf>. [Último acceso: 2 Marzo 2022].
- [5] Armada Española, «Armada.defensa.gob,» [En línea]. Available: <https://armada.defensa.gob.es/ArmadaPortal/page/Portal/ArmadaEspañola/conocenospeciales/prefLang-es/05actividades--95trident--02unidades--13mistral-es>. [Último acceso: 3 Marzo 2022].
- [6] J. C. Rodriguez, «Ingenieromarino,» [En línea]. Available: <https://ingenieromarino.com/baterias-li-s-y-supercondensadores/#7-Bibliografia>. [Último acceso: 7 Febrero 2022].
- [7] M. Lago, «Motorpasión,» 25 Noviembre 2011. [En línea]. Available: <https://www.motorpasion.com/mazda/i-eloop-el-regenerador-de-energia-de-frenada-condensador-de-mazda>. [Último acceso: 2 Marzo 2022].
- [8] Híbridos y Electricos, «Híbridosyelectricos.com,» 24 Enero 2018. [En línea]. Available: <https://www.hibridosyelectricos.com/articulo/actualidad/abb-prueba-suiza-autobus-electrico-carga-20-segundos/20180124112351017020.html>. [Último acceso: 2 Marzo 2022].

- [9] ABB, «Abb.com,» 21 Agosto 2019. [En línea]. Available: <https://new.abb.com/news/es/detail/30445/abb-ofrece-mayor-interoperabilidad-en-el-mercado-de-autobuses-y-camiones-electricos>. [Último acceso: 3 Marzo 2022].
- [10] A. Sauras, «Autofacil.es,» 2 Agosto 2021. [En línea]. Available: <https://www.autofacil.es/tecnologia/lamborghini-sian-supercondensadores/261040.html>. [Último acceso: 2 Marzo 2022].
- [11] M. Herráez, «Autobild,» Septiembre Diciembre 2021. [En línea]. Available: <https://www.autobild.es/noticias/nawa-racer-primera-moto-electrica-300-km-autonomia-977583>. [Último acceso: 2 Marzo 2022].
- [12] R. A. d. I. I. Española, «rae,» [En línea]. Available: <https://dle.rae.es/submarino>. [Último acceso: 26 Enero 2022].
- [13] Curiosfera, «Curiosfera,» [En línea]. Available: <https://curiosfera-historia.com/quien-invento-el-submarino-historia/>. [Último acceso: 25 Enero 2022].
- [14] «Quora,» [En línea]. Available: <https://www.quora.com/Why-did-John-Philip-Holland-invent-the-submarine>. [Último acceso: 30 Enero 2022].
- [15] F. M. P. GRANADOS, «Archivos.csif,» 27 Febrero 2010. [En línea]. Available: https://archivos.csif.es/archivos/andalucia/ensenanza/revistas/csicsif/revista/pdf/Numero_27/FRANCISCO_M_PORCEL%20GRANADOS_1.pdf. [Último acceso: 26 Enero 2022].
- [16] T. F. y. E. Tamaro, «Biografiasyvidas.com,» [En línea]. Available: <https://www.biografiasyvidas.com/biografia/b/bushnell.htm>. [Último acceso: 12 Febrero 2022].
- [17] F. F. Mateos, «ElSnorkel,» 31 Marzo 2017. [En línea]. Available: <https://www.elsnorkel.com/2017/03/antecesoros-de-los-actuales-submarinos.html>. [Último acceso: 27 Enero 2022].
- [18] Amusingplanet, «Amusingplanet.com,» [En línea]. Available: <https://i.pinimg.com/736x/10/d0/b4/10d0b4e9659bba5ba2342f1669c46786--charleston-south-carolina-charleston-sc.jpg>. [Último acceso: 12 Febrero 2022].
- [19] E. Pérez, «Xataka,» 6 Octubre 2019. [En línea]. Available: <https://www.xataka.com/historia-tecnologica/ictineo-ii-primer-submarino-motor-a-vapor-fue-espanol-salio-puerto-barcelona>. [Último acceso: 27 Enero 2022].
- [20] M. G. Fernández, «Armada.es,» [En línea]. Available: <https://armada.defensa.gob.es/archivo/mardigitalrevistas/cuadernosihcn/71cuaderno/cap03.pdf>. [Último acceso: 27 Enero 2022].
- [21] Puertodeculturas.cartagena.es, «Puertodeculturas.cartagena.es,» [En línea]. Available: https://puertodeculturas.cartagena.es/detalle_actividades.asp?id=303&pagina=1. [Último acceso: 12 Febrero 2022].
- [22] «Subsim.com,» [En línea]. Available: <https://www.subsim.com/radioroom/showthread.php?t=200833&page=84>. [Último acceso: 12 Febrero 2022].
- [23] Gizmodo, «Gizmodo.com,» [En línea]. Available: <https://www.pinterest.es/pin/334673816051628654/>. [Último acceso: 12 Febrero 2022].

- [24] SOSGroup, «sosgroup,» [En línea]. Available: <https://sosgroup.co/military-diving>. [Último acceso: 12 Febrero 2022].
- [25] G. J. F., «Elsnorkel,» 27 Noviembre 2006. [En línea]. Available: <https://www.elsnorkel.com/2006/11/la-tragedia-del-primer-submarino.html>. [Último acceso: 12 Febrero 2022].
- [26] Flickriver, «Flickriver,» [En línea]. Available: <https://www.flickriver.com/photos/tags/brandtaucher/interesting/>. [Último acceso: 12 Febrero 2022].
- [27] «Rochefortdabordforum,» [En línea]. Available: <https://rochefortdabordforum.forumactif.org/p1017433-sous-marin-le-plongeur-une-legende-oubliee>. [Último acceso: 12 Febrero 2022].
- [28] Centro Universitario de la Defensa de Marín, Máquinas y Motores Navales, 2020.
- [29] nauticexpo, «Nauticexpo,» [En línea]. Available: <https://www.nauticexpo.es/prod/stadt/product-32120-200622.html>. [Último acceso: 12 Febrero 2022].
- [30] Foro Naval, «Foronaval.com,» 15 Enero 2020. [En línea]. Available: <https://foronaval.com/2020/01/15/submarino-nuclear-versus-submarino-convencional-la-eterna-cuestion/>. [Último acceso: 1 Febrero 2022].
- [31] E. N. Militar, Sistemas de Armas y Tiro Naval, 2020.
- [32] A. Galante, «PoderNaval,» 22 Junio 2018. [En línea]. Available: <https://www.naval.com.br/blog/page/110/?p=knmnjbyjwng>. [Último acceso: 12 Febrero 2022].
- [33] A. H. V. y. D. J. B. Gayango, «Laplace.us,» Junio 2017. [En línea]. Available: <http://laplace.us.es/wiki/images/2/2b/Trabajo25m.pdf>. [Último acceso: 1 Febrero 2022].
- [34] E. C. Rivas, «Armada.defensa,» [En línea]. Available: <https://armada.defensa.gob.es/archivo/rgm/2019/06/cap01.pdf>. [Último acceso: 1 Febrero 2022].
- [35] [En línea]. Available: <https://lodkax.ru/lodki/podvodnye/>. [Último acceso: 12 Febrero 2022].
- [36] F. J. A. L. y. M. L. M. Arnáiz, «Infodefensa,» 9 Diciembre 2009. [En línea]. Available: <https://www.infodefensa.com/texto-diario/mostrar/3118972/propulsion-anaerobia-submarinos-estado-cuestion>. [Último acceso: 7 Febrero 2022].
- [37] B. N. y. P. Hauschild, «Revistamarina,» Febrero 2015. [En línea]. Available: <https://revistamarina.cl/revistas/2015/2/nagorny-hauschildt.pdf>. [Último acceso: 7 Febrero 2022].
- [38] «Wikipedia,» 27 Junio 2005. [En línea]. Available: https://de.m.wikipedia.org/wiki/Datei:Gotland_DN-SD-06-07476.JPG. [Último acceso: 12 Febrero 2022].
- [39] «Navyrecognition,» 22 Noviembre 2017. [En línea]. Available: <https://www.navyrecognition.com/index.php/naval-news/naval-news->

- archive/2017/november-2017-navy-naval-forces-defense-industry-technology-maritime-security-global-news/5742-sharpeye-radar-for-pakistan-navy-submarine-agosta-90b-upgrade.html. [Último acceso: 12 Febrero 2022].
- [40] El Snorkel, «Elsnorkel,» 19 Enero 2016. [En línea]. Available: <https://www.elsnorkel.com/2016/01/rusia-cesa-la-construccion-proyecto-lada.html>. [Último acceso: 12 Febrero 2022].
- [41] T. N. A. F. y. T. P. A. LLANEZA, «Elsnorkel,» 6 Enero 2021. [En línea]. Available: <https://www.elsnorkel.com/2021/01/como-funciona-el-sistema-independiente-del-aire-aip-submarinos.html>. [Último acceso: 7 Febrero 2022].
- [42] Galaxia Militar, «Galaxia Militar,» 23 Junio 2021. [En línea]. Available: <http://galaxiamilitar.es/primera-varada-programada-del-submarino-s-81-isaac-peral/>. [Último acceso: 12 Febrero 2022].
- [43] Areatecnologia, «Areatecnologia,» [En línea]. Available: <https://www.areatecnologia.com/electricidad/condensador.html>. [Último acceso: 9 Febrero 2022].
- [44] J. A. Pomilio, «Researchgate,» 3 Marzo 2020. [En línea]. Available: https://www.researchgate.net/figure/Estructura-basica-de-camadas-de-um-supercapacitor_fig1_328480814. [Último acceso: 12 Febrero 2022].
- [45] Faasa Aviación, «Ingemecanica,» 31 Julio 2017. [En línea]. Available: <https://ingemecanica.com/tutorialsemanal/objetos/tutorial85/doc9tut85.pdf>. [Último acceso: 9 Febrero 2022].
- [46] E. R. y. A. M. Erik Mendez, «Revistaespacios,» 2020. [En línea]. Available: <https://www.revistaespacios.com/a20v41n14/a20v41n14p29.pdf>. [Último acceso: 9 Febrero 2022].
- [47] Capacitores.net, «Capacitores.net,» 10 Diciembre 2021. [En línea]. Available: <https://capacitores.net/supercapacitores/>. [Último acceso: 9 Febrero 2022].
- [48] A. A. A. G. y. A. S. Shweta Tanwar, «Iopscience,» 14 Junio 2021. [En línea]. Available: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1361-648X/abfb3c>. [Último acceso: 12 Febrero 2022].
- [49] M. S. H. y. J. C. Ellenbogen, «Mitre.org,» Marzo 2006. [En línea]. Available: https://www.mitre.org/sites/default/files/pdf/06_0667.pdf. [Último acceso: 9 Febrero 2022].
- [50] P. N. Mulangui, «1library,» Junio 2019. [En línea]. Available: <https://1library.co/document/z1325jvq-almacenamiento-de-energia-en-las-redes-electricas-inteligentes.html>. [Último acceso: 14 Febrero 2022].
- [51] Sicurauto, «Sicurauto,» 30 Noviembre 2011. [En línea]. Available: <https://www.sicurauto.it/news/mazda-i-eloop/>. [Último acceso: 14 Febrero 2022].
- [52] J. M. B. LOPÉZ, «Cicy,» Marzo 2015. [En línea]. Available: https://cicy.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1003/391/1/PCER_M_Tesis_2015_Baas_Martin.pdf. [Último acceso: 14 Febrero 2022].
- [53] Neoteo, «Neoteo.com,» [En línea]. Available: <https://www.neoteo.com/capacitores-electroquimicos-doble-capa/>. [Último acceso: 14 Febrero 2022].

- [54] V. Y. Piqueras, «Victoryepes.blogs.upv,» Universidad Politécnica de Valencia, 19 Abril 2016. [En línea]. Available: <https://victoryepes.blogs.upv.es/2016/04/19/que-es-la-metodologia-de-las-superficies-de-respuesta/>. [Último acceso: 23 Febrero 2022].
- [55] P. M. P. Peña, «Catarina.udlap.mx,» 18 Mayo 2000. [En línea]. Available: http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lii/peregrina_p_pm/capitulo2.pdf. [Último acceso: 23 Febrero 2022].
- [56] C. A. C. Muñoz, «Cicalidad.com,» [En línea]. Available: <http://www.cicalidad.com/articulos/RSM.pdf>. [Último acceso: 23 Febrero 2022].
- [57] J. C. G, «Capacitores.net,» 1 Agosto 2021. [En línea]. Available: <https://capacitores.net/circuito-rc/>. [Último acceso: 3 Marzo 2022].
- [58] MInitab, «Support.minitab.com,» [En línea]. Available: <https://support.minitab.com/es-mx/minitab/19/help-and-how-to/statistical-modeling/regression/how-to/fit-regression-model/interpret-the-results/all-statistics-and-graphs/model-summary-table/>. [Último acceso: 26 Febrero 2022].
- [59] P. N. G. Hernández, «Docplayer.es,» Noviembre 2013. [En línea]. Available: <https://docplayer.es/docs-images/85/91437181/images/29-0.jpg>. [Último acceso: 1 Marzo 2022].
- [60] E. d. S. ". G. d. I. Reyes", Manual de Máquinas y Electricidad "Serie 70" Tomo I, Secretaría Técnica, 1999.
- [61] Colectivo Lontra, «lontra7.webnode.es,» [En línea]. Available: [https://lontra7.webnode.es/_files/200000309-2f2752f277/S70%20ficha%20mod%202021%20\(27.02\).pdf](https://lontra7.webnode.es/_files/200000309-2f2752f277/S70%20ficha%20mod%202021%20(27.02).pdf). [Último acceso: 7 Marzo 2022].
- [62] E. d. S. ". G. d. I. Reyes", Manual de Máquina y Electricidad "Serie 70" Tomo II, Secretaría Técnica, 2002.
- [63] A. Española, «Armada.defensa.gob,» [En línea]. Available: <https://armada.defensa.gob.es/ArmadaPortal/page/Portal/ArmadaEspañola/buquessubmarinos/prefLang-es/02s80>. [Último acceso: 7 Marzo 2022].
- [64] Rubeda , «Rubedate.com,» [En línea]. Available: <https://rubedate.com/formacion-compresores-alta-presion-sauer-submarino-s80/>. [Último acceso: 7 Marzo 2022].
- [65] Sauer, «Rubedate,» [En línea]. Available: https://rubedate.com/wp-content/uploads/2019/09/Sauer_Naval_Marine_en.pdf. [Último acceso: 7 Marzo 2022].
- [66] D. Sanchez, «Murciaplaza.com,» 18 Octubre 2020. [En línea]. Available: <https://murciaplaza.com/del-submarino-isaac-peral-al-s-80-la-revolucionaria-tecnologia-de-las-pilas-fabricadas-por-tudor>. [Último acceso: 7 Marzo 2022].
- [67] R. J. Campo, «Heraldo.es,» 4 Octubre 2020. [En línea]. Available: <https://www.heraldo.es/noticias/economia/2020/10/04/exide-pone-las-pilas-al-submarino-s-80-1398292.html?autoref=true>. [Último acceso: 7 Marzo 2022].

- [68] E. Villarejo, «abcblogs.abc.es,» ABC, 16 Enero 2014. [En línea]. Available: <https://abcblogs.abc.es/tierra-mar-aire/espana/armada-espanola-esperando-al-novedoso-submarino-s-80-y-otros-proyectos.html>. [Último acceso: 7 Marzon 2022].
- [69] Areatecnología, «Areatecnologia.com,» [En línea]. Available: <https://www.areatecnologia.com/electricidad/potencia-electrica.html>. [Último acceso: 7 Marzo 2022].
- [70] J. M. G. d. S. A. y. J. Phillips, «mdpi.com,» 26 Diciembre 2021. [En línea]. Available: <https://www.mdpi.com/1996-1944/15/1/155/htm>. [Último acceso: 8 Marzo 2022].

ANEXO I: TABLAS DE MEDICIONES PARA EL SUPERCAPACITOR NÚMERO 1

En este anexo se mostrarán todas las mediciones obtenidas para cada una de las 15 combinaciones analizadas del prototipo de supercapacitor n°1.

MEDICIÓN 1				MEDICIÓN 2				MEDICIÓN 3				DATOS:		
HH/MM/SS	ms	At	V	HH/MM/SS	ms	At	V	HH/MM/SS	ms	At	V			
17:10:24	982	0	1,65	17:12:27	987	0	1,65	17:14:12	21	0	1,65		VOLTAJE FUENTE	1,7V
17:10:25	977	0,995	0,44	17:12:28	985	0,998	0,37	17:14:13	14	0,993	0,52		CONCENTRACION	10%
17:10:26	972	1,99	0,26	17:12:29	985	1,998	0,24	17:14:14	10	1,989	0,26		TAMAÑO PORO	10 um
17:10:28	15	3,033	0,2	17:12:30	984	2,997	0,18	17:14:15	3	2,982	0,19		TIEMPO SECADO	5 min
17:10:29	13	4,031	0,16	17:12:31	977	3,99	0,15	17:14:15	996	3,975	0,15		GROSOR:	0,0002 m
17:10:30	6	5,024	0,14	17:12:32	976	4,989	0,13	17:14:16	992	4,971	0,13		ELECTRODOS:	GRAFITO
17:10:30	995	6,013	0,11	17:12:34	22	6,035	0,11	17:14:17	985	5,964	0,11		TAMAÑO PLACAS	3,5 X 7 cm
17:10:31	993	7,011	0,1	17:12:35	15	7,028	0,1	17:14:19	26	7,005	0,1		PAPEL	Pequeño 108
17:10:32	994	8,012	0,09	17:12:36	7	8,02	0,09	17:14:20	21	8	0,09		RESISTENCIAS	10
17:10:33	986	9,004	0,08	17:12:37	4	9,017	0,08	17:14:21	14	8,993	0,08			
17:10:34	986	10,004	0,08	17:12:38	0	10,013	0,08	17:14:22	13	9,992	0,07			
17:10:35	982	11	0,07	17:12:38	998	11,011	0,07	17:14:23	4	10,983	0,06			
17:10:36	978	11,996	0,06	17:12:39	996	12,009	0,07	17:14:23	998	11,977	0,06			
17:10:37	975	12,993	0,06	17:12:40	992	13,005	0,06	17:14:24	996	12,975	0,05			
17:10:38	970	13,988	0,05	17:12:41	989	14,002	0,05	17:14:25	991	13,97	0,05			
17:10:40	11	15,029	0,05	17:12:42	982	14,995	0,05	17:14:26	990	14,969	0,05			
17:10:41	7	16,025	0,04	17:12:43	978	15,991	0,05	17:14:27	986	15,965	0,04			
17:10:42	0	17,018	0,04	17:12:45	19	17,032	0,05	17:14:28	983	16,962	0,04			
17:10:43	1	18,019	0,04	17:12:46	11	18,024	0,04	17:14:30	25	18,004	0,04			
17:10:43	997	19,015	0,04	17:12:47	11	19,024	0,04	17:14:31	21	19	0,03			
17:10:44	991	20,009	0,03	17:12:48	10	20,023	0,03	17:14:32	17	19,996	0,03			
17:10:45	982	21	0,03	17:12:49	6	21,019	0,03	17:14:33	13	20,992	0,03			
17:10:46	976	21,994	0,03	17:12:50	5	22,018	0,03	17:14:34	11	21,99	0,03			
17:10:47	972	22,99	0,03	17:12:51	1	23,014	0,03	17:14:35	10	22,989	0,02			
17:10:49	9	24,027	0,02	17:12:51	998	24,011	0,02	17:14:36	7	23,986	0,02			
17:10:50	5	25,023	0,02	17:12:52	992	25,005	0,02	17:14:37	6	24,985	0,02			
17:10:50	999	26,017	0,02	17:12:53	984	25,997	0,02	17:14:38	2	25,981	0,02			
17:10:51	991	27,009	0,02	17:12:54	979	26,992	0,02	17:14:39	2	26,981	0,02			
17:10:52	983	28,001	0,02	17:12:56	23	28,036	0,02	17:14:39	996	27,975	0,02			
17:10:53	978	28,996	0,01	17:12:57	19	29,032	0,02	17:14:40	993	28,972	0,01			
17:10:54	970	29,988	0,01	17:12:58	15	30,028	0,02	17:14:41	988	29,967	0,01			
17:10:56	4	31,022	0,02	17:12:59	13	31,026	0,01	17:14:42	984	30,963	0,01			
17:10:56	998	32,016	0,01	17:13:00	10	32,023	0,01	17:14:44	29	32,008	0,01			
17:10:57	997	33,015	0,01	17:13:01	8	33,021	0,01	17:14:45	23	33,002	0,01			
17:10:58	994	34,012	0,01	17:13:02	4	34,017	0,01	17:14:46	15	33,994	0,01			
17:10:59	989	35,007	0,01	17:13:03	0	35,013	0,01	17:14:47	13	34,992	0,01			
17:11:00	984	36,002	0,01	17:13:03	995	36,008	0,01	17:14:48	11	35,99	0,01			
17:11:01	979	36,997	0,01	17:13:04	990	37,003	0,01	17:14:49	7	36,986	0			
17:11:02	975	37,993	0,01	17:13:05	985	37,998	0,01							
17:11:04	13	39,031	0,01	17:13:07	24	39,037	0,01							
17:11:05	12	40,03	0,01	17:13:08	20	40,033	0							
17:11:06	9	41,027	0											

Figura A1- 1 Resultados obtenidos para la combinación n°1

MEDICIÓN 1				MEDICIÓN 2				MEDICIÓN 3				DATOS:		
HH/MM/SS	ms	At	V	HH/MM/SS	ms	At	V	HH/MM/SS	ms	At	V			
16:46:34	677	0	1,65	16:48:27	685	0	1,65	16:50:30	670	0	1,65		VOLTAJE FUENTE	1,7 V
16:46:35	664	0,987	0,42	16:48:28	671	0,986	0,42	16:50:31	702	0,993	1,57		CONCENTRACION	30%
16:46:36	650	1,973	0,26	16:48:29	658	1,973	0,26	16:50:32	687	1,989	0,33		TAMAÑO PORO	10 um
16:46:37	681	3,004	0,2	16:48:30	690	3,005	0,2	16:50:33	671	2,982	0,23		TIEMPO SECADO	5 min
16:46:38	670	3,993	0,16	16:48:31	673	3,988	0,16	16:50:34	702	4,975	0,18		GROSOR:	0,0002 m
16:46:39	655	4,978	0,14	16:48:32	656	4,971	0,14	16:50:35	686	5,971	0,15		ELECTRODOS:	GRAFITO
16:46:40	689	6,012	0,12	16:48:33	688	6,003	0,12	16:50:36	668	6,964	0,13		TAMAÑO PLACAS	3,5 X 7 cm
16:46:41	677	7	0,11	16:48:34	673	6,988	0,11	16:50:37	701	7,005	0,11		PAPEL	Pequeño 108
16:46:42	664	7,987	0,1	16:48:35	659	7,974	0,1	16:50:38	684	8	0,1		RESISTENCIAS	10
16:46:43	695	9,018	0,09	16:48:36	690	9,005	0,09	16:50:39	671	8,993	0,09			
16:46:44	681	10,004	0,08	16:48:37	677	9,992	0,08	16:50:40	703	9,992	0,08			
16:46:45	669	10,992	0,07	16:48:38	663	10,978	0,07	16:50:41	686	10,983	0,07			
16:46:46	654	11,977	0,07	16:48:39	694	12,009	0,06	16:50:42	669	12,977	0,07			
16:46:47	687	13,01	0,06	16:48:40	677	12,992	0,06	16:50:43	704	13,975	0,06			
16:46:48	671	13,994	0,05	16:48:41	661	13,976	0,05	16:50:44	691	14,97	0,06			
16:46:49	661	14,984	0,05	16:48:42	690	15,005	0,05	16:50:45	680	15,969	0,05			
16:46:50	695	16,018	0,05	16:48:43	674	15,989	0,04	16:50:46	662	16,965	0,05			
16:46:51	680	17,003	0,04	16:48:44	656	16,971	0,04	16:50:47	696	17,962	0,04			
16:46:52	667	17,99	0,04	16:48:45	689	18,004	0,04	16:50:48	678	18,004	0,04			
16:46:53	650	18,973	0,04	16:48:46	674	18,989	0,03	16:50:49	663	19	0,04			
16:46:54	684	20,007	0,03	16:48:47	660	19,975	0,04	16:50:50	695	19,996	0,03			
16:46:55	670	20,993	0,03	16:48:48	696	21,011	0,03	16:50:51	678	20,992	0,03			
16:46:56	659	21,982	0,03	16:48:49	683	21,998	0,03	16:50:52	708	21,99	0,03			
16:46:57	692	23,015	0,03	16:48:50	667	22,982	0,03	16:50:53	692	22,989	0,03			
16:46:58	679	24,002	0,02	16:48:51	698	24,013	0,02	16:50:54	678	23,986	0,03			
16:46:59	663	24,986	0,02	16:48:52	682	24,997	0,02	16:50:55	662	24,985	0,02			
16:47:00	693	26,016	0,02	16:48:53	665	25,98	0,02	16:50:56	692	25,981	0,02			
16:47:01	678	27,001	0,02	16:48:54	695	27,001	0,02	16:50:57	675	26,981	0,02			
16:47:02	663	27,986	0,02	16:48:55	680	27,995	0,02	16:50:58	707	28,975	0,02			
16:47:03	695	29,018	0,02	16:48:56	667	28,982	0,02	16:50:59	692	29,972	0,02			
16:47:04	677	30	0,01	16:48:57	699	30,014	0,01	16:51:00	677	30,967	0,01			
16:47:05	664	30,987	0,01	16:48:58	685	31	0,01	16:51:01	707	31,963	0,01			
16:47:06	697	32,02	0,01	16:48:59	671	31,986	0,01	16:51:02	692	32,008	0,01			
16:47:07	683	33,006	0,01	16:49:00	658	32,973	0,01	16:51:03	675	33,002	0,01			
16:47:08	667	33,99	0,01	16:49:01	690	34,005	0,01	16:51:04	711	33,994	0,01			
16:47:09	652	34,975	0,01	16:49:02	675	34,99	0,01	16:51:05	695	34,992	0,01			
16:47:10	684	36,007	0,01	16:49:03	661	35,976	0,01	16:51:06	680	35,99	0,01			
16:47:11	671	36,994	0,01	16:49:04	691	37,006	0,01	16:51:07	665	36,986	0,01			
16:47:12	657	37,98	0,01	16:49:05	674	37,989	0,01	16:51:08	697	37,979	0,01			
16:47:13	686	39,009	0	16:49:06	658	38,973	0	16:51:09	682	38,979	0,01			
								16:51:10	664	39,979	0			

Figura A1- 2 Resultados obtenidos para la combinación n°2

MEDICIÓN 1				MEDICIÓN 2				MEDICIÓN 3				DATOS:		
HH/MM/SS	ms	At	V	HH/MM/SS	ms	At	V	HH/MM/SS	ms	At	V			
10:30:36	15	0	1,65	10:33:02	25	0	1,65	10:35:17	39	0	1,65		VOLTAJE FUENTE	1,7V
10:30:37	40	1,025	0,25	10:33:03	56	1,031	0,2	10:35:18	64	1,025	0,21		CONCENTRACION	10%
10:30:38	17	2,002	0,17	10:33:04	37	2,012	0,14	10:35:19	44	2,005	0,14		TAMAÑO PORO	25 um
10:30:39	48	3,033	0,14	10:33:05	18	2,993	0,11	10:35:20	23	2,984	0,11		TIEMPO SECADO	5 min
10:30:40	29	4,014	0,11	10:33:06	48	4,023	0,09	10:35:21	48	4,009	0,09		GROSOR:	0,0002 m
10:30:41	13	4,998	0,1	10:33:07	27	5,002	0,08	10:35:22	31	4,992	0,08		ELECTRODOS:	GRAFITO
10:30:42	44	6,029	0,09	10:33:08	55	6,03	0,07	10:35:23	57	6,018	0,06		TAMAÑO PLACAS	3,5 X 7 cm
10:30:43	25	7,01	0,07	10:33:09	37	7,012	0,06	10:35:24	42	7,003	0,06		PAPEL	Grande 607
10:30:44	55	8,04	0,07	10:33:10	62	8,037	0,05	10:35:25	24	7,985	0,05		RESISTENCIAS	10
10:30:45	33	9,018	0,06	10:33:11	58	9,033	0,04	10:35:26	52	9,013	0,04			
10:30:46	17	10,002	0,05	10:33:12	28	10,003	0,04	10:35:27	31	9,992	0,04			
10:30:47	46	11,031	0,05	10:33:13	16	10,991	0,03	10:35:28	60	11,021	0,03			
10:30:48	30	12,015	0,04	10:33:14	34	12,009	0,03	10:35:29	40	12,001	0,03			
10:30:49	55	13,04	0,04	10:33:15	63	13,038	0,02	10:35:30	23	12,984	0,02			
10:30:50	34	14,019	0,03	10:33:16	48	14,023	0,02	10:35:31	51	14,012	0,02			
10:30:51	17	15,002	0,03	10:33:17	32	15,007	0,02	10:35:32	44	15,005	0,02			
10:30:52	44	16,029	0,03	10:33:18	61	16,036	0,02	10:35:33	53	16,014	0,01			
10:30:53	30	17,015	0,02	10:33:19	37	17,012	0,01	10:35:34	32	16,993	0,01			
10:30:54	14	17,999	0,02	10:33:20	17	17,992	0,01	10:35:35	61	18,022	0,01			
10:30:55	46	19,031	0,02	10:33:21	49	19,024	0,01	10:35:36	42	19,003	0,01			
10:30:56	32	20,017	0,02	10:33:22	32	20,007	0,01	10:35:37	23	19,984	0,01			
10:30:57	16	21,001	0,02	10:33:23	58	21,033	0,01	10:35:38	48	21,009	0,01			
10:30:58	48	22,033	0,01	10:33:24	40	22,015	0,01	10:35:39	27	21,988	0,01			
10:30:59	47	23,032	0,01	10:33:25	61	23,036	0,01	10:35:40	54	23,015	0,01			
10:31:00	50	24,035	0,01	10:33:26	35	24,01	0,01	10:35:41	37	23,998	0			
10:31:01	31	25,016	0,01	10:33:27	61	25,036	0,01							
10:31:02	16	26,001	0,01	10:33:28	38	26,013	0							
10:31:03	35	27,02	0,01											
10:31:04	58	28,043	0,01											
10:31:05	40	29,025	0											

Figura A1- 3 Resultados obtenidos para la combinación n°3

MEDICIÓN 1				MEDICIÓN 2				MEDICIÓN 3				DATOS:		
HH/MM/SS	ms	At	V	HH/MM/SS	ms	At	V	HH/MM/SS	ms	At	V			
16:26:12	87	0	1,65	16:31:56	124	0	1,65	16:34:10	106	0	1,65		VOLTAJE FUENTE	1,7 V
16:26:13	83	0,996	1,64	16:31:57	118	0,994	1,58	16:34:11	136	1,03	0,49		CONCENTRACION	30%
16:26:14	82	1,995	1,57	16:31:58	114	1,99	0,37	16:34:12	121	2,015	0,3		TAMAÑO PORO	25 um
16:26:15	76	2,989	0,4	16:31:59	111	2,987	0,26	16:34:13	109	3,003	0,22		TIEMPO SECADO	5 min
16:26:16	77	3,99	0,33	16:32:00	112	3,988	0,22	16:34:14	141	4,035	0,19		GROSOR:	1 capa
16:26:17	121	5,034	0,29	16:32:01	108	4,984	0,19	16:34:15	127	5,021	0,16		ELECTRODOS:	GRAFITO
16:26:18	119	6,032	0,26	16:32:02	104	5,98	0,17	16:34:16	115	6,009	0,14		TAMAÑO PLACAS	3,5 X 7 cm
16:26:19	114	7,027	0,24	16:32:03	102	6,978	0,15	16:34:17	99	6,993	0,12		PAPEL	Grande 607
16:26:20	112	8,025	0,22	16:32:04	95	7,971	0,13	16:34:18	130	8,024	0,11		RESISTENCIAS	10
16:26:21	113	9,026	0,2	16:32:05	89	8,965	0,12	16:34:19	113	9,007	0,1			
16:26:22	112	10,025	0,19	16:32:06	128	10,004	0,1	16:34:20	98	9,992	0,09			
16:26:23	108	11,021	0,17	16:32:07	125	11,001	0,1	16:34:21	127	11,021	0,08			
16:26:24	108	12,021	0,16	16:32:08	122	11,998	0,09	16:34:22	113	12,007	0,07			
16:26:25	105	13,018	0,15	16:32:09	121	12,997	0,08	16:34:23	100	12,994	0,07			
16:26:26	102	14,015	0,14	16:32:10	118	13,994	0,07	16:34:24	131	14,025	0,06			
16:26:27	100	15,013	0,13	16:32:11	114	14,99	0,07	16:34:25	115	15,009	0,06			
16:26:28	95	16,008	0,12	16:32:12	108	15,984	0,06	16:34:26	101	15,995	0,05			
16:26:29	94	17,007	0,11	16:32:13	102	16,978	0,06	16:34:27	133	17,027	0,05			
16:26:30	87	18	0,1	16:32:14	94	17,97	0,05	16:34:28	122	18,016	0,04			
16:26:31	85	18,998	0,1	16:32:15	92	18,968	0,05	16:34:29	109	19,003	0,04			
16:26:32	79	19,992	0,09	16:32:16	133	20,009	0,05	16:34:30	140	20,034	0,04			
16:26:33	124	21,037	0,09	16:32:17	128	21,004	0,04	16:34:31	124	21,018	0,03			
16:26:34	123	22,036	0,08	16:32:18	115	21,991	0,04	16:34:32	112	22,006	0,03			
16:26:35	115	23,028	0,08	16:32:19	109	22,985	0,04	16:34:33	99	22,993	0,03			
16:26:36	112	24,025	0,07	16:32:20	103	23,979	0,03	16:34:34	132	24,026	0,03			
16:26:37	106	25,019	0,07	16:32:21	101	24,977	0,03	16:34:35	118	25,012	0,02			
16:26:38	102	26,015	0,07	16:32:22	98	25,974	0,03	16:34:36	103	25,997	0,02			
16:26:39	98	27,011	0,06	16:32:23	97	26,973	0,03	16:34:37	137	27,031	0,02			
16:26:40	94	28,007	0,06	16:32:24	95	27,971	0,03	16:34:38	121	28,015	0,02			
16:26:41	88	29,001	0,06	16:32:25	93	28,969	0,02	16:34:39	104	28,998	0,02			
16:26:42	82	29,995	0,05	16:32:26	138	30,014	0,02	16:34:40	136	30,03	0,02			
16:26:43	77	30,99	0,05	16:32:27	134	31,01	0,02	16:34:41	120	31,014	0,02			
16:26:44	122	32,035	0,05	16:32:28	132	32,008	0,02	16:34:42	106	32	0,02			
16:26:45	117	33,03	0,05	16:32:29	127	33,003	0,02	16:34:43	139	33,033	0,02			
16:26:46	115	34,028	0,04	16:32:30	126	34,002	0,02	16:34:44	124	34,018	0,01			
16:26:47	109	35,022	0,04	16:32:31	124	35	0,02	16:34:45	109	35,003	0,01			
16:26:48	108	36,021	0,04	16:32:32	118	35,994	0,02	16:34:46	143	36,037	0,01			
16:26:49	104	37,017	0,04	16:32:33	118	36,994	0,02	16:34:47	128	37,022	0,01			
16:26:50	105	38,018	0,04	16:32:34	115	37,991	0,01	16:34:48	111	38,005	0,01			
16:26:51	99	39,012	0,04	16:32:35	114	38,99	0,01	16:34:49	143	39,037	0,01			
16:26:52	93	40,006	0,03	16:32:36	112	39,988	0,01	16:34:50	127	40,021	0,01			
16:26:53	92	41,005	0,03	16:32:37	107	40,983	0,01	16:34:51	111	41,005	0,01			
16:26:54	89	42,002	0,03	16:32:38	106	41,982	0,01	16:34:52	141	42,035	0,01			
16:26:55	88	43,001	0,03	16:32:39	107	42,983	0,01	16:34:53	127	43,021	0			
16:26:56	85	43,998	0,03	16:32:40	102	43,978	0,01							
16:26:57	82	44,995	0,03	16:32:41	98	44,974	0							
16:26:58	124	46,037	0,03											
16:26:59	123	47,036	0,02											
16:27:00	123	48,036	0,02											
16:27:01	77	48,99	0,02											
16:27:02	122	50,035	0,02											
16:27:03	120	51,033	0,02											
16:27:04	122	52,035	0,02											
16:27:05	122	53,035	0,02											
16:27:06	117	54,03	0,02											
16:27:07	114	55,027	0,02											
16:27:08	115	56,028	0,02											
16:27:09	113	57,026	0,01											
16:27:10	107	58,02	0,01											
16:27:11	102	59,015	0,01											
16:27:12	88	60,001	0,01											
16:27:13	87	61	0,01											
16:27:14	84	61,997	0,01											
16:27:15	78	62,991	0,01											
16:27:16	122	64,035	0,01											
16:27:17	119	65,032	0,01											
16:27:18	115	66,028	0,01											
16:27:19	114	67,027	0,01											
16:27:20	113	68,026	0,01											
16:27:21	111	69,024	0,01											
16:27:22	111	70,024	0,01											
16:27:23	110	71,023	0,01											
16:27:24	109	72,022	0,01											
16:27:25	104	73,017	0,01											
16:27:26	96	74,009	0,01											
16:27:27	94	75,007	0,01											
16:27:28	89	76,002	0											

Figura A1- 4 Resultados obtenidos para la combinación n°4

ANÁLISIS EXPERIMENTAL Y ESTUDIO DE POSIBLES USOS DE SUPERCAPACITORES EN LOS SUBMARINOS DE LA ARMADA

MEDICIÓN 1				MEDICIÓN 2				MEDICIÓN 3				DATOS:	
HH/MM/SS	ms	At	V	HH/MM/SS	ms	At	V	HH/MM/SS	ms	At	V		
9:07:35	287	0	1,65	9:09:08	306	0	1,65	9:10:31	281	0	1,65	VOLTAJE FUENTE	1,7 V
9:07:36	267	0,98	0,4	9:09:09	278	0,972	0,29	9:10:32	306	1,025	0,26	CONCENTRACION	10%
9:07:37	318	2,031	0,35	9:09:10	298	1,992	0,21	9:10:33	282	2,001	0,2	TAMAÑO PORO	20 um
9:07:38	267	2,98	0,31	9:09:11	264	2,958	0,14	9:10:34	304	3,023	0,16	TIEMPO SECADO	0 min
9:07:39	292	4,005	0,27	9:09:12	281	3,975	0,1	9:10:35	278	3,997	0,13	GROSOR:	1 capa
9:07:40	284	4,997	0,24	9:09:13	262	4,956	0,07	9:10:36	302	5,021	0,1	ELECTRODOS:	GRAFITO
9:07:41	292	6,005	0,21	9:09:14	278	5,972	0,06	9:10:37	273	5,992	0,08	TAMAÑO PLACAS	3,5 X 7 cm
9:07:42	269	6,982	0,19	9:09:15	305	6,999	0,05	9:10:38	299	7,018	0,07	PAPEL	Mediano
9:07:43	288	8,001	0,16	9:09:16	281	7,975	0,04	9:10:39	272	7,991	0,06	RESISTENCIAS	10
9:07:44	268	8,981	0,13	9:09:17	264	8,958	0,03	9:10:40	297	9,016	0,05		
9:07:45	292	10,005	0,12	9:09:18	285	9,979	0,03	9:10:41	275	9,994	0,05		
9:07:46	269	10,982	0,1	9:09:19	308	11,002	0,02	9:10:42	301	11,02	0,04		
9:07:47	291	12,004	0,08	9:09:20	290	11,986	0,02	9:10:43	274	11,993	0,04		
9:07:48	267	12,98	0,07	9:09:21	262	12,956	0,02	9:10:44	297	13,016	0,03		
9:07:49	284	13,997	0,07	9:09:22	277	13,971	0,02	9:10:45	307	14,026	0,03		
9:07:50	262	14,975	0,06	9:09:23	295	14,989	0,01	9:10:46	277	14,996	0,03		
9:07:51	290	16,003	0,05	9:09:24	268	15,962	0,01	9:10:47	293	16,012	0,02		
9:07:52	268	16,981	0,05	9:09:25	288	16,982	0,01	9:10:48	309	17,028	0,02		
9:07:53	283	17,996	0,04	9:09:26	308	18,002	0,01	9:10:49	298	18,017	0,02		
9:07:54	262	18,975	0,04	9:09:27	276	18,97	0,01	9:10:50	312	19,031	0,02		
9:07:55	292	20,005	0,04	9:09:28	301	19,995	0,01	9:10:51	276	19,995	0,02		
9:07:56	273	20,986	0,03	9:09:29	279	20,973	0	9:10:52	269	20,988	0,01		
9:07:57	293	22,006	0,03					9:10:53	294	22,013	0,01		
9:07:58	268	22,981	0,03					9:10:54	268	22,987	0,01		
9:07:59	286	23,999	0,03					9:10:55	287	24,006	0,01		
9:08:00	257	24,97	0,02					9:10:56	308	25,027	0,01		
9:08:01	282	25,995	0,02					9:10:57	275	25,994	0,01		
9:08:02	258	26,971	0,02					9:10:58	317	27,036	0,01		
9:08:03	286	27,999	0,02					9:10:59	272	27,991	0		
9:08:04	262	28,975	0,02										
9:08:05	280	29,993	0,02										
9:08:06	297	31,01	0,01										
9:08:07	268	31,981	0,01										
9:08:08	296	33,009	0,01										
9:08:09	277	33,99	0,01										
9:08:10	295	35,008	0,01										
9:08:11	278	35,991	0,01										
9:08:12	299	37,012	0,01										
9:08:13	275	37,988	0										

Figura A1- 5 Resultados obtenidos para la combinación n°5

MEDICIÓN 1				MEDICIÓN 2				MEDICIÓN 3				DATOS:	
HH/MM/SS	ms	At	V	HH/MM/SS	ms	At	V	HH/MM/SS	ms	At	V		
9:30:37	755	0	1,65	9:32:00	763	0	1,65	9:33:32	768	0	1,65	VOLTAJE FUENTE	1,7 V
9:30:38	731	0,976	0,38	9:32:01	745	0,982	0,29	9:33:33	735	0,967	0,28	CONCENTRACION	30%
9:30:39	754	1,999	0,25	9:32:02	770	2,007	0,21	9:33:34	756	1,988	0,22	TAMAÑO PORO	20 um
9:30:40	723	2,968	0,2	9:32:03	749	2,986	0,18	9:33:35	731	2,963	0,19	TIEMPO SECADO	0 min
9:30:41	744	3,989	0,16	9:32:04	730	3,967	0,15	9:33:36	746	3,978	0,16	GROSOR:	1 capa
9:30:42	765	5,01	0,14	9:32:05	753	4,99	0,12	9:33:37	765	4,997	0,14	ELECTRODOS:	GRAFITO
9:30:43	733	5,978	0,11	9:32:06	732	5,969	0,11	9:33:38	745	5,977	0,12	TAMAÑO PLACAS	3,5 X 7 cm
9:30:44	749	6,994	0,1	9:32:07	751	6,988	0,09	9:33:39	781	7,013	0,11	PAPEL	Mediano
9:30:45	726	7,971	0,09	9:32:08	769	8,006	0,08	9:33:40	736	7,968	0,09	RESISTENCIAS	10
9:30:46	744	8,989	0,07	9:32:09	746	8,983	0,07	9:33:41	757	8,989	0,08		
9:30:47	758	10,003	0,07	9:32:10	765	10,002	0,06	9:33:42	736	9,968	0,08		
9:30:48	731	10,976	0,06	9:32:11	740	10,977	0,06	9:33:43	754	10,986	0,07		
9:30:49	749	11,994	0,05	9:32:12	759	11,996	0,05	9:33:44	779	12,011	0,06		
9:30:50	764	13,009	0,04	9:32:13	737	12,974	0,04	9:33:45	754	12,986	0,06		
9:30:51	741	13,986	0,04	9:32:14	765	14,002	0,04	9:33:46	778	14,01	0,05		
9:30:52	764	15,009	0,04	9:32:15	739	14,976	0,03	9:33:47	752	14,984	0,05		
9:30:53	740	15,985	0,03	9:32:16	759	15,996	0,03	9:33:48	775	16,007	0,04		
9:30:54	762	17,007	0,03	9:32:17	736	16,973	0,03	9:33:49	747	16,979	0,04		
9:30:55	728	17,973	0,03	9:32:18	772	18,009	0,03	9:33:50	778	18,01	0,03		
9:30:56	749	18,994	0,02	9:32:19	775	19,012	0,02	9:33:51	744	18,976	0,03		
9:30:57	728	19,973	0,02	9:32:20	741	19,978	0,02	9:33:52	764	19,996	0,03		
9:30:58	745	20,99	0,02	9:32:21	764	21,001	0,02	9:33:53	737	20,969	0,03		
9:30:59	767	22,012	0,02	9:32:22	816	22,053	0,02	9:33:54	763	21,995	0,02		
9:31:00	748	22,993	0,01	9:32:23	754	22,991	0,01	9:33:55	743	22,975	0,02		
9:31:01	737	23,982	0,01	9:32:24	771	24,008	0,01	9:33:56	769	24,001	0,02		
9:31:02	743	24,988	0,01	9:32:25	738	24,975	0,01	9:33:57	745	24,977	0,02		
9:31:03	760	26,005	0,01	9:32:26	755	25,992	0,01	9:33:58	765	25,997	0,02		
9:31:04	737	26,982	0,01	9:32:27	731	26,988	0,01	9:33:59	782	27,014	0,01		
9:31:05	753	27,998	0,01	9:32:28	757	27,994	0,01	9:34:00	751	27,983	0,01		
9:31:06	725	28,97	0,01	9:32:29	758	28,995	0,01	9:34:01	771	29,003	0,01		
9:31:07	743	29,988	0,01	9:32:30	762	29,999	0,01	9:34:02	749	29,981	0,01		
9:31:08	765	31,01	0	9:32:31	733	30,97	0	9:34:03	770	31,002	0,01		
								9:34:04	746	31,978	0,01		
								9:34:05	759	32,991	0,01		
								9:34:06	737	33,969	0,01		
								9:34:07	798	35,03	0,01		
								9:34:08	780	36,012	0,01		
								9:34:09	757	36,989	0,01		
								9:34:10	766	37,998	0		

Figura A1- 6 Resultados obtenidos para la combinación n°6

MEDICIÓN 1				MEDICIÓN 2				MEDICIÓN 3				DATOS:	
HH/MM/SS	ms	At	V	HH/MM/SS	ms	At	V	HH/MM/SS	ms	At	V		
12:43:21	451	0	1,65	12:44:42	473	0	1,65	12:45:51	484	0	1,65	VOLTAJE FUENTE	1,7 V
12:43:22	489	1,038	1,64	12:44:43	465	0,992	0,26	12:45:52	470	0,986	0,33	CONCENTRACION	20%
12:43:23	485	2,034	1,35	12:44:44	458	1,985	0,19	12:45:53	461	1,977	0,21	TAMAÑO PORO	20 um
12:43:24	480	3,029	0,19	12:44:45	454	2,981	0,15	12:45:54	459	2,975	0,17	TIEMPO SECADO	5 min
12:43:25	472	4,021	0,12	12:44:46	492	4,019	0,11	12:45:55	451	3,967	0,14	GROSOR:	1 capa
12:43:26	468	5,017	0,08	12:44:47	486	5,013	0,08	12:45:56	484	5	0,11	ELECTRODOS:	GRAFITO
12:43:27	465	6,014	0,05	12:44:48	479	6,006	0,06	12:45:57	477	5,993	0,09	TAMAÑO PLACAS	3,5 X 7 cm
12:43:28	454	7,003	0,04	12:44:49	467	6,994	0,05	12:45:58	475	6,991	0,07	PAPEL	Mediano
12:43:29	483	8,032	0,03	12:44:50	462	7,989	0,04	12:45:59	473	7,989	0,06	RESISTENCIAS	10
12:43:30	481	9,03	0,02	12:44:51	453	8,98	0,03	12:46:00	467	8,983	0,04		
12:43:31	475	10,024	0,01	12:44:52	450	9,977	0,02	12:46:01	458	9,974	0,04		
12:43:32	473	11,022	0,01	12:44:53	491	11,018	0,02	12:46:02	498	11,014	0,03		
12:43:33	467	12,016	0	12:44:54	485	12,012	0,01	12:46:03	489	12,005	0,03		
				12:44:55	477	13,004	0,01	12:46:04	480	12,996	0,02		
				12:44:56	469	13,996	0,01	12:46:05	465	13,981	0,02		
				12:44:57	460	14,987	0,01	12:46:06	460	14,976	0,02		

MEDICIÓN 1				MEDICIÓN 2				MEDICIÓN 3				DATOS:		
HH/MM/SS	ms	At	V	HH/MM/SS	ms	At	V	HH/MM/SS	ms	At	V			
9:41:21	107	0	1,65	9:42:35	116	0	1,65	9:43:49	111	0	1,65		VOLTAJE FUENTE	1,7 V
9:41:22	130	1,023	0,28	9:42:36	91	0,975	0,39	9:43:50	140	1,029	0,36		CONCENTRACION	30%
9:41:23	105	1,998	0,21	9:42:37	117	2,001	0,24	9:43:51	113	2,002	0,23		TAMAÑO PORO	20 um
9:41:24	126	3,019	0,18	9:42:38	132	3,016	0,19	9:43:52	134	3,023	0,18		TIEMPO SECADO	10 min
9:41:25	101	3,994	0,15	9:42:39	106	3,99	0,16	9:43:53	106	3,995	0,15		GROSOR:	1 capa
9:41:26	123	5,016	0,13	9:42:40	120	5,004	0,13	9:43:54	126	5,015	0,13		ELECTRODOS:	GRAFITO
9:41:27	97	5,99	0,11	9:42:41	98	5,982	0,11	9:43:55	103	5,992	0,11		TAMAÑO PLACAS	3,5 X 7 cm
9:41:28	124	7,017	0,1	9:42:42	116	7	0,1	9:43:56	126	7,015	0,09		PAPEL	Mediano
9:41:29	94	7,987	0,09	9:42:43	97	7,981	0,09	9:43:57	107	7,996	0,08		RESISTENCIAS	10
9:41:30	110	9,003	0,08	9:42:44	121	9,005	0,08	9:43:58	123	9,012	0,07			
9:41:31	87	9,98	0,07	9:42:45	96	9,98	0,07	9:43:59	94	9,983	0,06			
9:41:32	111	11,004	0,06	9:42:46	122	11,006	0,06	9:44:00	122	11,011	0,05			
9:41:33	90	11,983	0,06	9:42:47	100	11,984	0,05	9:44:01	100	11,989	0,05			
9:41:34	109	13,002	0,05	9:42:48	117	13,001	0,05	9:44:02	119	13,008	0,04			
9:41:35	90	13,983	0,05	9:42:49	135	14,019	0,04	9:44:03	101	13,99	0,04			
9:41:36	109	15,002	0,04	9:42:50	107	14,991	0,04	9:44:04	130	15,019	0,03			
9:41:37	125	16,018	0,04	9:42:51	126	16,01	0,04	9:44:05	102	15,991	0,03			
9:41:38	108	17,001	0,03	9:42:52	101	16,985	0,03	9:44:06	122	17,011	0,03			
9:41:39	88	17,981	0,03	9:42:53	126	18,01	0,03	9:44:07	140	18,029	0,02			
9:41:40	106	18,999	0,03	9:42:54	98	18,982	0,03	9:44:08	111	19	0,02			
9:41:41	125	20,018	0,03	9:42:55	116	20	0,02	9:44:09	122	20,011	0,02			
9:41:42	105	20,998	0,02	9:42:56	136	21,02	0,02	9:44:10	100	20,989	0,02			
9:41:43	125	22,018	0,02	9:42:57	113	21,997	0,02	9:44:11	114	22,003	0,02			
9:41:44	104	22,997	0,02	9:42:58	137	23,021	0,02	9:44:12	139	23,028	0,01			
9:41:45	124	24,017	0,01	9:42:59	108	23,992	0,01	9:44:13	113	24,002	0,01			
9:41:46	101	24,994	0,02	9:43:00	129	25,013	0,01	9:44:14	134	25,023	0,01			
9:41:47	125	26,018	0,01	9:43:01	105	25,989	0,01	9:44:15	111	26	0,01			
9:41:48	106	26,999	0,01	9:43:02	126	27,01	0,01	9:44:16	107	26,996	0,01			
9:41:49	151	28,044	0,01	9:43:03	93	27,977	0,01	9:44:17	99	27,988	0,01			
9:41:50	96	28,989	0,01	9:43:04	145	29,029	0,01	9:44:18	138	29,027	0,01			
9:41:51	113	30,006	0,01	9:43:05	103	29,987	0,01	9:44:19	140	30,029	0			
9:41:52	130	31,023	0,01	9:43:06	116	31	0							
9:41:53	100	31,993	0,01											
9:41:54	117	33,01	0											

Figura A1- 8 Resultados obtenidos para la combinación n°8

MEDICIÓN 1				MEDICIÓN 2				MEDICIÓN 3				DATOS:		
HH/MM/SS	ms	At	V	HH/MM/SS	ms	At	V	HH/MM/SS	ms	At	V			
13:15:02	961	0	1,65	13:17:09	966	0	1,65	13:19:32	982	0	1,65		VOLTAJE FUENTE	1,7 V
13:15:03	953	0,992	1,64	13:17:10	953	0,987	0,53	13:19:33	974	0,992	0,39		CONCENTRACION	20%
13:15:04	943	1,982	1,64	13:17:11	939	1,973	0,29	13:19:34	968	1,986	0,24		TAMAÑO PORO	10 um
13:15:05	931	2,97	0,56	13:17:12	977	3,011	0,21	13:19:35	958	2,976	0,19		TIEMPO SECADO	0 min
13:15:06	963	4,002	0,3	13:17:13	958	3,992	0,18	13:19:36	946	3,964	0,16		GROSOR:	1 capa
13:15:07	949	4,988	0,23	13:17:14	942	4,976	0,16	13:19:37	989	5,007	0,14		ELECTRODOS:	GRAFITO
13:15:08	934	5,973	0,2	13:17:15	972	6,006	0,14	13:19:38	974	5,992	0,12		TAMAÑO PLACAS	3,5 X 7 cm
13:15:09	967	7,006	0,17	13:17:16	957	6,991	0,13	13:19:39	957	6,975	0,11		PAPEL	Pequeño 108
13:15:10	952	7,991	0,16	13:17:17	942	7,976	0,12	13:19:40	984	8,002	0,1		RESISTENCIAS	10
13:15:11	942	8,981	0,14	13:17:18	979	9,013	0,1	13:19:41	979	8,997	0,09			
13:15:12	973	10,012	0,13	13:17:19	967	10,001	0,09	13:19:42	971	9,989	0,08			
13:15:13	962	11,001	0,12	13:17:20	955	10,989	0,09	13:19:43	966	10,984	0,07			
13:15:14	948	11,987	0,11	13:17:21	938	11,972	0,08	13:19:44	954	11,972	0,06			
13:15:15	936	12,975	0,1	13:17:22	971	13,005	0,07	13:19:45	950	12,968	0,06			
13:15:16	972	14,011	0,09	13:17:23	958	13,992	0,06	13:19:46	987	14,005	0,05			
13:15:17	955	14,994	0,08	13:17:24	984	15,018	0,05	13:19:47	972	14,99	0,05			
13:15:18	945	15,984	0,07	13:17:25	974	16,008	0,05	13:19:48	963	15,981	0,04			
13:15:19	931	16,97	0,07	13:17:26	955	16,989	0,04	13:19:49	945	16,963	0,04			
13:15:20	963	18,002	0,06	13:17:27	944	17,978	0,04	13:19:50	981	17,999	0,03			
13:15:21	946	18,985	0,06	13:17:28	977	19,011	0,04	13:19:51	971	18,989	0,03			
13:15:22	930	19,969	0,05	13:17:29	963	19,997	0,03	13:19:52	964	19,982	0,03			
13:15:23	965	21,004	0,05	13:17:30	954	20,988	0,03	13:19:53	956	20,974	0,03			
13:15:24	954	21,993	0,04	13:17:31	945	21,979	0,03	13:19:54	996	22,014	0,02			
13:15:25	939	22,978	0,04	13:17:32	981	23,015	0,03	13:19:55	969	22,987	0,02			
13:15:26	932	23,971	0,03	13:17:33	962	23,996	0,02	13:19:56	952	23,97	0,02			
13:15:27	963	25,002	0,03	13:17:34	945	24,979	0,02	13:19:57	985	25,003	0,02			
13:15:28	952	25,991	0,02	13:17:35	978	26,012	0,02	13:19:58	986	26,004	0,01			
13:15:29	935	26,974	0,03	13:17:36	973	27,007	0,02	13:19:59	960	26,978	0,01			
13:15:30	970	28,009	0,01	13:17:37	943	27,977	0,02	13:20:00	995	28,013	0,01			
13:15:31	958	28,997	0,02	13:17:38	977	29,011	0,01	13:20:01	983	29,001	0,01			
13:15:32	949	29,988	0,02	13:17:39	957	29,991	0,01	13:20:02	971	29,989	0,01			
13:15:33	936	30,975	0,02	13:17:40	943	30,977	0,01	13:20:03	962	30,98	0,01			
13:15:34	976	32,015	0,02	13:17:41	971	32,005	0,01	13:20:04	953	31,971	0,01			
13:15:35	967	33,006	0,01	13:17:42	962	32,996	0,01	13:20:05	992	33,01	0,01			
13:15:36	950	33,989	0,01	13:17:43	947	33,981	0,01	13:20:06	974	33,992	0			
13:15:37	939	34,978	0,01	13:17:44	980	35,014	0,01							
13:15:38	968	36,007	0,01	13:17:46	8	36,042	0							
13:15:39	956	36,995	0,01											
13:15:40	949	37,988	0,01											
13:15:41	983	39,022	0,01											
13:15:42	950	39,989	0,01											
13:15:43	938	40,977	0											

Figura A1- 9 Resultados obtenidos para la combinación n°9

ANÁLISIS EXPERIMENTAL Y ESTUDIO DE POSIBLES USOS DE SUPERCAPACITORES EN LOS SUBMARINOS DE LA ARMADA

MEDICIÓN 1				MEDICIÓN 2				MEDICIÓN 3				DATOS:	
HH/MM/SS	ms	At	Y	HH/MM/SS	ms	At	Y	HH/MM/SS	ms	At	Y		
13:38:06	66	0	1,65	13:40:09	69	0	1,65	13:41:52	76	0	1,65	VOLTAJE FUENTE	1,7 V
13:38:07	101	1,035	0,56	13:40:10	103	1,034	0,54	13:41:53	113	1,037	0,43	CONCENTRACION	20%
13:38:08	89	2,023	0,32	13:40:11	93	2,024	0,31	13:41:54	101	2,025	0,27	TAMAÑO PORO	25 um
13:38:09	76	3,01	0,23	13:40:12	83	3,014	0,22	13:41:55	88	3,012	0,2	TIEMPO SECADO	0 min
13:38:10	68	4,002	0,2	13:40:13	75	4,006	0,18	13:41:56	78	4,002	0,17	GROSOR:	1 capa
13:38:11	104	5,038	0,17	13:40:14	102	5,033	0,16	13:41:57	106	5,03	0,15	ELECTRODOS:	GRAFITO
13:38:12	89	6,023	0,15	13:40:15	90	6,021	0,14	13:41:58	96	6,02	0,13	TAMAÑO PLACAS	3,5 X 7 cm
13:38:13	76	7,01	0,14	13:40:16	78	7,009	0,12	13:41:59	82	7,006	0,12	PAPEL	Grande 607
13:38:14	63	7,997	0,13	13:40:17	111	8,042	0,11	13:42:00	119	8,043	0,11	RESISTENCIAS	10
13:38:15	102	9,036	0,12	13:40:18	98	9,029	0,11	13:42:01	107	9,031	0,09		
13:38:16	92	10,026	0,11	13:40:19	85	10,016	0,1	13:42:02	95	10,019	0,08		
13:38:17	82	11,016	0,1	13:40:20	70	11,001	0,08	13:42:03	76	11	0,08		
13:38:18	69	12,003	0,1	13:40:21	105	12,036	0,08	13:42:04	109	12,033	0,07		
13:38:19	105	13,039	0,09	13:40:22	92	13,023	0,07	13:42:05	97	13,021	0,06		
13:38:20	94	14,028	0,08	13:40:23	76	14,007	0,06	13:42:06	86	14,01	0,06		
13:38:21	82	15,016	0,08	13:40:24	109	15,04	0,05	13:42:07	74	14,998	0,05		
13:38:22	81	16,015	0,07	13:40:25	91	16,022	0,05	13:42:08	110	16,034	0,05		
13:38:23	62	16,996	0,06	13:40:26	84	17,015	0,05	13:42:09	100	17,024	0,04		
13:38:24	100	18,034	0,06	13:40:27	72	18,003	0,04	13:42:10	88	18,012	0,04		
13:38:25	86	19,02	0,06	13:40:28	107	19,038	0,04	13:42:11	74	18,998	0,04		
13:38:26	71	20,005	0,05	13:40:29	96	20,027	0,04	13:42:12	104	20,028	0,03		
13:38:27	100	21,034	0,05	13:40:30	84	21,015	0,03	13:42:13	91	21,015	0,03		
13:38:28	89	22,023	0,04	13:40:31	75	22,006	0,03	13:42:14	119	22,043	0,03		
13:38:29	78	23,012	0,04	13:40:32	109	23,04	0,03	13:42:15	105	23,029	0,03		
13:38:30	66	24	0,04	13:40:33	97	24,028	0,03	13:42:16	89	24,013	0,02		
13:38:31	97	25,031	0,03	13:40:34	84	25,015	0,02	13:42:17	86	25,01	0,02		
13:38:32	83	26,017	0,03	13:40:35	75	26,006	0,02	13:42:18	109	26,033	0,02		
13:38:33	74	27,008	0,03	13:40:36	107	27,038	0,02	13:42:19	91	27,015	0,02		
13:38:34	61	27,995	0,03	13:40:37	96	28,027	0,02	13:42:20	79	28,003	0,02		
13:38:35	96	29,03	0,02	13:40:38	83	29,014	0,02	13:42:21	116	29,04	0,02		
13:38:36	82	30,016	0,02	13:40:39	114	30,045	0,01	13:42:22	103	30,027	0,01		
13:38:37	73	31,007	0,02	13:40:40	98	31,029	0,01	13:42:23	93	31,017	0,01		
13:38:38	63	31,997	0,02	13:40:41	83	32,014	0,01	13:42:24	113	32,037	0,01		
13:38:39	99	33,027	0,02	13:40:42	107	33,038	0,01	13:42:25	86	33,01	0,01		
13:38:40	82	34,016	0,01	13:40:43	93	34,034	0,01	13:42:26	92	34,016	0,01		
13:38:41	69	35,003	0,01	13:40:44	82	35,013	0,01	13:42:27	117	35,041	0,01		
13:38:42	102	36,036	0,01	13:40:45	109	36,04	0,01	13:42:28	105	36,029	0,01		
13:38:43	92	37,026	0,01	13:40:46	93	37,024	0,01	13:42:29	94	37,018	0,01		
13:38:44	83	38,017	0,01	13:40:47	76	38,007	0,01	13:42:30	80	38,004	0		
13:38:45	71	39,005	0,01	13:40:48	112	39,043	0						
13:38:46	109	40,043	0,01										
13:38:47	132	41,066	0,01										
13:38:48	81	42,015	0,01										
13:38:49	66	43	0,01										
13:38:50	102	44,036	0										

Figura A1- 10 Resultados obtenidos para la combinación n°10

MEDICIÓN 1				MEDICIÓN 2				MEDICIÓN 3				DATOS:	
HH/MM/SS	ms	At	Y	HH/MM/SS	ms	At	Y	HH/MM/SS	ms	At	Y		
13:01:39	586	0	1,65	13:03:52	561	0	1,65	13:04:58	590	0	1,65	VOLTAJE FUENTE	1,7 V
13:01:40	569	0,983	0,23	13:03:53	546	0,985	0,49	13:04:59	579	0,989	0,26	CONCENTRACION	20%
13:01:41	552	1,966	0,16	13:03:54	576	2,015	0,19	13:05:00	571	1,981	0,15	TAMAÑO PORO	10 um
13:01:42	585	2,999	0,13	13:03:55	560	2,999	0,13	13:05:01	562	2,972	0,1	TIEMPO SECADO	10 min
13:01:43	568	3,982	0,1	13:03:56	594	4,033	0,09	13:05:02	553	3,963	0,07	GROSOR:	1 capa
13:01:44	556	4,97	0,08	13:03:57	582	5,021	0,07	13:05:03	586	4,996	0,05	ELECTRODOS:	GRAFITO
13:01:45	538	5,952	0,06	13:03:58	567	6,006	0,05	13:05:04	577	5,987	0,04	TAMAÑO PLACAS	3,5 X 7 cm
13:01:46	573	6,987	0,05	13:03:59	551	6,99	0,04	13:05:05	567	6,977	0,03	PAPEL	Pequeño 108
13:01:47	553	7,967	0,04	13:04:00	587	8,026	0,03	13:05:06	555	7,965	0,03	RESISTENCIAS	10
13:01:48	540	8,954	0,03	13:04:01	575	9,014	0,03	13:05:07	591	9,001	0,02		
13:01:49	576	9,99	0,03	13:04:02	562	10,001	0,02	13:05:08	572	9,982	0,02		
13:01:50	564	10,978	0,03	13:04:03	549	10,988	0,02	13:05:09	557	10,967	0,01		
13:01:51	544	11,958	0,02	13:04:04	584	12,023	0,02	13:05:10	585	11,995	0,01		
13:01:52	574	12,988	0,02	13:04:05	566	13,005	0,01	13:05:11	568	12,978	0,01		
13:01:53	560	13,974	0,01	13:04:06	547	13,986	0,01	13:05:12	597	14,007	0,01		
13:01:54	551	14,965	0,01	13:04:07	584	15,023	0,01	13:05:13	586	14,996	0		
13:01:55	585	15,999	0,01	13:04:08	566	16,005	0						
13:01:56	566	16,98	0,01										
13:01:57	555	17,969	0,01										
13:01:58	544	18,958	0,01										
13:01:59	576	19,99	0,01										
13:02:00	560	20,974	0										

Figura A1- 11 Resultados obtenidos para la combinación n°11

MEDICIÓN 1				MEDICIÓN 2				MEDICIÓN 3				DATOS:	
HH/MM/SS	ms	At	Y	HH/MM/SS	ms	At	Y	HH/MM/SS	ms	At	Y		
12:50:46	477	0	1,65	12:52:04	502	0	1,65	12:53:43	508	0	1,65	VOLTAJE FUENTE	1,7 V
12:50:47	473	0,996	0,24	12:52:05	484	0,982	0,37	12:53:44	493	0,985	0,56	CONCENTRACION	20%
12:50:48	510	2,023	0,19	12:52:06	513	2,011	0,22	12:53:45	479	1,971	0,23	TAMAÑO PORO	20 um
12:50:49	504	3,027	0,16	12:52:07	498	2,996	0,18	12:53:46	509	3,001	0,19	TIEMPO SECADO	5 min
12:50:50	497	4,02	0,13	12:52:08	482	3,98	0,15	12:53:47	493	3,985	0,16	GROSOR:	1 capa
12:50:51	486	5,009	0,11	12:52:09	515	5,013	0,13	12:53:48	476	4,968	0,14	ELECTRODOS:	GRAFITO
12:50:52	485	6,008	0,1	12:52:10	499	5,997	0,11	12:53:49	507	5,999	0,12	TAMAÑO PLACAS	3,5 X 7 cm
12:50:53	479	7,002	0,08	12:52:11	479	6,977	0,1	12:53:50	493	6,985	0,11	PAPEL	Mediano
12:50:54	470	7,993	0,07	12:52:12	510	8,008	0,08	12:53:51	473	7,965	0,09	RESISTENCIAS	10
12:50:55	510	9,033	0,06	12:52:13	494	8,992	0,07	12:53:52	505	8,997	0,08		
12:50:56	510	10,033	0,05	12:52:14	478	9,976	0,06	12:53:53	489	9,981	0,07		
12:50:57	507	11,03	0,04	12:52:15	507	11,005	0,06	12:53:54	474	10,966	0,06		
12:50:58	490	12,013	0,04	12:52:16	492	11,99	0,05	12:53:55	503	11,995	0,05		
12:50:59	473	12,996	0,03	12:52:17	473	12,971	0,04	12:53:56	488	12,98	0,05		
12:51:00	503	14,026	0,03	12:52:18	503	14,001	0,04	12:53:57	517	14,009	0,04		
12:51:01	486	15,009	0,02	12:52:19	486	14,984	0,03	12:53:58	501	14,993	0,04		
12:51:02	468	15,991	0,02	12:52:20	471	15,969	0,03	12:53:59	486	15,978	0,03		
12:51:03	499	17,022	0,02	12:52:21	500	16,998	0,02	12:54:00	515	17,007	0,03		
12:51:04	482	18,005	0,02	12:52:22	488	17,986	0,02	12:54:01	501	17,993	0,03		
12:51:05	465	18,988	0,02	12:52:23	472	18,97	0,02	12:54:02	485	18,977	0,03		
12:51:06	494	20,017	0,01	12:52:24	502	20	0,02	12:54:03	516	20,008	0,02		
12:51:07	476	20,999	0,01	12:52:25	484	20,982	0,02	12:54:04	499	20,991	0,02		
12:51:08	503												

MEDICIÓN 1					MEDICIÓN 2					MEDICIÓN 3					DATOS:		
HH/MM/SS	ms	At	V		HH/MM/SS	ms	At	V		HH/MM/SS	ms	At	V				
9:15:07	374	0	1,65		9:16:20	396	0	1,65		9:17:33	374	0	1,65			VOLTAJE FUENTE	1,7 V
9:15:08	397	1,023	1,47		9:16:21	377	0,981	0,2		9:17:34	400	1,026	0,25			CONCENTRACION	10%
9:15:09	370	1,996	0,18		9:16:22	394	1,998	0,14		9:17:35	381	2,007	0,17			TAMAÑO PORO	20 um
9:15:10	392	3,018	0,13		9:16:23	371	2,975	0,11		9:17:36	401	3,027	0,16			TIEMPO SECADO	10 min
9:15:11	368	3,994	0,1		9:16:24	393	3,997	0,08		9:17:37	378	4,004	0,11			GROSOR:	1 capa
9:15:12	390	5,016	0,08		9:16:25	379	4,983	0,07		9:17:38	402	5,028	0,09			ELECTRODOS:	GRAFITO
9:15:13	371	5,997	0,06		9:16:26	398	6,002	0,06		9:17:39	418	6,044	0,08			TAMAÑO PLACAS	3,5 X 7 cm
9:15:14	400	7,026	0,05		9:16:27	377	6,981	0,05		9:17:40	390	7,016	0,06			PAPEL	Mediano
9:15:15	373	7,999	0,04		9:16:28	402	8,006	0,04		9:17:41	375	8,001	0,06			RESISTENCIAS	10
9:15:16	378	9,004	0,04		9:16:29	380	8,984	0,04		9:17:42	396	9,022	0,05				
9:15:17	377	10,003	0,03		9:16:30	406	10,01	0,03		9:17:43	420	10,046	0,04				
9:15:18	398	11,024	0,03		9:16:31	383	10,987	0,03		9:17:44	392	11,018	0,04				
9:15:19	373	11,999	0,02		9:16:32	409	12,013	0,02		9:17:45	410	12,036	0,03				
9:15:20	401	13,027	0,02		9:16:33	384	12,988	0,02		9:17:46	391	13,017	0,03				
9:15:21	376	14,002	0,02		9:16:34	410	14,014	0,02		9:17:47	372	13,998	0,03				
9:15:22	392	15,018	0,01		9:16:35	389	14,993	0,01		9:17:48	397	15,023	0,02				
9:15:23	421	16,047	0,01		9:16:36	413	16,017	0,01		9:17:49	374	16	0,02				
9:15:24	392	17,018	0,01		9:16:37	388	16,997	0,01		9:17:50	383	17,019	0,02				
9:15:25	441	18,067	0,01		9:16:38	409	18,013	0,01		9:17:51	419	18,045	0,02				
9:15:26	384	19,01	0,01		9:16:39	388	18,992	0,01		9:17:52	390	19,016	0,02				
9:15:27	420	20,046	0,01		9:16:40	404	20,008	0		9:17:53	375	20,001	0,01				
9:15:28	396	21,022	0							9:17:54	405	21,031	0,01				
										9:17:55	383	22,009	0,01				
										9:17:56	403	23,029	0,01				
										9:17:57	381	24,007	0,01				
										9:17:58	396	25,022	0,01				
										9:17:59	412	26,038	0,01				
										9:18:00	389	27,015	0				

Figura A1- 13 Resultados obtenidos para la combinación n°13

MEDICIÓN 1					MEDICIÓN 2					MEDICIÓN 3					DATOS:		
HH/MM/SS	ms	At	V		HH/MM/SS	ms	At	V		HH/MM/SS	ms	At	V				
12:47:14	489	0	1,65		12:48:22	499	0	1,65		12:49:26	471	0	1,65			VOLTAJE FUENTE	1,7 V
12:47:15	479	0,99	0,27		12:48:23	495	0,996	0,25		12:49:27	470	0,999	0,29			CONCENTRACION	20%
12:47:16	473	1,984	0,2		12:48:24	491	1,992	0,19		12:49:28	463	1,992	0,2			TAMAÑO PORO	20 um
12:47:17	463	2,974	0,16		12:48:25	487	2,988	0,15		12:49:29	503	3,032	0,16			TIEMPO SECADO	5 min
12:47:18	462	3,973	0,13		12:48:26	478	3,979	0,13		12:49:30	494	4,023	0,13			GROSOR:	1 capa
12:47:19	461	4,972	0,11		12:48:27	471	4,972	0,11		12:49:31	482	5,011	0,11			ELECTRODOS:	GRAFITO
12:47:20	459	5,97	0,09		12:48:28	462	5,963	0,09		12:49:32	478	6,007	0,09			TAMAÑO PLACAS	3,5 X 7 cm
12:47:21	496	7,007	0,07		12:48:29	503	7,004	0,07		12:49:33	474	7,003	0,07			PAPEL	Mediano
12:47:22	492	8,003	0,06		12:48:30	495	7,996	0,06		12:49:34	468	7,997	0,06			RESISTENCIAS	10
12:47:23	487	8,998	0,05		12:48:31	492	8,993	0,05		12:49:35	465	8,994	0,06				
12:47:24	476	9,987	0,04		12:48:32	486	9,987	0,05		12:49:36	459	9,988	0,05				
12:47:25	469	10,98	0,04		12:48:33	483	10,984	0,04		12:49:37	492	11,021	0,04				
12:47:26	468	11,979	0,03		12:48:34	481	11,982	0,03		12:49:38	483	12,012	0,03				
12:47:27	464	12,975	0,03		12:48:35	478	12,979	0,03		12:49:39	474	13,003	0,03				
12:47:28	464	13,975	0,02		12:48:36	467	13,968	0,02		12:49:40	467	13,996	0,02				
12:47:29	503	15,014	0,02		12:48:37	464	14,965	0,02		12:49:41	463	14,992	0,02				
12:47:30	498	16,009	0,02		12:48:38	459	15,96	0,02		12:49:42	508	16,037	0,02				
12:47:31	492	17,003	0,01		12:48:39	502	17,003	0,01		12:49:43	502	17,031	0,01				
12:47:32	491	18,002	0,01		12:48:40	500	18,001	0,01		12:49:44	491	18,02	0,01				
12:47:33	485	18,996	0,01		12:48:41	494	18,995	0,01		12:49:45	488	19,017	0,01				
12:47:34	482	19,993	0,01		12:48:42	492	19,993	0,01		12:49:46	480	20,009	0,01				
12:47:35	480	20,991	0		12:48:43	488	20,989	0,01		12:49:47	471	21	0,01				
					12:48:44	479	21,98	0		12:49:48	509	22,038	0				

Figura A1- 14 Resultados obtenidos para la combinación n°14

MEDICIÓN 1					MEDICIÓN 2					MEDICIÓN 3					DATOS:		
HH/MM/SS	ms	At	V		HH/MM/SS	ms	At	V		HH/MM/SS	ms	At	V				
13:51:55	372	0	1,65		13:53:39	394	0	1,65		13:55:12	410	0	1,65			VOLTAJE FUENTE	1,7 V
13:51:56	403	1,031	1,59		13:53:40	379	0,985	0,35		13:55:13	393	0,993	1,59			CONCENTRACION	20%
13:51:57	388	2,016	0,32		13:53:41	410	2,016	0,32		13:55:14	378	1,968	0,31			TAMAÑO PORO	25 um
13:51:58	378	3,006	0,21		13:53:42	396	3,002	0,17		13:55:15	409	2,999	0,21			TIEMPO SECADO	10 min
13:51:59	365	3,993	0,17		13:53:43	382	3,988	0,14		13:55:16	397	3,987	0,16			GROSOR:	1 capa
13:52:00	395	5,023	0,14		13:53:44	371	4,977	0,12		13:55:17	382	4,972	0,13			ELECTRODOS:	GRAFITO
13:52:01	383	6,011	0,12		13:53:45	403	6,009	0,11		13:55:18	414	6,004	0,11			TAMAÑO PLACAS	3,5 X 7 cm
13:52:02	368	6,996	0,11		13:53:46	389	6,995	0,1		13:55:19	402	6,992	0,1			PAPEL	Grande 60T
13:52:03	401	8,029	0,1		13:53:47	417	8,023	0,08		13:55:20	390	7,98	0,09			RESISTENCIAS	10
13:52:04	390	9,018	0,09		13:53:48	400	9,006	0,07		13:55:21	423	9,013	0,08				
13:52:05	378	10,006	0,08		13:53:49	387	9,993	0,07		13:55:22	410	10	0,07				
13:52:06	365	10,993	0,08		13:53:50	372	10,978	0,06		13:55:23	394	10,984	0,07				
13:52:07	398	12,026	0,07		13:53:51	406	12,012	0,06		13:55:24	381	11,971	0,06				
13:52:08	384	13,012	0,06		13:53:52	392	12,998	0,05		13:55:25	414	13,004	0,05				
13:52:09	372	14	0,06		13:53:53	379	13,985	0,05		13:55:26	399	13,989	0,05				
13:52:10	405	15,033	0,05		13:53:54	415	15,021	0,04		13:55:27	385	14,975	0,04				
13:52:11	392	16,02	0,05		13:53:55	397	16,003	0,04		13:55:28	417	16,007	0,04				
13:52:12	379	17,007	0,04		13:53:56	380	16,986	0,03		13:55:29	404	16,994	0,04				
13:52:13	367	17,995	0,04		13:53:57	410	18,016	0,03		13:55:30	388	17,978	0,03				
13:52:14	401	19,029	0,04		13:53:58	397	19,003	0,03		13:55:31	418	19,008	0,03				
13:52:15	385	20,013	0,04		13:53:59	382	19,988	0,03		13:55:32	405	19,995	0,03				
13:52:16	370	20,998	0,03		13:54:00	416	21,022	0,02		13:55:33	390	20,98	0,02				
13:52:17	405	22,033	0,03		13:54:01	402	22,008	0,02		13:55:34	420	22,01	0,03				
13:52:18	392	23,02	0,03		13:54:02	388	22,994	0,02		13:55:35	404	22,994	0,02				
13:52:19	376	24,004	0,02		13:54:03	417	24,023	0,02		13:55:36	387	23,977	0,02				
13:52:20	408	25,036	0,02		13:54:04	403	25,009	0,02		13:55:37	419	25,009	0,02				
13:52:21	391	26,019	0,02		13:54:05	386	25,992	0,02		13:55:38	403	25,993	0,02				
13:52:22	378	27,006	0														

ANEXO II: TABLAS DE MEDICIONES PARA EL SUPERCAPACITOR NÚMERO 2

En este anexo se mostrarán todas las mediciones obtenidas para cada una de las 15 combinaciones analizadas del prototipo de supercapacitor n°2.

MEDICIÓN 1				MEDICIÓN 2				MEDICIÓN 3				DATOS:		
HH/MM/SS	ms	At	V	HH/MM/SS	ms	At	V	HH/MM/SS	ms	At	V			
10:22:19	445	0	1,65	10:23:44	460	0	1,65	10:25:03	428	0	1,65		VOLTAJE FUENTE	1,7V
10:22:20	426	0,981	1,54	10:23:45	441	0,981	1,48	10:25:04	457	1,029	0,26		CONCENTRACION	27%
10:22:21	454	2,009	0,25	10:23:46	425	1,965	0,25	10:25:05	465	2,037	0,17		TAMAÑO PORO	10 um
10:22:22	433	2,988	0,17	10:23:47	450	2,99	0,16	10:25:06	424	2,996	0,12		TIEMPO SECADO	0 min
10:22:23	457	4,012	0,14	10:23:48	419	3,959	0,12	10:25:07	446	4,018	0,1		GROSOR:	0,0002 m
10:22:24	434	4,989	0,12	10:23:49	452	4,992	0,1	10:25:08	438	5,01	0,08		ELECTRODOS:	GRAFITO
10:22:25	458	6,013	0,11	10:23:50	439	5,979	0,08	10:25:09	460	6,032	0,07		TAMAÑO PLACAS	3,5 X 7 cm
10:22:26	441	6,996	0,1	10:23:51	419	6,959	0,07	10:25:10	445	7,017	0,06		PAPEL	Pequeño 108
10:22:27	420	7,975	0,09	10:23:52	444	7,984	0,06	10:25:11	432	8,004	0,06		RESISTENCIAS	10
10:22:28	445	9	0,08	10:23:53	463	9,003	0,06	10:25:12	455	9,027	0,05			
10:22:29	432	9,987	0,07	10:23:54	452	9,992	0,05	10:25:13	433	10,005	0,04			
10:22:30	455	11,01	0,07	10:23:55	432	10,972	0,04	10:25:14	455	11,027	0,04			
10:22:31	435	11,99	0,06	10:23:56	458	11,998	0,04	10:25:15	426	11,998	0,03			
10:22:32	459	13,014	0,06	10:23:57	435	12,975	0,03	10:25:16	462	13,034	0,03			
10:22:33	440	13,995	0,05	10:23:58	415	13,955	0,03	10:25:17	445	14,017	0,02			
10:22:34	455	15,01	0,05	10:23:59	443	14,983	0,02	10:25:18	465	15,037	0,02			
10:22:35	438	15,993	0,04	10:24:00	422	15,962	0,02	10:25:19	448	16,02	0,02			
10:22:36	428	16,983	0,04	10:24:01	445	16,985	0,01	10:25:20	422	16,994	0,01			
10:22:37	455	18,01	0,03	10:24:02	424	17,964	0,01	10:25:21	443	18,015	0,01			
10:22:38	439	18,994	0,03	10:24:03	446	18,986	0,01	10:25:22	437	19,009	0,01			
10:22:39	423	19,978	0,03	10:24:04	428	19,968	0,01	10:25:23	450	20,022	0,01			
10:22:40	446	21,001	0,02	10:24:05	455	20,995	0,01	10:25:24	439	21,011	0			
10:22:41	422	21,977	0,02	10:24:06	437	21,977	0							
10:22:42	444	22,999	0,02											
10:22:43	422	23,977	0,02											
10:22:44	444	24,999	0,01											
10:22:45	426	25,981	0,01											
10:22:46	417	26,972	0,01											
10:22:47	432	27,987	0,01											
10:22:48	457	29,012	0,01											
10:22:49	433	29,988	0											

Figura A2- 1 Resultados obtenidos para la combinación n°1

MEDICIÓN 1				MEDICIÓN 2				MEDICIÓN 3				DATOS:		
HH/MM/SS	ms	At	V	HH/MM/SS	ms	At	V	HH/MM/SS	ms	At	V			
10:32:27	425	0	1,65	10:33:20	466	0	1,65	10:34:10	436	0	1,65		VOLTAJE FUENTE	1,7 V
10:32:28	455	1,03	0,08	10:33:21	452	0,986	0,09	10:34:11	462	1,026	1,26		CONCENTRACION	27%
10:32:29	428	2,003	0,05	10:33:22	435	1,969	0,06	10:34:12	441	2,005	1,18		TAMAÑO PORO	10 um
10:32:30	455	3,03	0,03	10:33:23	468	3,002	0,04	10:34:13	464	3,028	0,22		TIEMPO SECADO	10 min
10:32:31	441	4,016	0,03	10:33:24	431	3,965	0,03	10:34:14	447	4,011	0,07		GROSOR:	0,0002 m
10:32:32	424	4,999	0,02	10:33:25	459	4,993	0,02	10:34:15	467	5,031	0,05		ELECTRODOS:	GRAFITO
10:32:33	464	6,039	0,01	10:33:26	443	5,977	0,02	10:34:16	442	6,006	0,04		TAMAÑO PLACAS	3,5 X 7 cm
10:32:34	423	6,998	0,01	10:33:27	467	7,001	0,01	10:34:17	461	7,025	0,03		PAPEL	Pequeño 108
10:32:35	453	8,028	0	10:33:28	444	7,978	0,01	10:34:18	442	8,006	0,02		RESISTENCIAS	10
				10:33:29	425	8,959	0	10:34:19	424	8,988	0,02			
								10:34:20	454	10,018	0,01			
								10:34:21	431	10,995	0,01			
								10:34:22	440	12,004	0,01			
								10:34:23	459	13,023	0,01			
								10:34:24	430	13,994	0			

Figura A2- 2 Resultados obtenidos para la combinación n°2

MEDICIÓN 1				MEDICIÓN 2				MEDICIÓN 3				DATOS:		
HH/MM/SS	ms	At	V	HH/MM/SS	ms	At	V	HH/MM/SS	ms	At	V			
11:22:17	135	0	1,65	11:23:16	132	0	1,65	11:24:19	150	0	1,65		VOLTAJE FUENTE	1,7V
11:22:18	117	0,982	1,63	11:23:17	113	0,981	1,63	11:24:20	130	0,98	1,64		CONCENTRACION	27%
11:22:19	99	1,964	0,15	11:23:18	94	1,962	0,12	11:24:21	110	1,96	0,11		TAMAÑO PORO	25 um
11:22:20	123	2,988	0,08	11:23:19	121	2,989	0,06	11:24:22	137	2,987	0,06		TIEMPO SECADO	0 min
11:22:21	103	3,968	0,05	11:23:20	103	3,971	0,04	11:24:23	120	3,97	0,03		GROSOR:	0,0002 m
11:22:22	124	4,989	0,04	11:23:21	129	4,997	0,03	11:24:24	97	4,947	0,02		ELECTRODOS:	GRAFITO
11:22:23	99	5,964	0,03	11:23:22	108	5,976	0,02	11:24:25	125	5,975	0,01		TAMAÑO PLACAS	3,5 X 7 cm
11:22:24	121	6,986	0,02	11:23:23	133	7,001	0,01	11:24:26	105	6,955	0,01		PAPEL	Grande 607
11:22:25	99	7,964	0,02	11:23:24	111	7,979	0,01	11:24:27	130	7,98	0		RESISTENCIAS	10
11:22:26	121	8,986	0,01	11:23:25	96	8,964	0,01							
11:22:27	103	9,968	0,01	11:23:26	124	9,992	0							
11:22:28	131	10,996	0,00											

Figura A2- 3 Resultados obtenidos para la combinación n°3

MEDICIÓN 1				MEDICIÓN 2				MEDICIÓN 3				DATOS:	
HH/MM/SS	ms	At	V	HH/MM/SS	ms	At	V	HH/MM/SS	ms	At	V		
11:31:34	776	0	1,65	11:32:47	780	0	1,65	11:33:29	788	0	1,65	VOLTAJE FUENTE	1,5 V
11:31:35	767	0,991	0,13	11:32:48	764	0,984	0,08	11:33:30	769	0,981	0,13	CONCENTRACION	27%
11:31:36	749	1,973	0,04	11:32:49	792	2,012	0,05	11:33:31	749	1,961	0,04	TAMAÑO PORO	25 um
11:31:37	776	3	0,03	11:32:50	776	2,996	0,03	11:33:32	778	2,99	0,02	TIEMPO SECADO	10 min
11:31:38	756	3,98	0,01	11:32:51	761	3,981	0,03	11:33:33	759	3,971	0,01	GROSOR:	1 capa
11:31:39	791	5,015	0,01	11:32:52	792	5,012	0,02	11:33:34	785	4,997	0	ELECTRODOS:	GRAFITO
11:31:40	784	6,008	0	11:32:53	780	6	0,01					TAMAÑO PLACAS	3,5 X 7 cm
				11:32:54	761	6,981	0,01					PAPEL	Grande 607
				11:32:55	751	7,971	0,01					RESISTENCIAS	10
				11:32:56	784	9,004	0						

Figura A2- 4 Resultados obtenidos para la combinación n°4

MEDICIÓN 1				MEDICIÓN 2				MEDICIÓN 3				DATOS:	
HH/MM/SS	ms	At	V	HH/MM/SS	ms	At	V	HH/MM/SS	ms	At	V		
11:56:54	862	0	1,65	11:57:35	863	0	1,65	11:58:14	888	0	1,65	VOLTAJE FUENTE	1,7 V
11:56:55	888	1,026	1,65	11:57:36	883	1,02	0,06	11:58:15	863	0,975	0,06	CONCENTRACION	29%
11:56:56	866	2,004	0,07	11:57:37	869	2,006	0,03	11:58:16	895	2,007	0,03	TAMAÑO PORO	10 um
11:56:57	894	3,032	0,03	11:57:38	851	2,988	0,02	11:58:17	877	2,989	0,02	TIEMPO SECADO	5 min
11:56:58	873	4,011	0,02	11:57:39	882	4,019	0,01	11:58:18	900	4,012	0,01	GROSOR:	1 capa
11:56:59	850	4,988	0,01	11:57:40	864	5,001	0	11:58:19	883	4,995	0	ELECTRODOS:	GRAFITO
11:57:00	876	6,014	0									TAMAÑO PLACAS	3,5 X 7 cm
												PAPEL	Pequeño 108
												RESISTENCIAS	10

Figura A2- 5 Resultados obtenidos para la combinación n°5

MEDICIÓN 1				MEDICIÓN 2				MEDICIÓN 3				DATOS:	
HH/MM/SS	ms	At	V	HH/MM/SS	ms	At	V	HH/MM/SS	ms	At	V		
12:07:50	540	0	1,65	12:08:26	530	0	1,65	12:09:22	528	0	1,65	VOLTAJE FUENTE	1,5 V
12:07:51	564	1,024	0,06	12:08:27	558	1,028	0,12	12:09:23	555	1,027	0,07	CONCENTRACION	29%
12:07:52	545	2,005	0,03	12:08:28	542	2,012	0,05	12:09:24	537	2,009	0,04	TAMAÑO PORO	25 um
12:07:53	525	2,985	0,02	12:08:29	568	3,038	0,03	12:09:25	564	3,036	0,03	TIEMPO SECADO	5 min
12:07:54	552	4,012	0,01	12:08:30	548	4,018	0,02	12:09:26	545	4,017	0,01	GROSOR:	1 capa
12:07:55	533	4,993	0	12:08:31	526	4,996	0,01	12:09:27	526	4,998	0,01	ELECTRODOS:	GRAFITO
				12:08:32	553	6,023	0	12:09:28	553	6,025	0,01	TAMAÑO PLACAS	3,5 X 7 cm
								12:09:29	534	7,006	0	PAPEL	Grande 607
												RESISTENCIAS	10

Figura A2- 6 Resultados obtenidos para la combinación n°6

MEDICIÓN 1				MEDICIÓN 2				MEDICIÓN 3				DATOS:	
HH/MM/SS	ms	At	V	HH/MM/SS	ms	At	V	HH/MM/SS	ms	At	V		
16:47:16	574	0	1,65	16:47:50	556	0	1,65	16:48:18	567	0	1,65	VOLTAJE FUENTE	1,7 V
16:47:17	558	0,984	1,4	16:47:51	587	1,031	1,44	16:48:19	595	1,028	1,31	CONCENTRACION	25%
16:47:18	587	2,013	1,16	16:47:52	567	2,011	1,17	16:48:20	580	2,013	1,14	TAMAÑO PORO	25 um
16:47:19	568	2,994	1,07	16:47:53	593	3,037	1,08	16:48:21	563	2,996	1,06	TIEMPO SECADO	5 min
16:47:20	596	4,022	0,09	16:47:54	575	4,019	0,1	16:48:22	595	4,028	0,08	GROSOR:	1 capa
16:47:21	577	5,003	0,04	16:47:55	556	5	0,05	16:48:23	578	5,011	0,04	ELECTRODOS:	GRAFITO
16:47:22	560	5,986	0,02	16:47:56	582	6,026	0,03	16:48:24	561	5,994	0,02	TAMAÑO PLACAS	3,5 X 7 cm
16:47:23	587	7,013	0,02	16:47:57	563	7,007	0,01	16:48:25	590	7,023	0,01	PAPEL	Grande 607
16:47:24	569	7,995	0,01	16:47:58	595	8,039	0,01	16:48:26	571	8,004	0,01	RESISTENCIAS	10
16:47:25	600	9,026	0	16:47:59	575	9,019	0	16:48:27	601	9,034	0		

Figura A2- 7 Resultados obtenidos para la combinación n°7

MEDICIÓN 1				MEDICIÓN 2				MEDICIÓN 3				DATOS:	
HH/MM/SS	ms	At	V	HH/MM/SS	ms	At	V	HH/MM/SS	ms	At	V		
16:58:55	487	0	1,65	16:59:23	502	0	1,65	16:59:52	488	0	1,65	VOLTAJE FUENTE	1,7 V
16:58:56	481	0,994	0,18	16:59:24	495	0,993	1,22	16:59:53	471	0,983	1,65	CONCENTRACION	25%
16:58:57	476	1,989	0,07	16:59:25	489	1,987	1,08	16:59:54	498	2,01	1,17	TAMAÑO PORO	10 um
16:58:58	474	2,987	0,04	16:59:26	477	2,975	1,01	16:59:55	482	2,994	1,07	TIEMPO SECADO	5 min
16:58:59	465	3,978	0,02	16:59:27	472	3,97	0,07	16:59:56	509	4,021	0,12	GROSOR:	1 capa
16:59:00	506	5,019	0,02	16:59:28	512	5,01	0,04	16:59:57	493	5,005	0,05	ELECTRODOS:	GRAFITO
16:59:01	502	6,015	0,01	16:59:29	495	5,993	0,02	16:59:58	476	5,988	0,03	TAMAÑO PLACAS	3,5 X 7 cm
16:59:02	495	7,008	0	16:59:30	484	6,982	0,01	16:59:59	505	7,017	0,02	PAPEL	Pequeño 108
				16:59:31	471	7,969	0,01	17:00:00	486	7,998	0,01	RESISTENCIAS	10
				16:59:32	507	9,005	0	17:00:01	470	8,982	0,01		
								17:00:02	501	10,013	0		

Figura A2- 8 Resultados obtenidos para la combinación n°8

MEDICIÓN 1				MEDICIÓN 2				MEDICIÓN 3				DATOS:	
HH/MM/SS	ms	At	V	HH/MM/SS	ms	At	V	HH/MM/SS	ms	At	V		
16:22:08	607	0	1,65	16:22:40	621	0	1,65	16:23:24	621	0	1,65	VOLTAJE FUENTE	1,7 V
16:22:09	597	0,99	1,17	16:22:41	612	0,991	1,31	16:23:25	605	0,984	0,09	CONCENTRACION	25%
16:22:10	628	2,021	1,07	16:22:42	607	1,986	1,13	16:23:26	635	2,014	0,05	TAMAÑO PORO	20 um
16:22:11	616	3,009	1,02	16:22:43	605	2,984	1,05	16:23:27	624	3,003	0,02	TIEMPO SECADO	0 min
16:22:12	606	3,999	0,11	16:22:44	594	3,973	0,08	16:23:28	615	3,994	0,01	GROSOR:	1 capa
16:22:13	635	5,028	0,04	16:22:45	633	5,012	0,03	16:23:29	605	4,984	0,01	ELECTRODOS:	GRAFITO
16:22:14	616	6,009	0,02	16:22:46	618	5,997	0,01	16:23:30	599	5,978	0	TAMAÑO PLACAS	3,5 X 7 cm
16:22:15	602	6,995	0,01	16:22:47	607	6,986	0,01					PAPEL	Mediano
16:22:16	594	7,987	0	16:22:48	601	7,98	0					RESISTENCIAS	10

Figura A2- 9 Resultados obtenidos para la combinación n°9

MEDICIÓN 1				MEDICIÓN 2				MEDICIÓN 3				DATOS:	
HH/MM/SS	ms	At	V	HH/MM/SS	ms	At	V	HH/MM/SS	ms	At	V		
16:34:32	872	0	1,65	16:35:03	848	0	1,65	16:35:26	873	0	1,65	VOLTAJE FUENTE	1,7 V
16:34:33	855	0,983	1,27	16:35:04	875	1,027	0,12	16:35:27	855	0,982	1,19	CONCENTRACION	25%
16:34:34	842	1,97	1,08	16:35:05	855	2,007	0,05	16:35:28	883	2,01	0,07	TAMAÑO PORO	20 um
16:34:35	875	3,003	1	16:35:06	838	2,99	0,02	16:35:29	862	2,989	0,03	TIEMPO SECADO	10
16:34:36	865	3,993	0,06	16:35:07	866	4,018	0,01	16:35:30	844	3,971	0,02	GROSOR:	1 capa
16:34:37	856	4,984	0,03	16:35:08	849	5,001	0	16:35:31	874	5,001	0,01	ELECTRODOS:	GRAFITO
16:34:38	852	5,98	0,02					16:35:32	855	5,982	0	TAMAÑO PLACAS	3,5 X 7 cm
16:34:39	841	6,969	0									PAPEL	Mediano
												RESISTENCIAS	10

Figura A2- 10 Resultados obtenidos para la combinación n°10

MEDICIÓN 1				MEDICIÓN 2				MEDICIÓN 3				DATOS:	
HH/MM/SS	ms	At	V	HH/MM/SS	ms	At	V	HH/MM/SS	ms	At	V		
14:39:18	296	0	1,65	14:39:52	303	0	1,65	14:40:31	321	0	1,65	VOLTAJE FUENTE	1,7 V
14:39:19	327	1,031	0,04	14:39:53	335	1,032	1,08	14:40:32	304	0,983	1,25	CONCENTRACION	27%
14:39:20	309	2,013	0,02	14:39:54	318	2,015	1,02	14:40:33	333	2,012	1,11	TAMAÑO PORO	20 um
14:39:21	339	3,043	0	14:39:55	301	2,998	0,98	14:40:34	318	2,997	1,08	TIEMPO SECADO	5 min
				14:39:56	331	4,028	0,02	14:40:35	301	3,98	1,05	GROSOR:	1 capa
				14:39:57	314	5,011	0	14:40:36	331	5,01	1,04	ELECTRODOS:	GRAFITO
								14:40:37	313	5,992	1,02	TAMAÑO PLACAS	3,5 X 7 cm
								14:40:38	342	7,021	0,03	PAPEL	Mediano
								14:40:39	324	8,003	0,01	RESISTENCIAS	10
								14:40:40	304	8,983	0		

Figura A2- 11 Resultados obtenidos para la combinación n°11

MEDICIÓN 1				MEDICIÓN 2				MEDICIÓN 3				DATOS:	
HH/MM/SS	ms	At	V	HH/MM/SS	ms	At	V	HH/MM/SS	ms	At	V		
14:41:30	332	0	1,65	14:42:03	342	0	1,65	14:42:32	336	0	1,65	VOLTAJE FUENTE	1,7 V
14:41:31	322	0,99	1,2	14:42:04	335	0,993	1,1	14:42:33	327	0,991	1,11	CONCENTRACION	27%
14:41:32	311	1,979	1,11	14:42:05	322	1,98	1,04	14:42:34	318	1,982	1	TAMAÑO PORO	20 um
14:41:33	305	2,973	0,03	14:42:06	310	2,968	1,01	14:42:35	301	2,965	0,95	TIEMPO SECADO	5 min
14:41:34	340	4,008	0,01	14:42:07	307	3,965	0,03	14:42:36	341	4,005	0,02	GROSOR:	1 capa
14:41:35	330	4,998	0,01	14:42:08	341	4,999	0,01	14:42:37	325	4,989	0	ELECTRODOS:	GRAFITO
14:41:36	318	5,986	0	14:42:09	332	5,99	0					TAMAÑO PLACAS	3,5 X 7 cm
												PAPEL	Mediano
												RESISTENCIAS	10

Figura A2- 12 Resultados obtenidos para la combinación n°12

MEDICIÓN 1				MEDICIÓN 2				MEDICIÓN 3				DATOS:	
HH/MM/SS	ms	At	V	HH/MM/SS	ms	At	V	HH/MM/SS	ms	At	V		
14:43:11	336	0	1,65	14:43:37	331	0	1,65	14:44:04	322	0	1,65	VOLTAJE FUENTE	1,7 V
14:43:12	326	0,99	1,13	14:43:38	317	0,986	1,18	14:44:05	312	0,99	1,34	CONCENTRACION	27%
14:43:13	320	1,984	1,02	14:43:39	353	2,022	1,01	14:44:06	347	2,025	1,03	TAMAÑO PORO	20 um
14:43:14	305	2,969	0,97	14:43:40	340	3,009	0,95	14:44:07	337	3,015	0,97	TIEMPO SECADO	5 min
14:43:15	343	4,007	0,02	14:43:41	331	4	0,02	14:44:08	323	4,001	0,03	GROSOR:	1 capa
14:43:16	340	5,004	0	14:43:42	315	4,984	0	14:44:09	309	4,987	0	ELECTRODOS:	GRAFITO
												TAMAÑO PLACAS	3,5 X 7 cm
												PAPEL	Mediano
												RESISTENCIAS	10

Figura A2- 13 Resultados obtenidos para la combinación n°13

MEDICIÓN 1				MEDICIÓN 2				MEDICIÓN 3				DATOS:	
HH/MM/SS	ms	At	V	HH/MM/SS	ms	At	V	HH/MM/SS	ms	At	V		
15:46:43	235	0	1,65	15:47:16	267	0	1,65	15:47:47	285	0	1,65	VOLTAJE FUENTE	1,7 V
15:46:44	277	1,042	1,18	15:47:17	256	0,989	1,11	15:47:48	273	0,988	1,29	CONCENTRACION	29%
15:46:45	265	2,03	1,02	15:47:18	246	1,979	1,01	15:47:49	265	1,98	1,05	TAMAÑO PORO	20 um
15:46:46	258	3,023	0,95	15:47:19	245	2,978	0,95	15:47:50	254	2,969	0,98	TIEMPO SECADO	0 min
15:46:47	250	4,015	0,03	15:47:20	237	3,97	0,04	15:47:51	243	3,958	0,07	GROSOR:	1 capa
15:46:48	236	5,001	0	15:47:21	266	4,999	0,01	15:47:52	276	4,991	0,01	ELECTRODOS:	GRAFITO
				15:47:22	250	5,983	0	15:47:53	273	5,988	0	TAMAÑO PLACAS	3,5 X 7 cm
												PAPEL	Mediano
												RESISTENCIAS	10

Figura A2- 14 Resultados obtenidos para la combinación n°14

MEDICIÓN 1				MEDICIÓN 2				MEDICIÓN 3				DATOS:	
HH/MM/SS	ms	At	V	HH/MM/SS	ms	At	V	HH/MM/SS	ms	At	V		
15:57:33	88	0	1,65	15:58:09	70	0	1,65	15:58:40	110	0	1,65	VOLTAJE FUENTE	1,7 V
15:57:34	76	0,988	0,05	15:58:10	68	0,998	1,18	15:58:41	106	0,996	1,1	CONCENTRACION	29%
15:57:35	70	1,982	0,01	15:58:11	108	2,038	0,94	15:58:42	99	1,989	1	TAMAÑO PORO	20 um
15:57:36	62	2,974	0	15:58:12	107	3,037	0,85	15:58:43	86	2,976	0,93	TIEMPO SECADO	10 min
				15:58:13	100	4,03	0,03	15:58:44	77	3,967	0,04	GROSOR:	1 capa
				15:58:14	90	5,02	0	15:58:45	67	4,957	0,01	ELECTRODOS:	GRAFITO
								15:58:46	61	5,951	0	TAMAÑO PLACAS	3,5 X 7 cm
												PAPEL	Mediano
												RESISTENCIAS	10

Figura A2- 15 Resultados obtenidos para la combinación n°15

ANEXO III: GRÁFICAS DE RESULTADOS DEL SUPERCAPACITOR NÚMERO 1

En este anexo se mostrarán los resultados de capacitancia, densidad energética y potencia específica media obtenidos para cada una de las 45 mediciones realizadas en el prototipo de supercapacitor n°1.

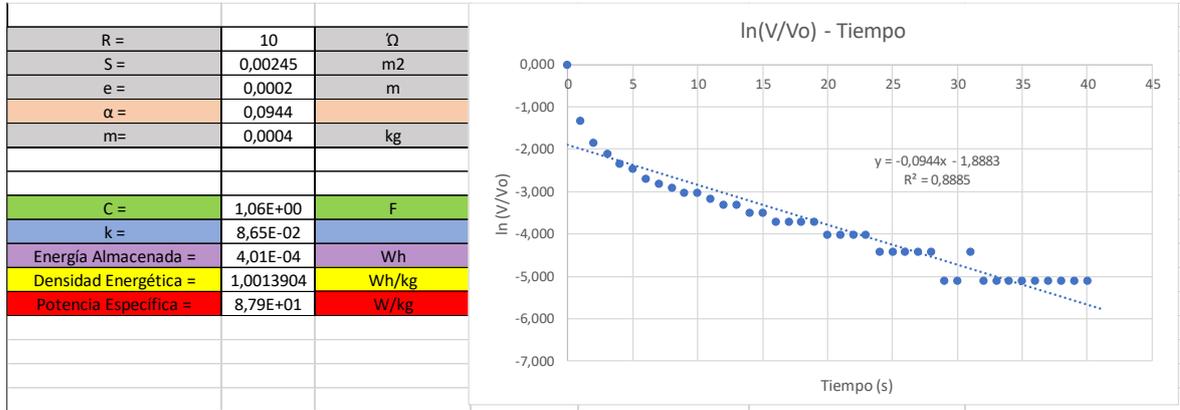


Figura A3- 1 Resultados obtenidos en la combinación n°1 - medición n°1

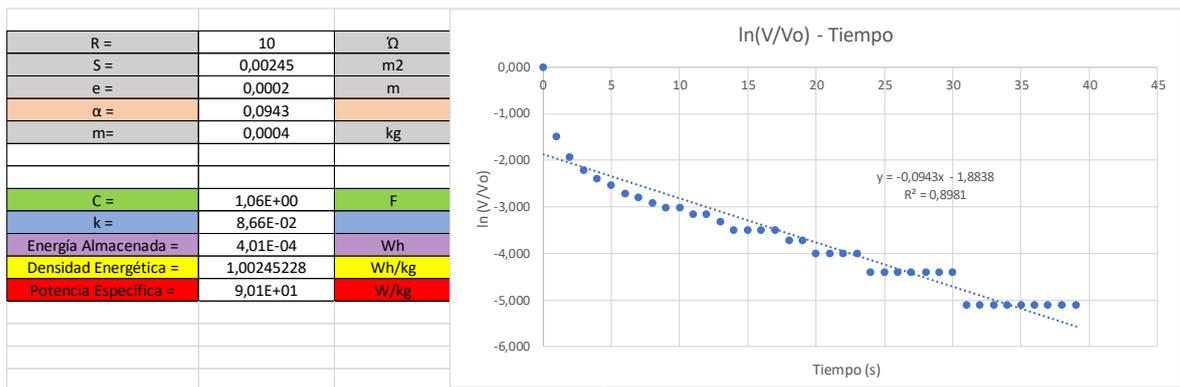


Figura A3- 2 Resultados obtenidos en la combinación n°1 - medición n°2

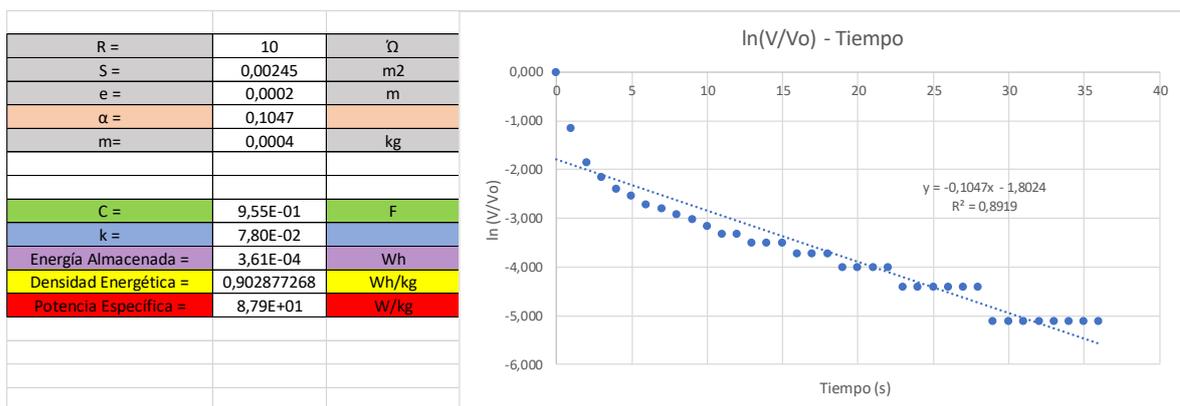


Figura A3- 3 Resultados obtenidos en la combinación n°1 - medición n°3

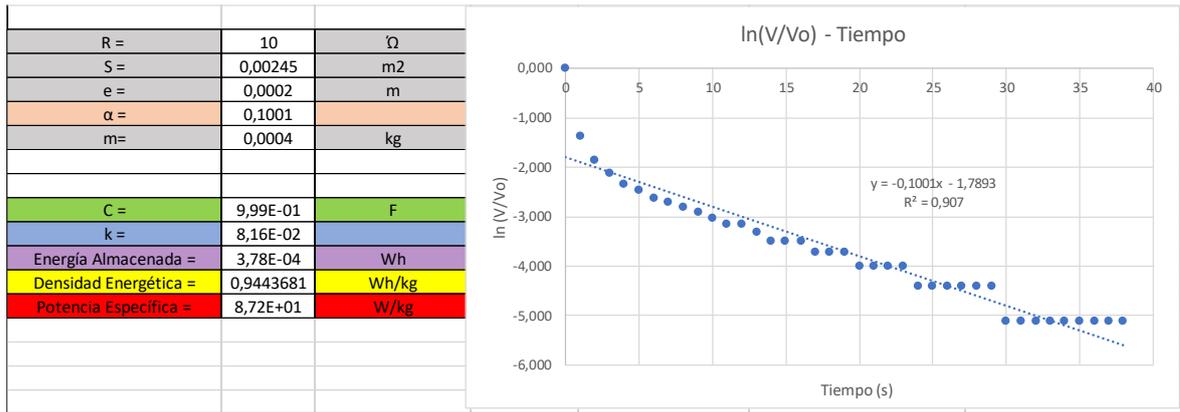


Figura A3- 4 Resultados obtenidos en la combinación n°2 - medición n°1

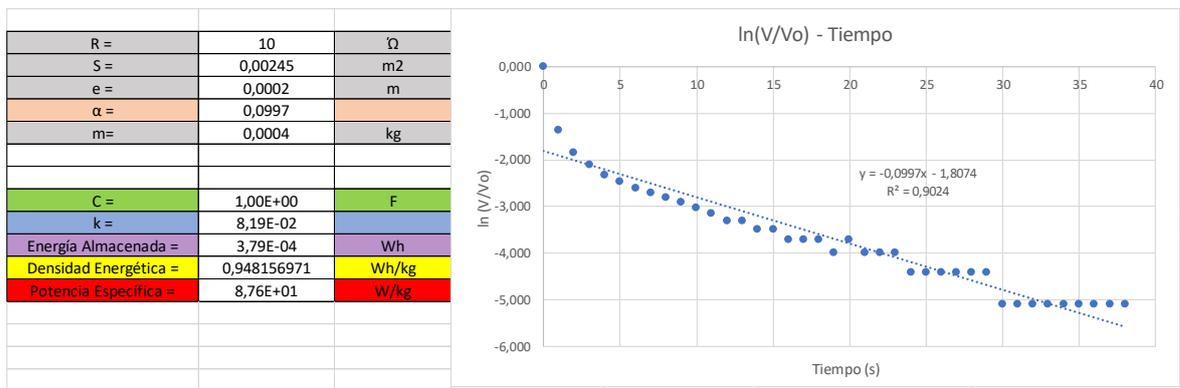


Figura A3- 5 Resultados obtenidos en la combinación n°2 - medición n°2

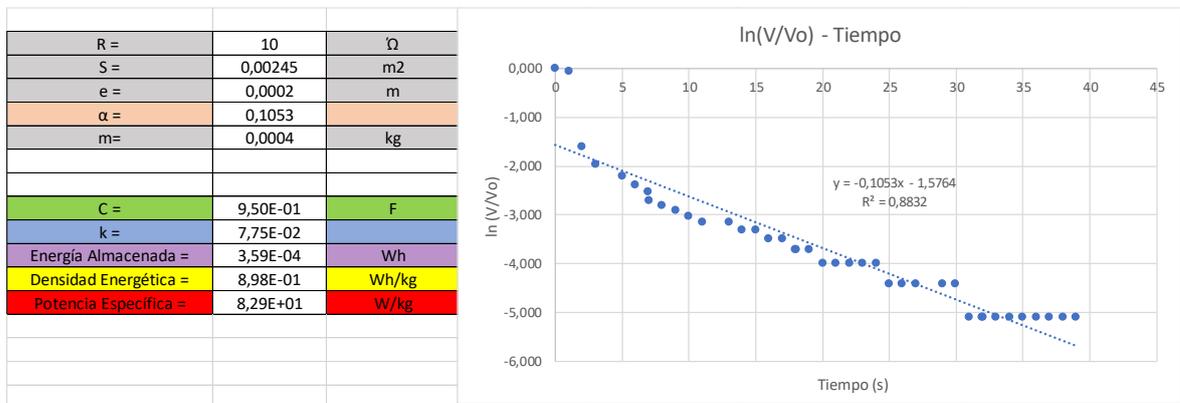


Figura A3- 6 Resultados obtenidos en la combinación n°2 - medición n°3

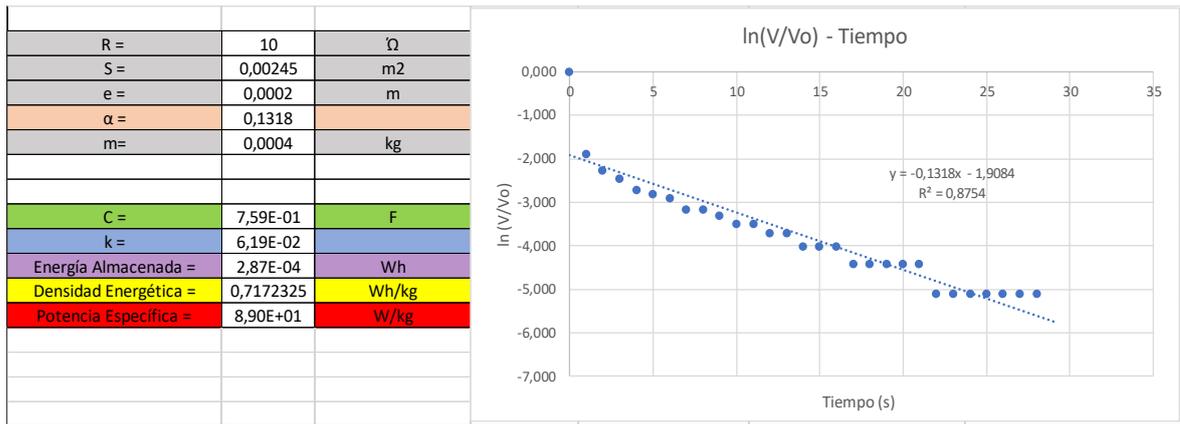


Figura A3- 7 Resultados obtenidos en la combinación n°3 - medición n°1

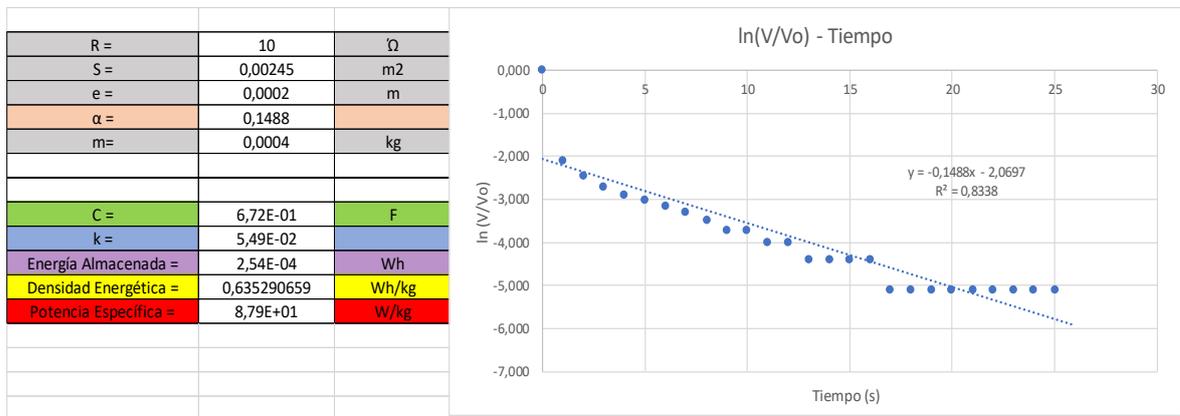


Figura A3- 8 Resultados obtenidos en la combinación n°3 - medición n°2

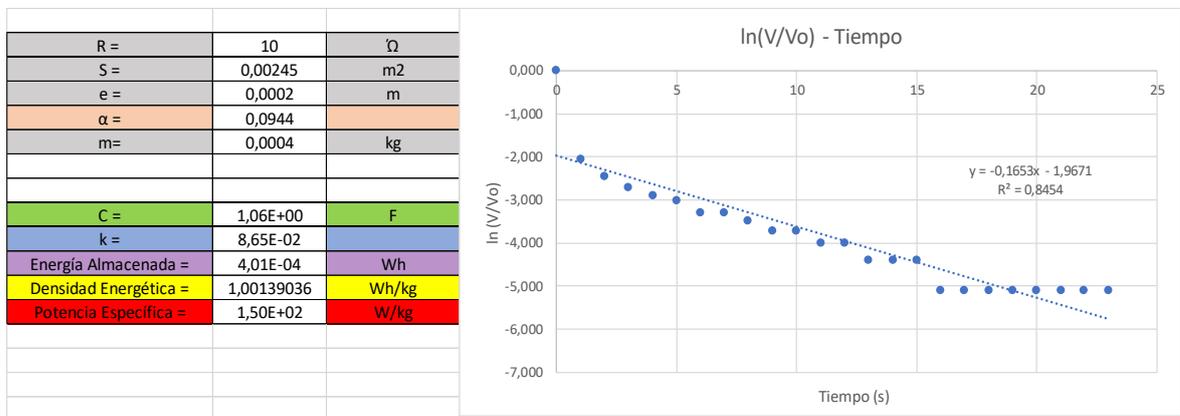


Figura A3- 9 Resultados obtenidos en la combinación n°3 - medición n°3

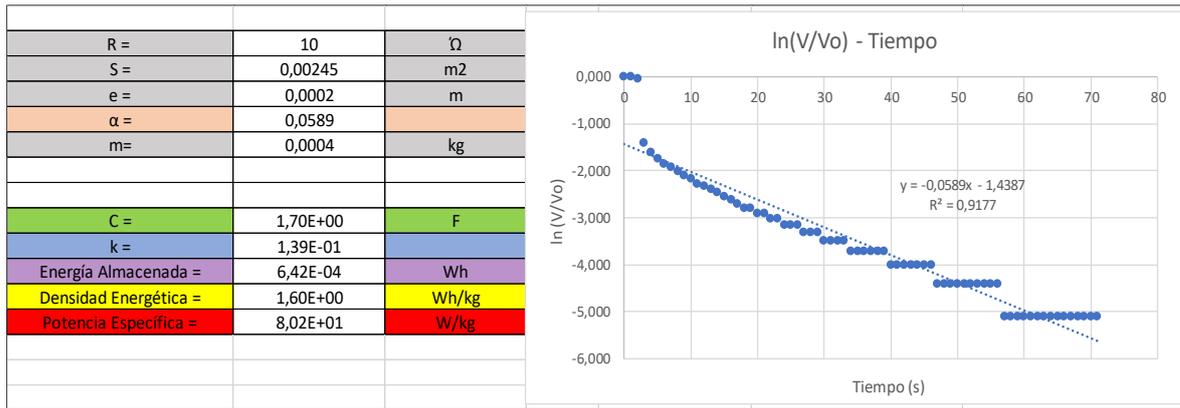


Figura A3- 10 Resultados obtenidos en la combinación n°4 - medición n°1

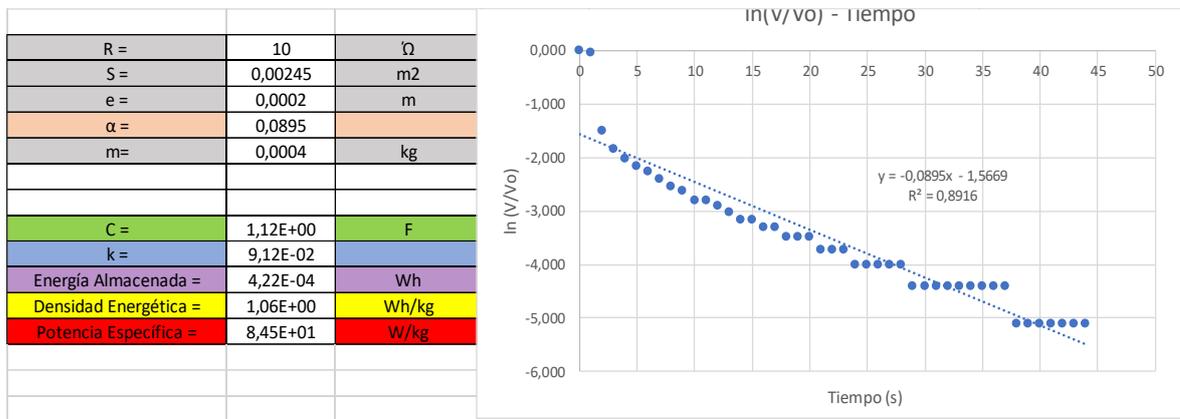


Figura A3- 11 Resultados obtenidos en la combinación n°4 - medición n°2

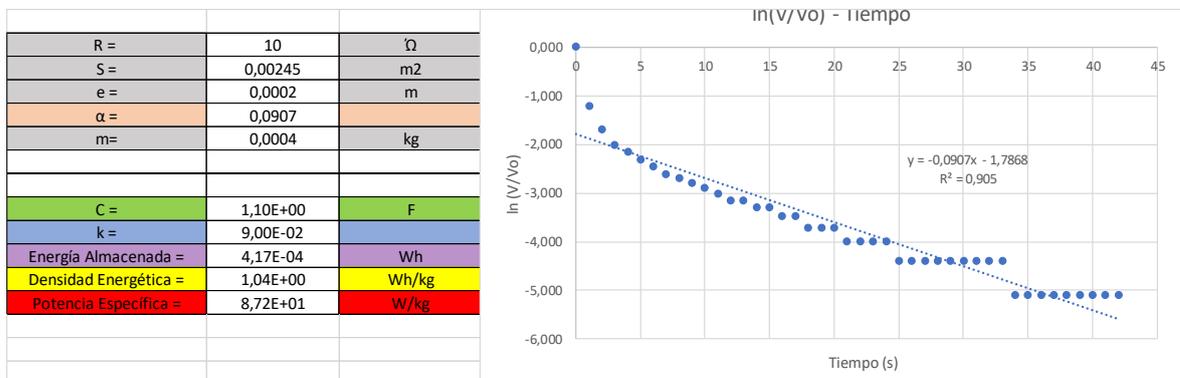


Figura A3- 12 Resultados obtenidos en la combinación n°4 - medición n°3

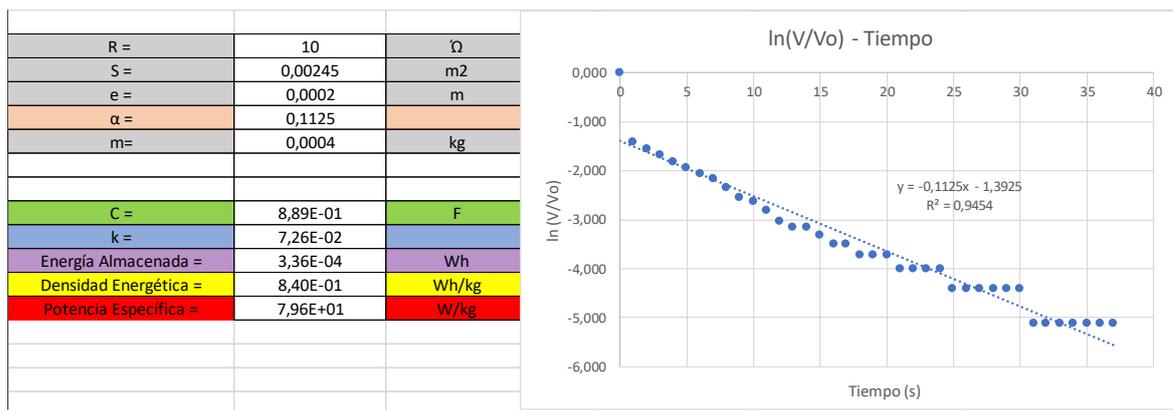


Figura A3- 13 Resultados obtenidos en la combinación n°5 - medición n°1

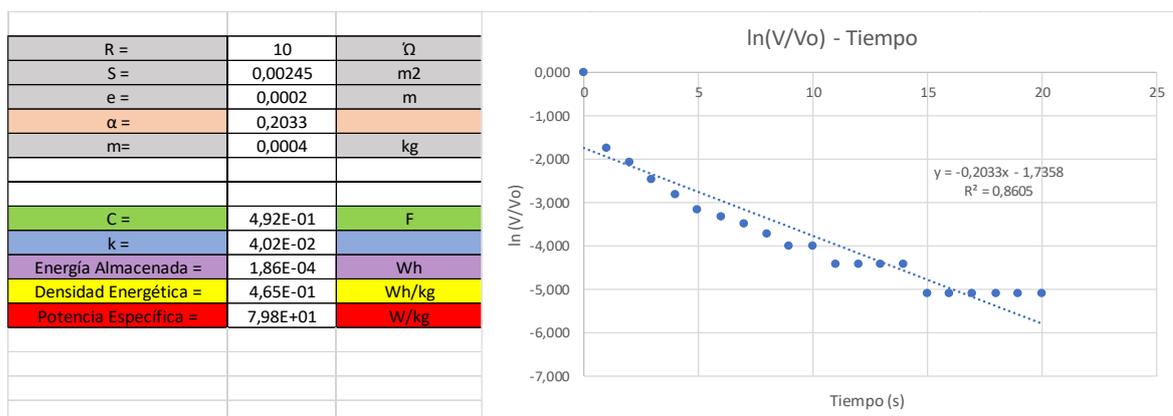


Figura A3- 14 Resultados obtenidos en la combinación n°5 - medición n°2

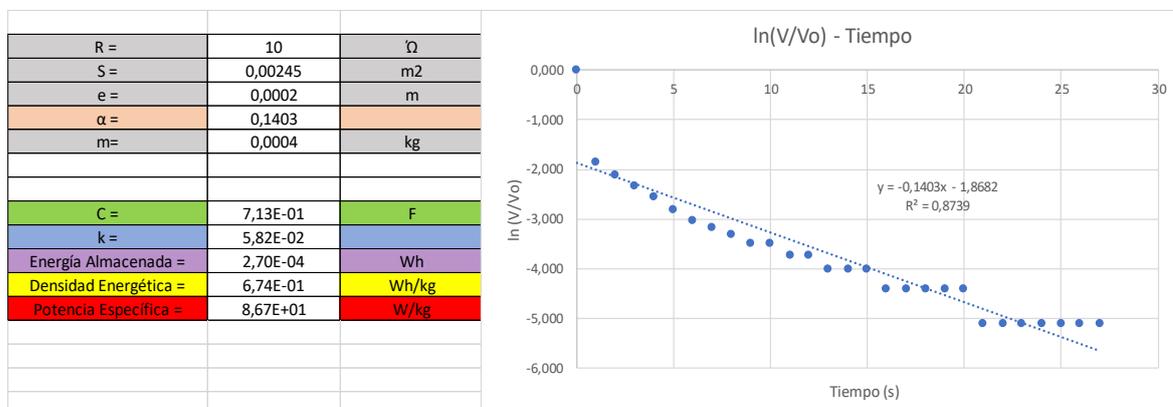


Figura A3- 15 Resultados obtenidos en la combinación n°5 - medición n°3

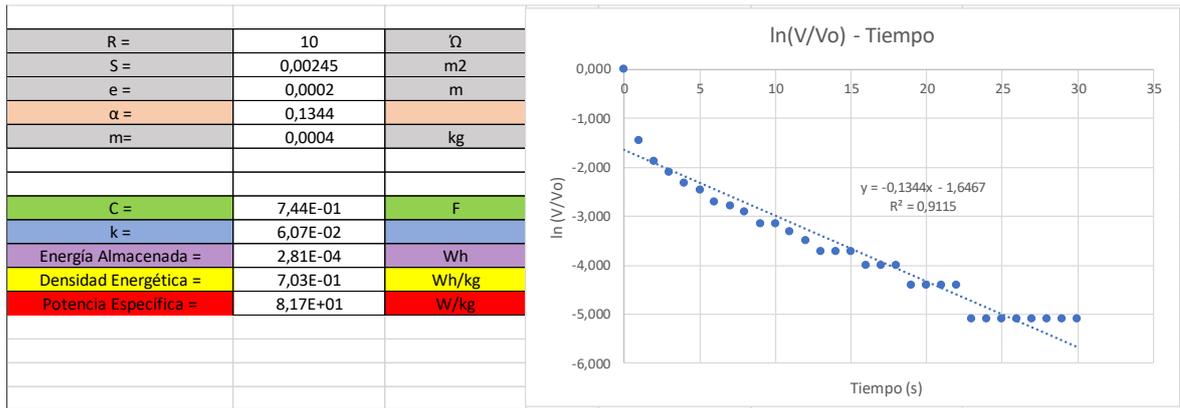


Figura A3- 16 Resultados obtenidos en la combinación n°6 - medición n°1

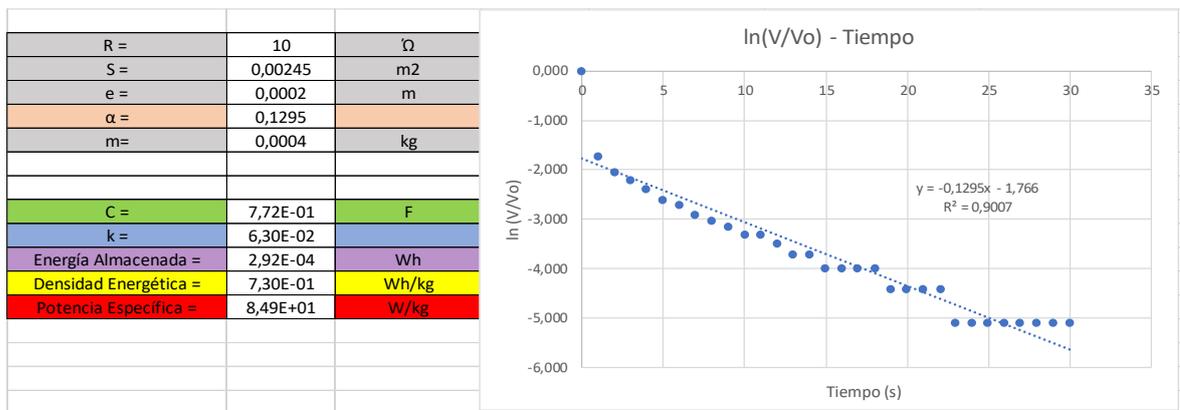


Figura A3- 17 Resultados obtenidos en la combinación n°6 - medición n°2

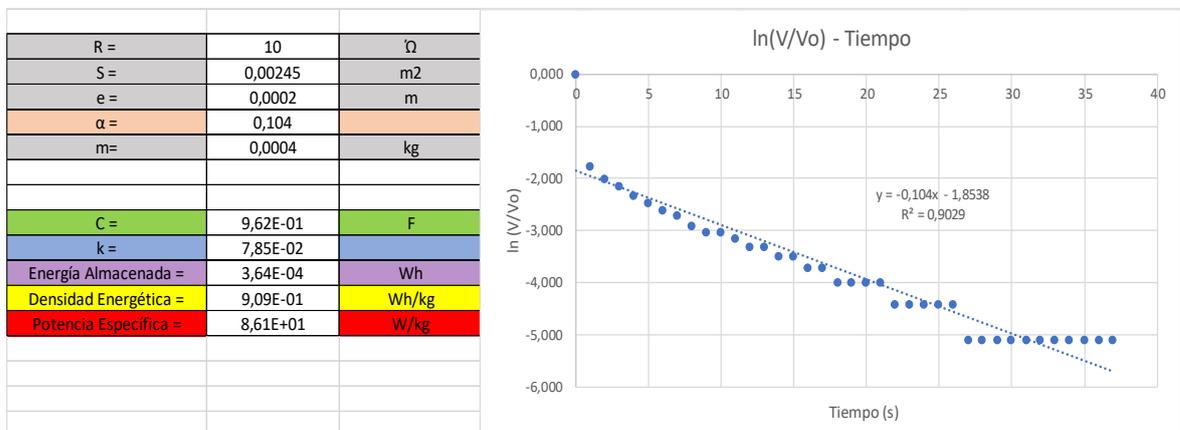


Figura A3- 18 Resultados obtenidos en la combinación n°6 - medición n°3

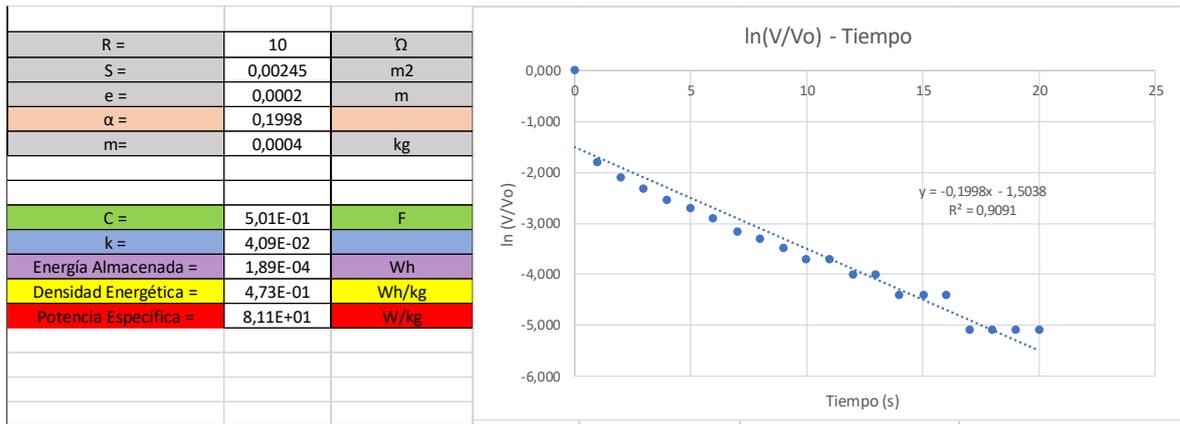


Figura A3- 19 Resultados obtenidos en la combinación n°7 - medición n°1

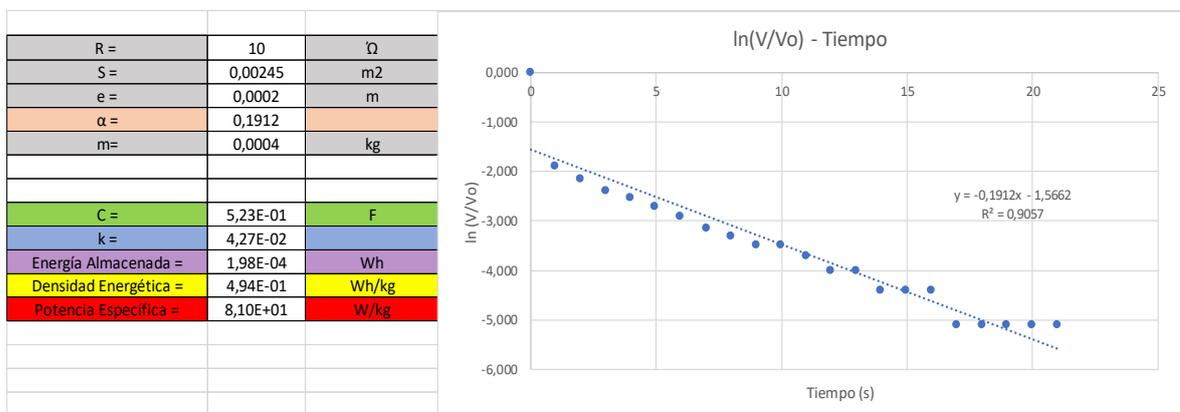


Figura A3- 20 Resultados obtenidos en la combinación n°7 - medición n°2

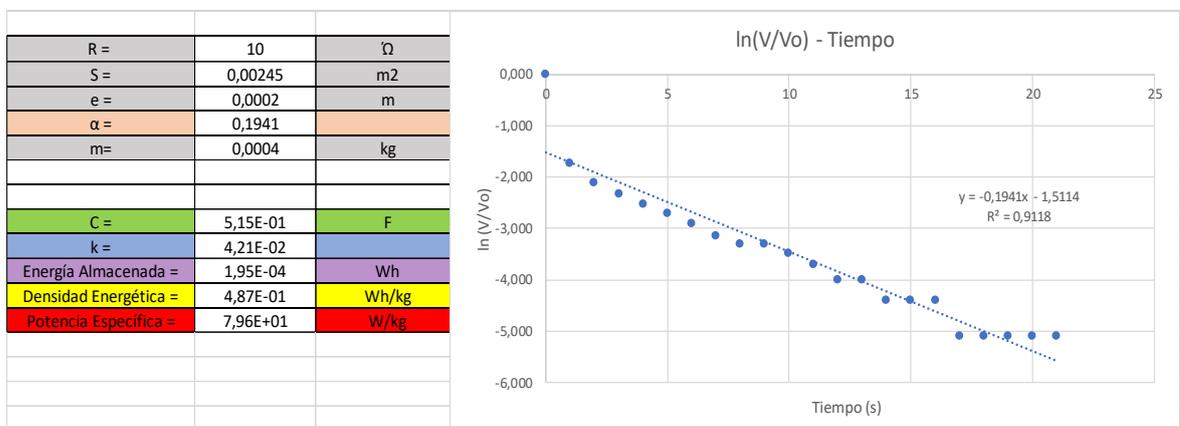


Figura A3- 21 Resultados obtenidos en la combinación n°7 - medición n°3

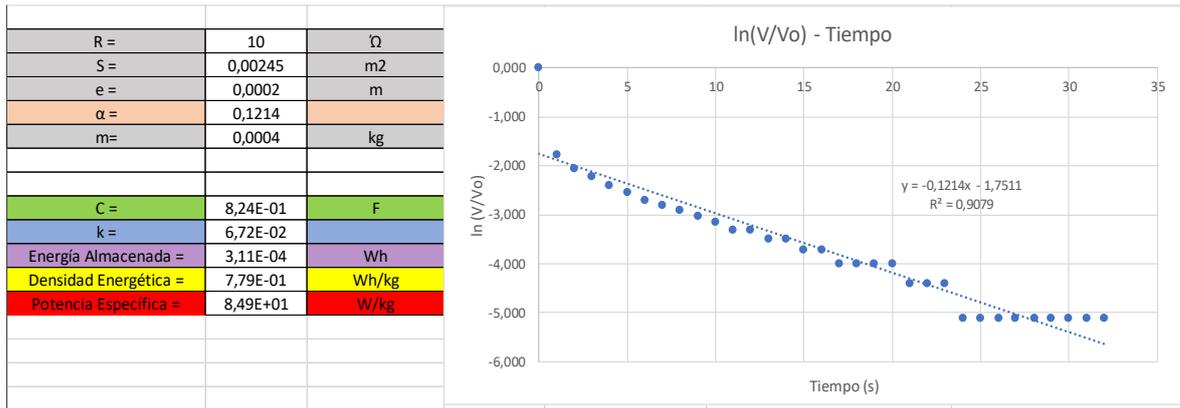


Figura A3- 22 Resultados obtenidos en la combinación n°8 - medición n°1

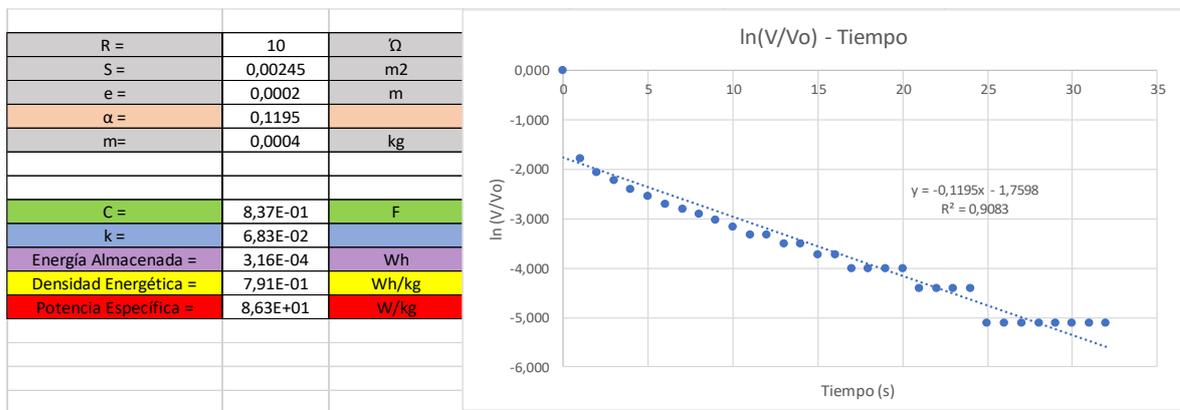


Figura A3- 23 Resultados obtenidos en la combinación n°8 - medición n°2

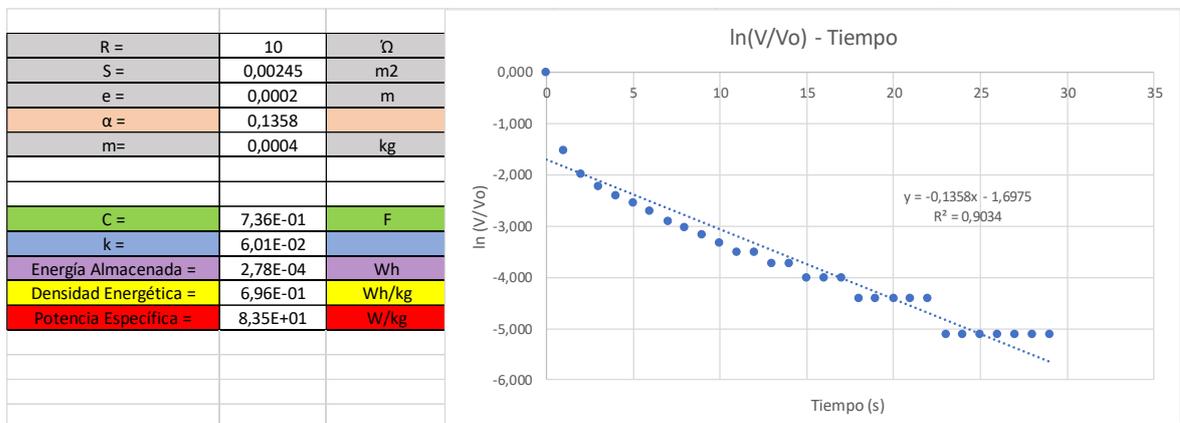


Figura A3- 24 Resultados obtenidos en la combinación n°8 - medición n°3

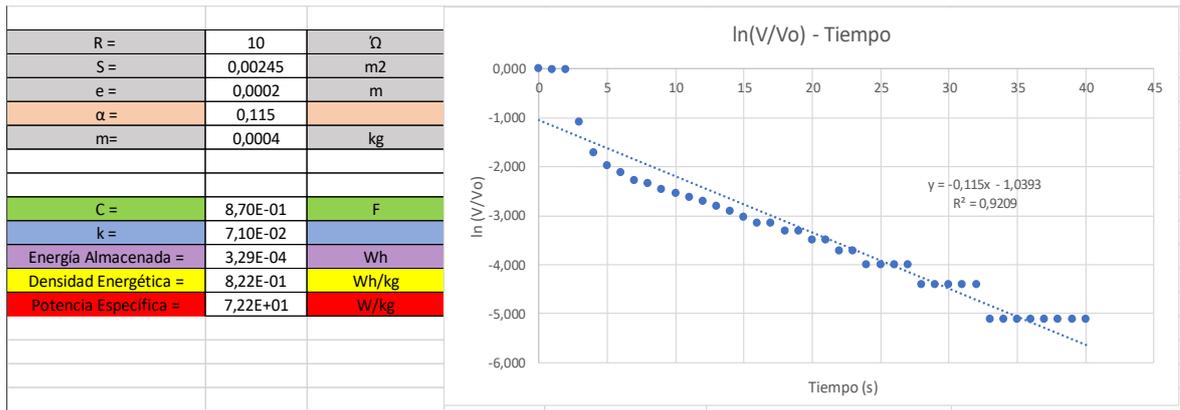


Figura A3- 25 Resultados obtenidos en la combinación n°9 - medición n°1

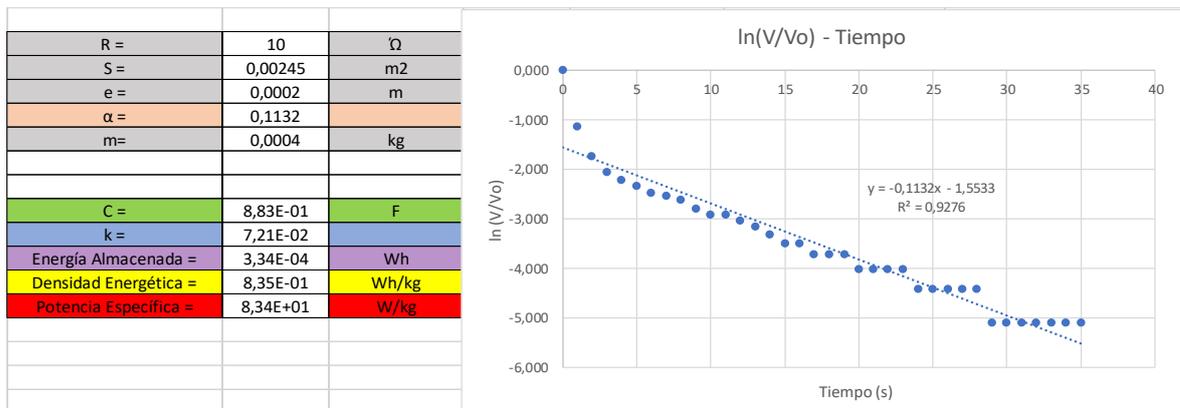


Figura A3- 26 Resultados obtenidos en la combinación n°9 - medición n°2

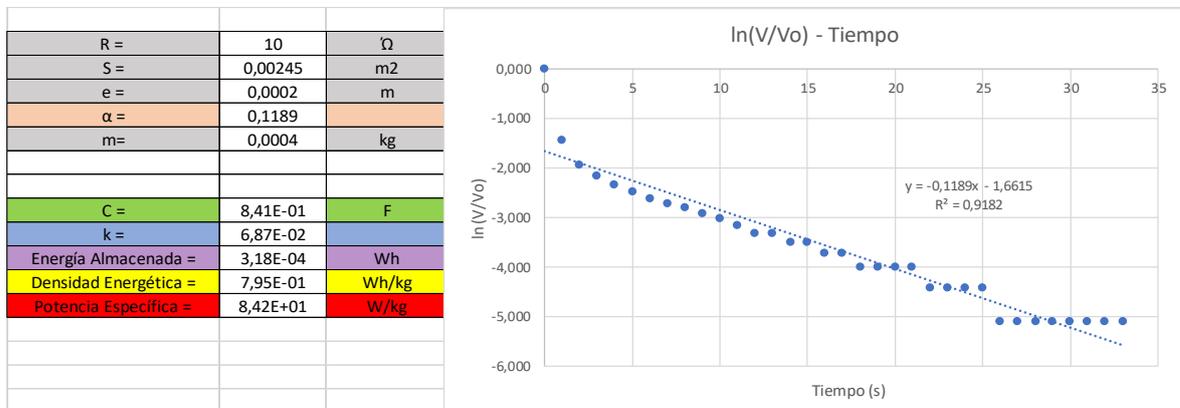


Figura A3- 27 Resultados obtenidos en la combinación n°9 - medición n°3

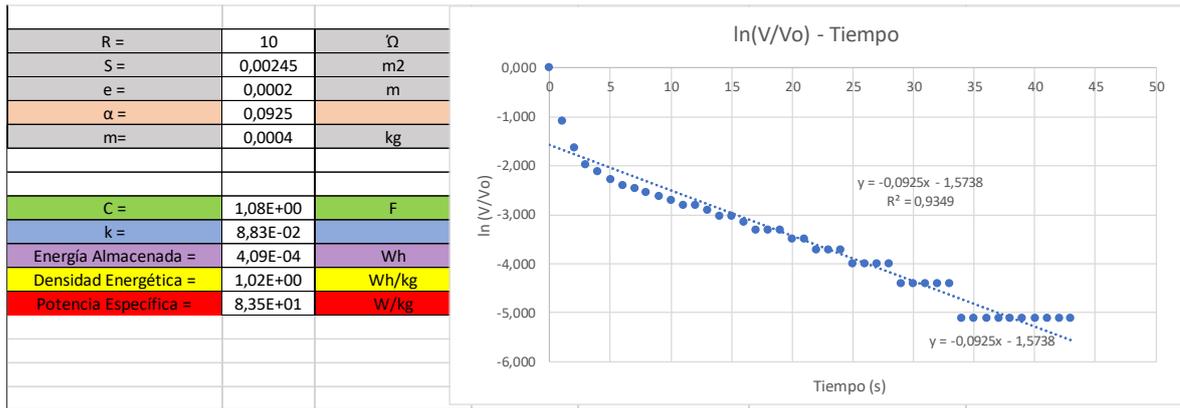


Figura A3- 28 Resultados obtenidos en la combinación n°10 - medición n°1

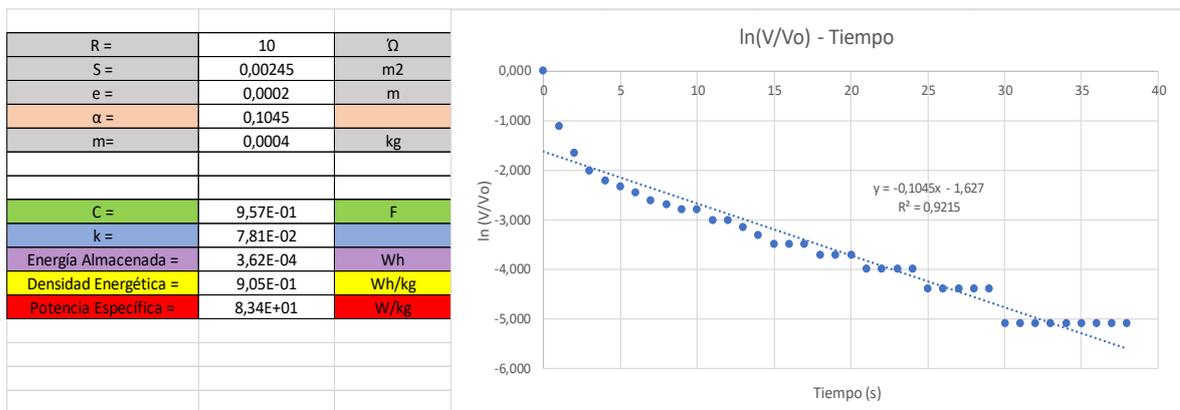


Figura A3- 29 Resultados obtenidos en la combinación n°10 - medición n°2

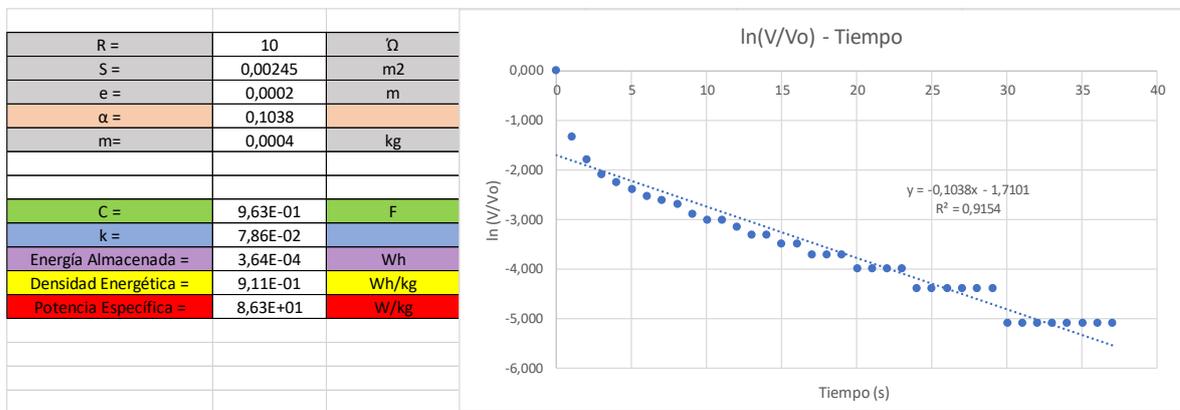


Figura A3- 30 Resultados obtenidos en la combinación n°10 - medición n°3

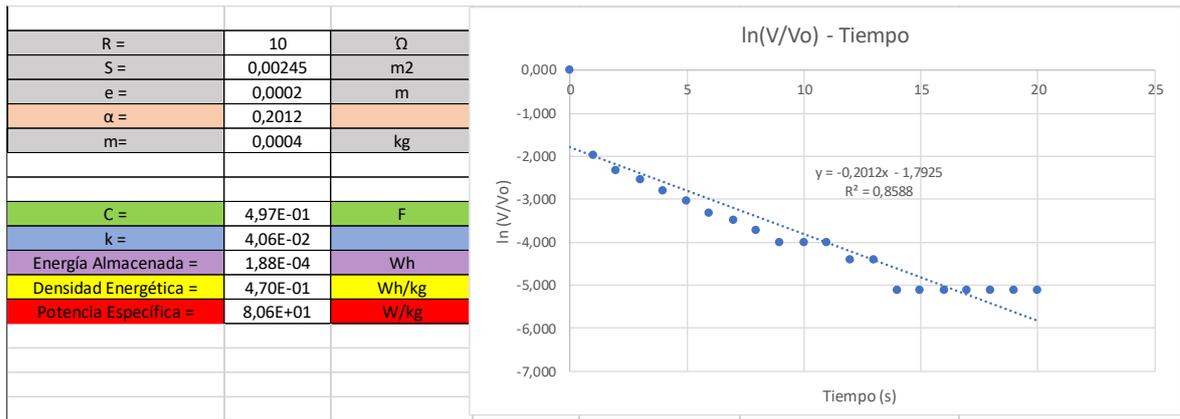


Figura A3- 31 Resultados obtenidos en la combinación n°11 - medición n°1

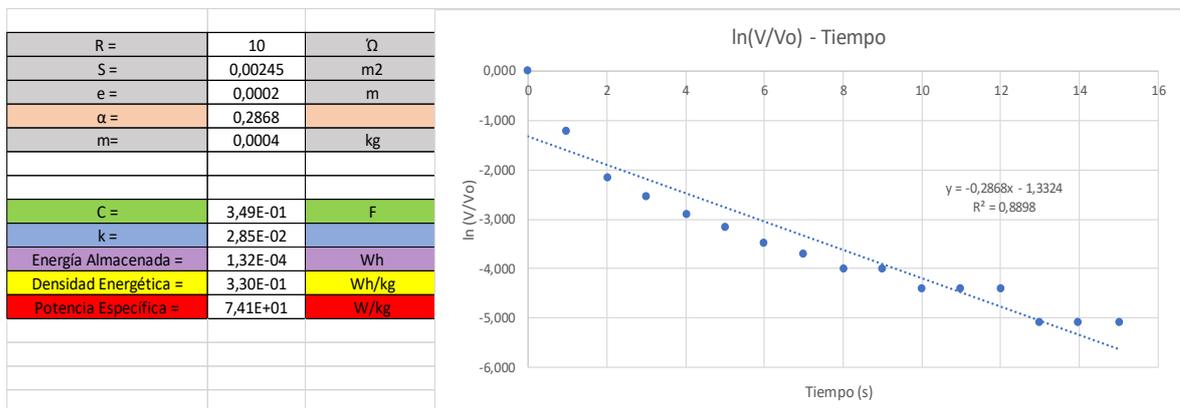


Figura A3- 32 Resultados obtenidos en la combinación n°11 - medición n°2

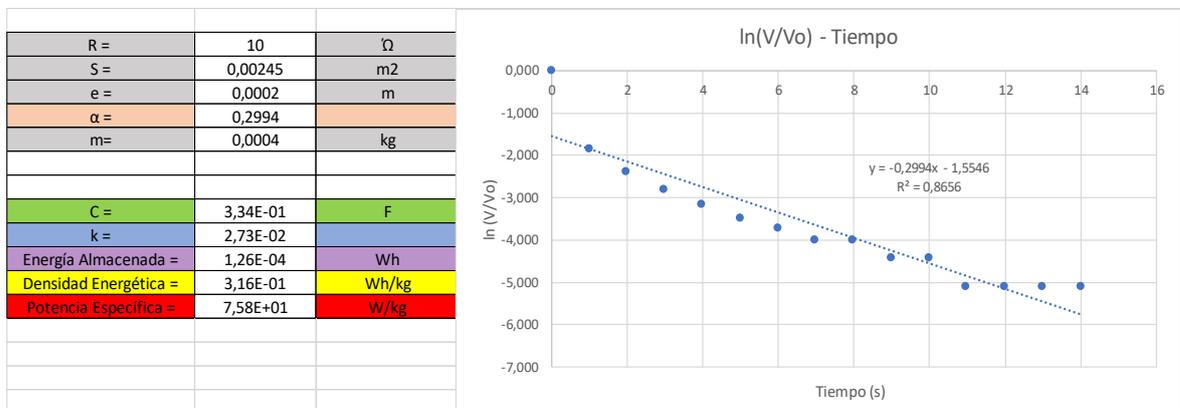


Figura A3- 33 Resultados obtenidos en la combinación n°11 - medición n°3

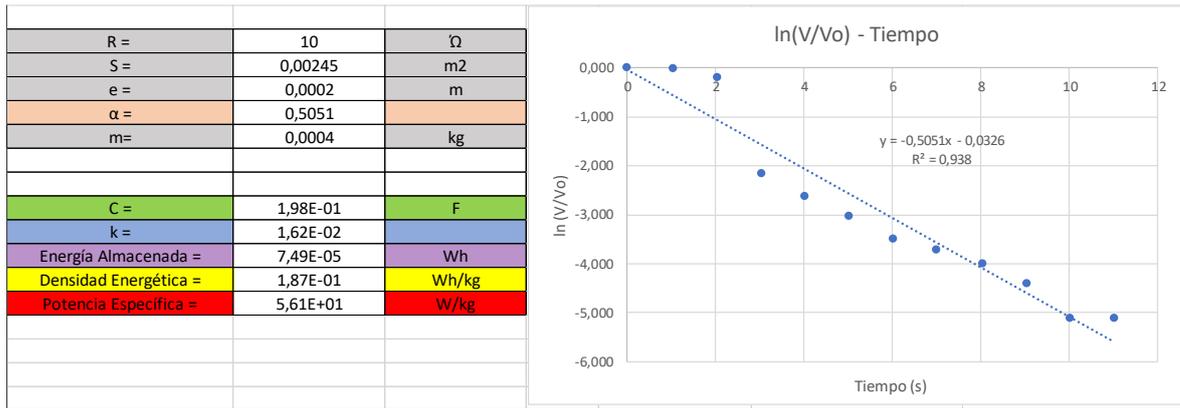


Figura A3- 34 Resultados obtenidos en la combinación n°12 - medición n°1

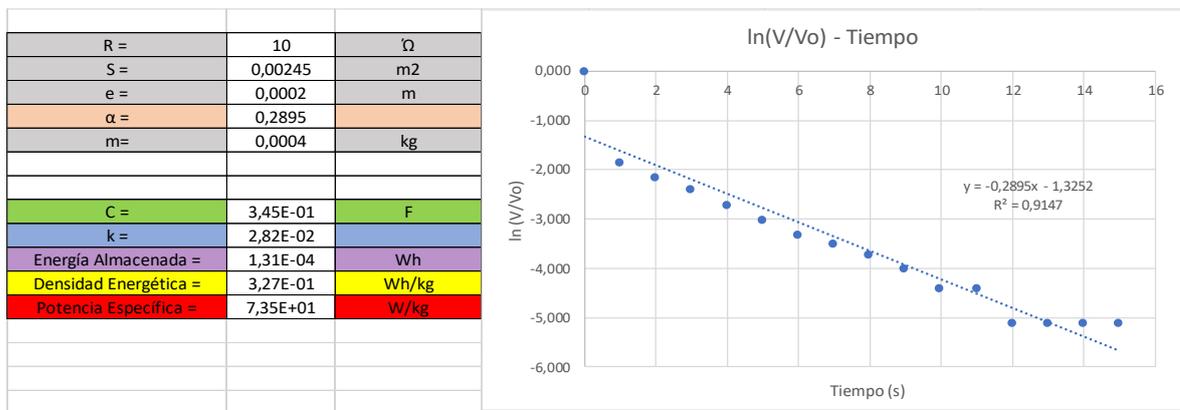


Figura A3- 35 Resultados obtenidos en la combinación n°12 - medición n°2

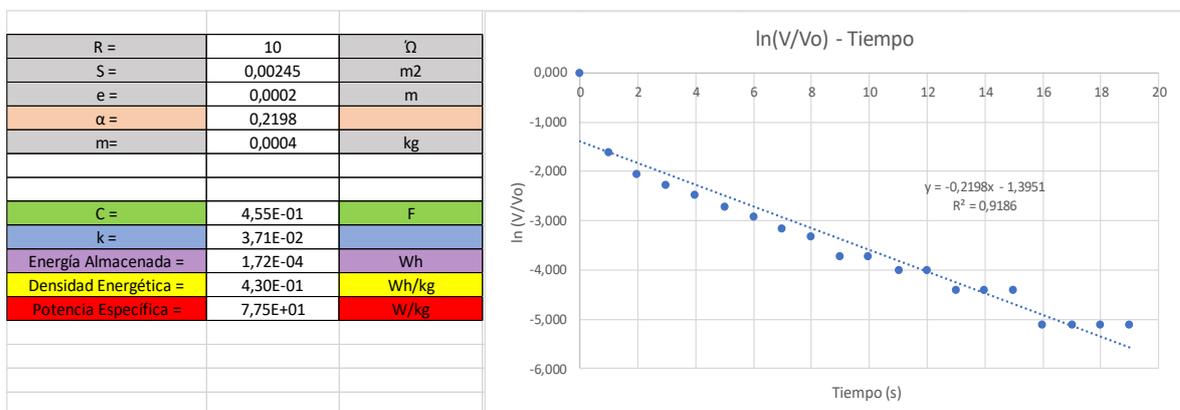


Figura A3- 36 Resultados obtenidos en la combinación n°12 - medición n°3

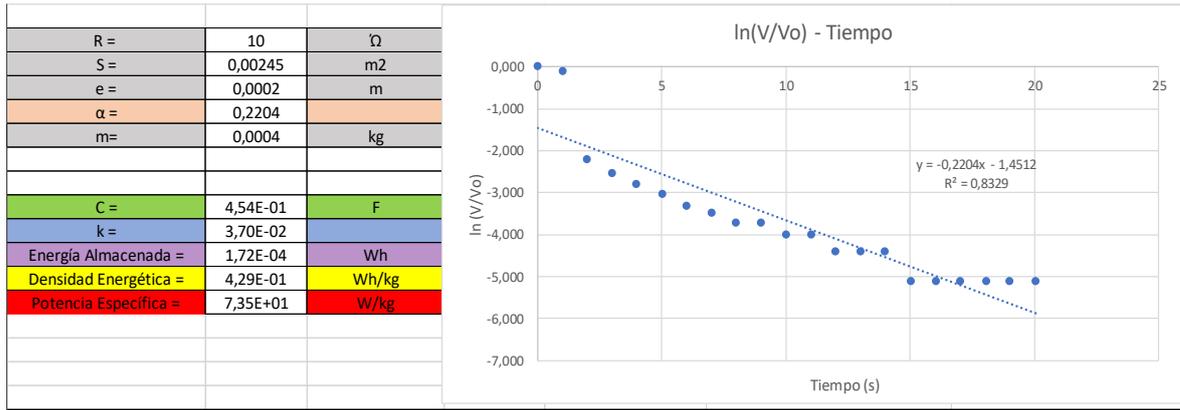


Figura A3- 37 Resultados obtenidos en la combinación n°13 - medición n°1

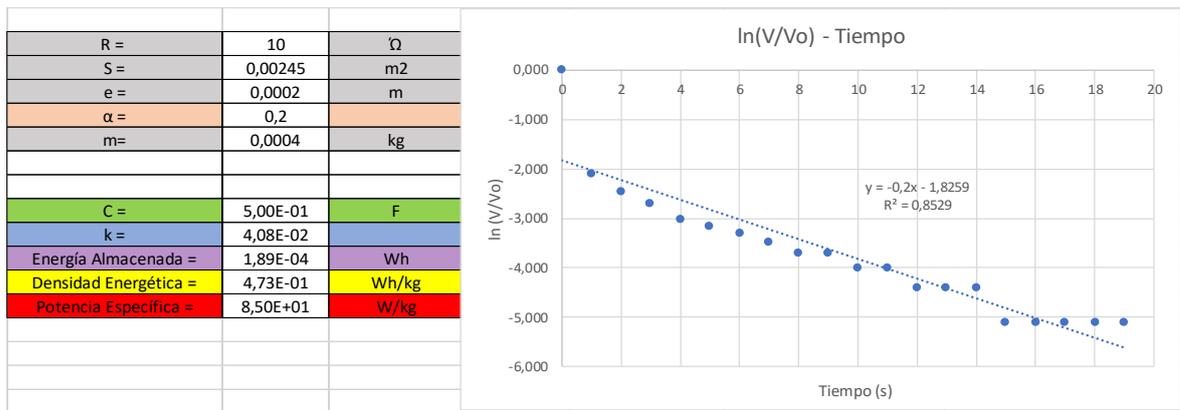


Figura A3- 38 Resultados obtenidos en la combinación n°13 - medición n°2

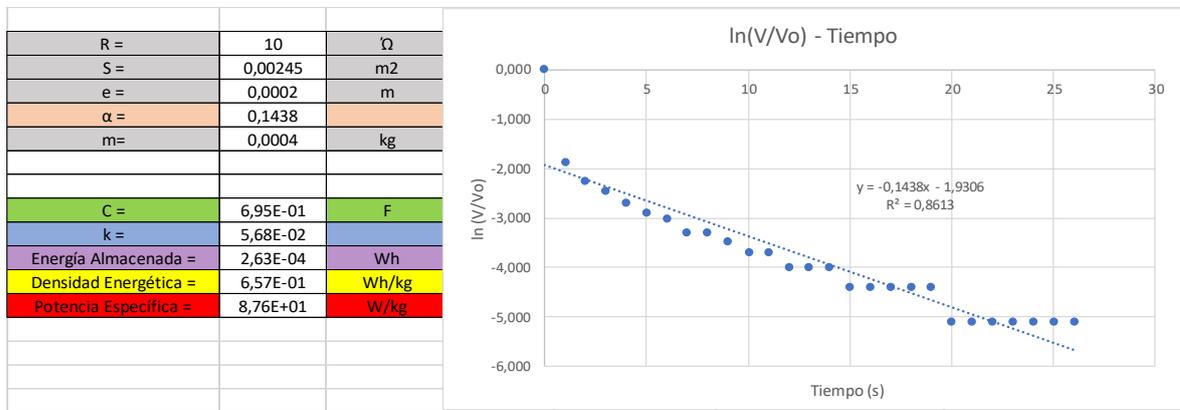


Figura A3- 39 Resultados obtenidos en la combinación n°13 - medición n°3

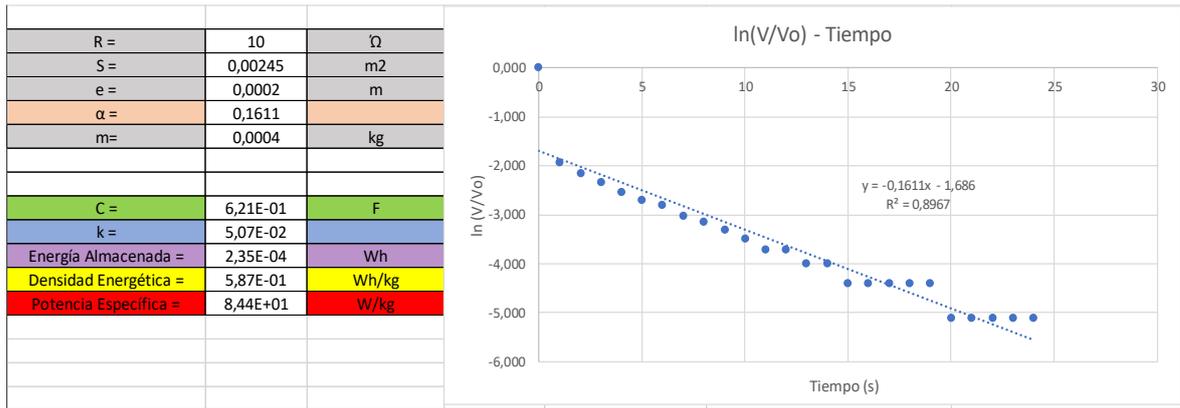


Figura A3- 40 Resultados obtenidos en la combinación n°14 - medición n°1

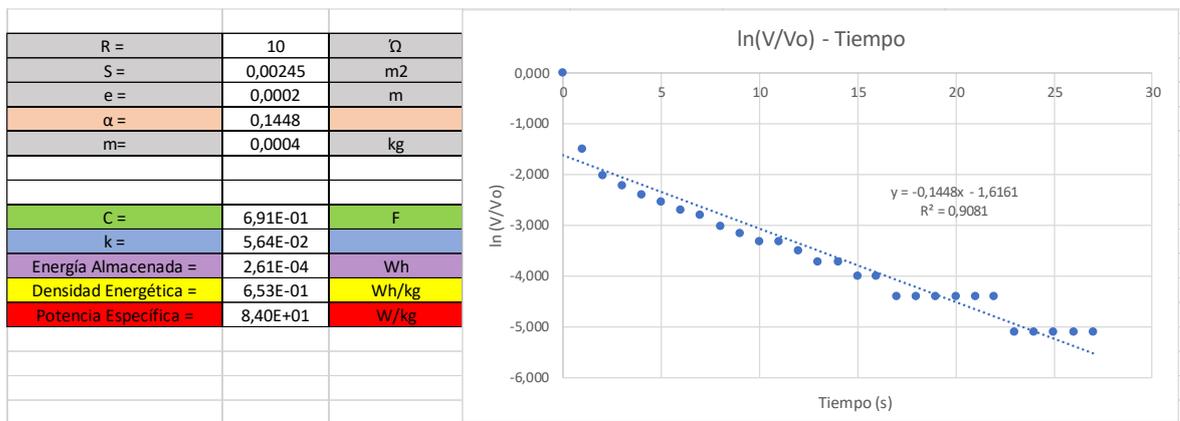


Figura A3- 41 Resultados obtenidos en la combinación n°14 - medición n°2

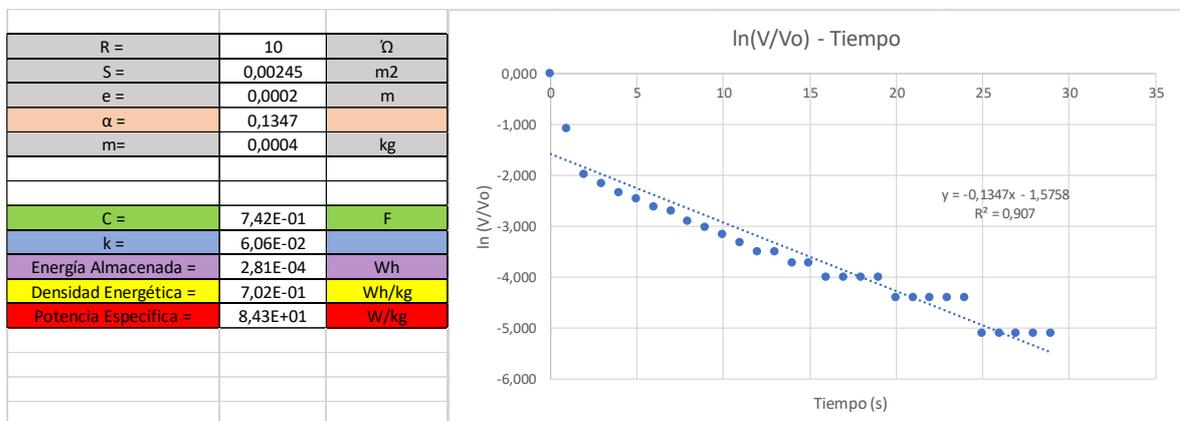


Figura A3- 42 Resultados obtenidos en la combinación n°14 - medición n°3

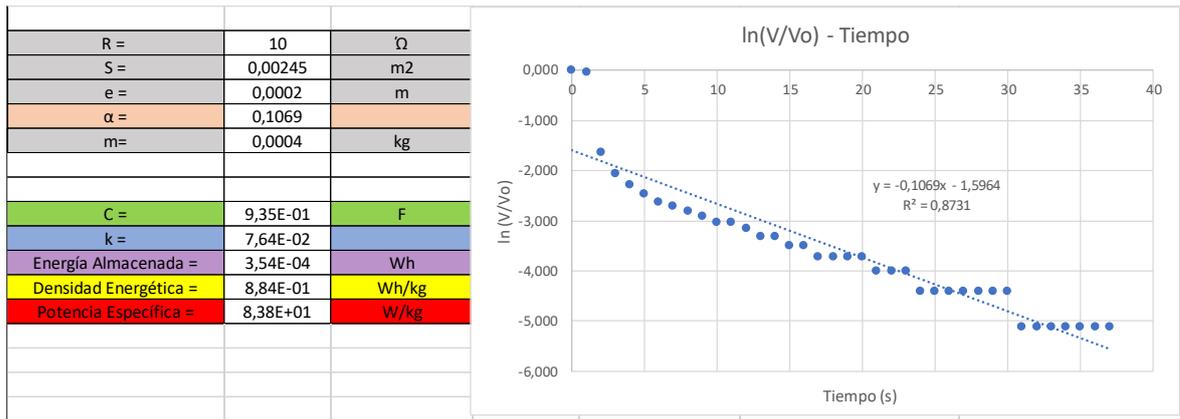


Figura A3- 43 Resultados obtenidos en la combinación n°15 - medición n°1

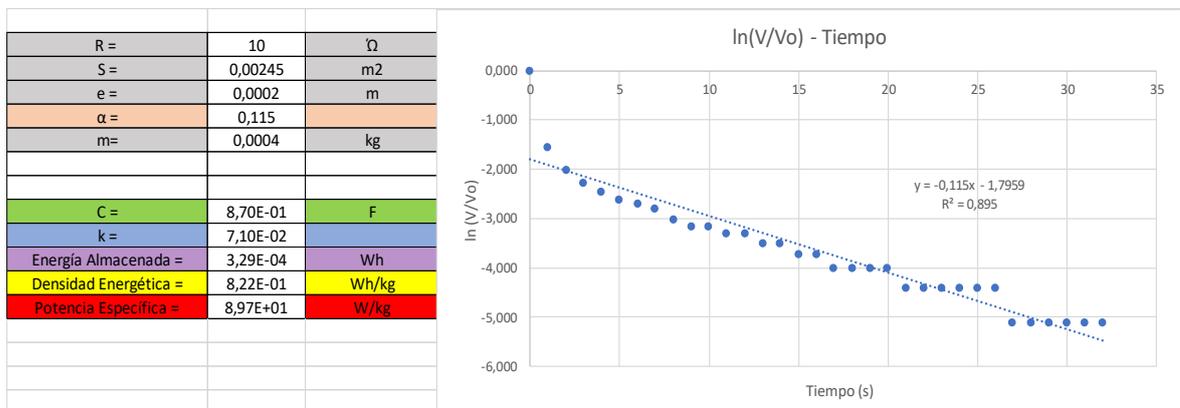


Figura A3- 44 Resultados obtenidos en la combinación n°15 - medición n°2

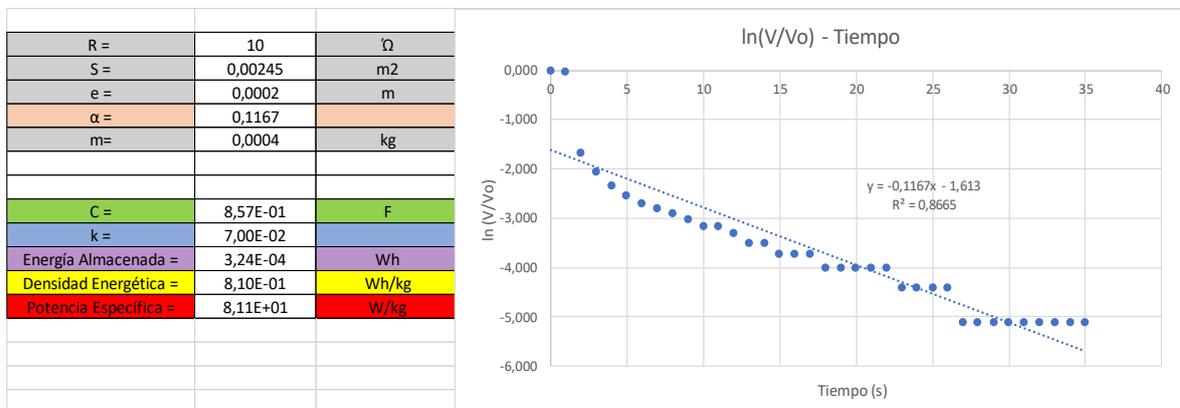


Figura A3- 45 Resultados obtenidos en la combinación n°15 - medición n°3

ANEXO IV: GRÁFICAS DE RESULTADOS DEL SUPERCAPACITOR NÚMERO 2

En este anexo se mostrarán los resultados de capacitancia, densidad energética y potencia específica media obtenidos para cada una de las 45 mediciones realizadas en el prototipo de supercapacitor n°2.

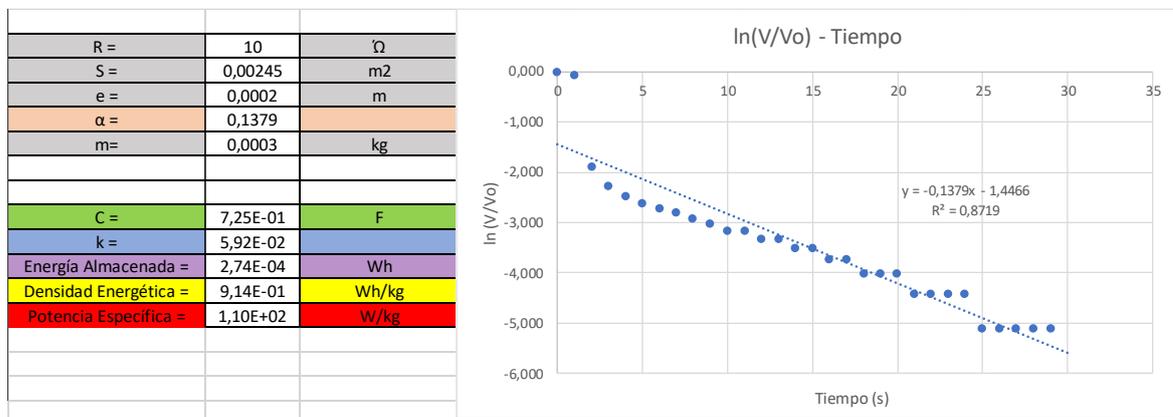


Figura A4- 1 Resultados obtenidos en la combinación n°1 - medición n°1

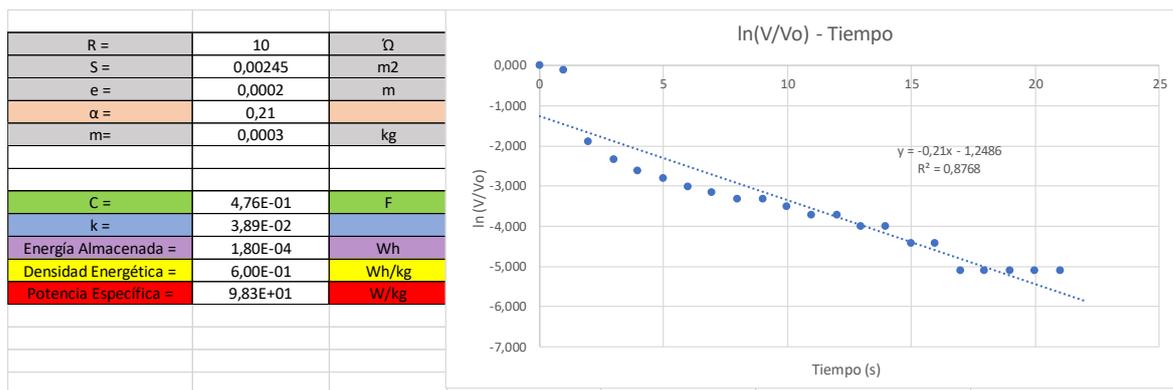


Figura A4- 2 Resultados obtenidos en la combinación n°1 - medición n°2

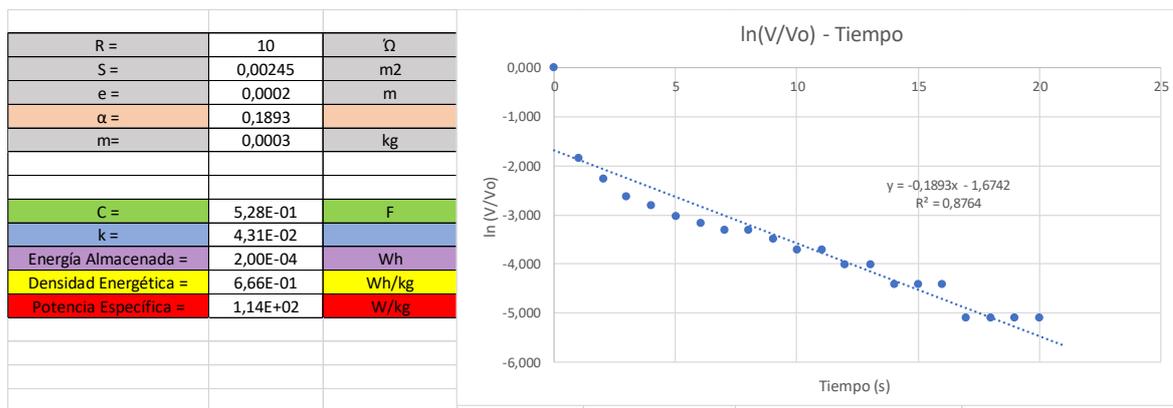


Figura A4- 3 Resultados obtenidos en la combinación n°1 - medición n°3

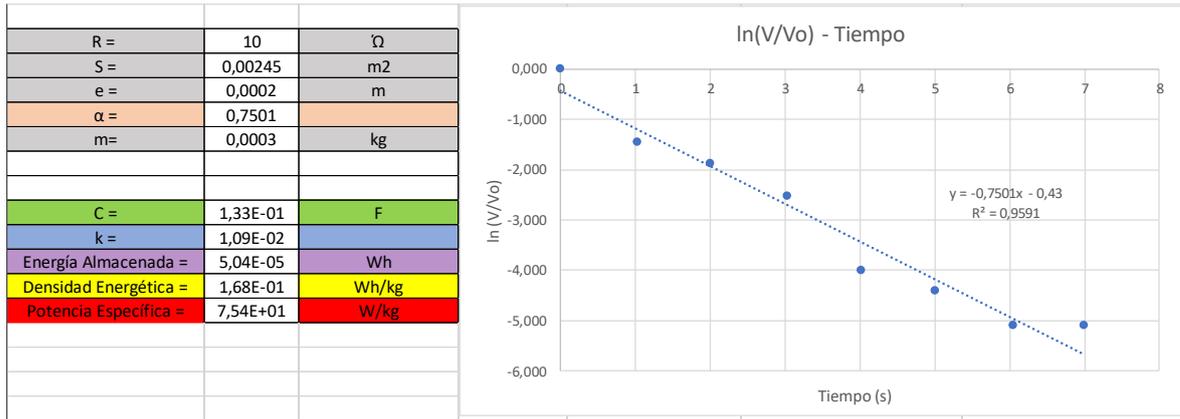


Figura A4- 4 Resultados obtenidos en la combinación n°2 - medición n°1

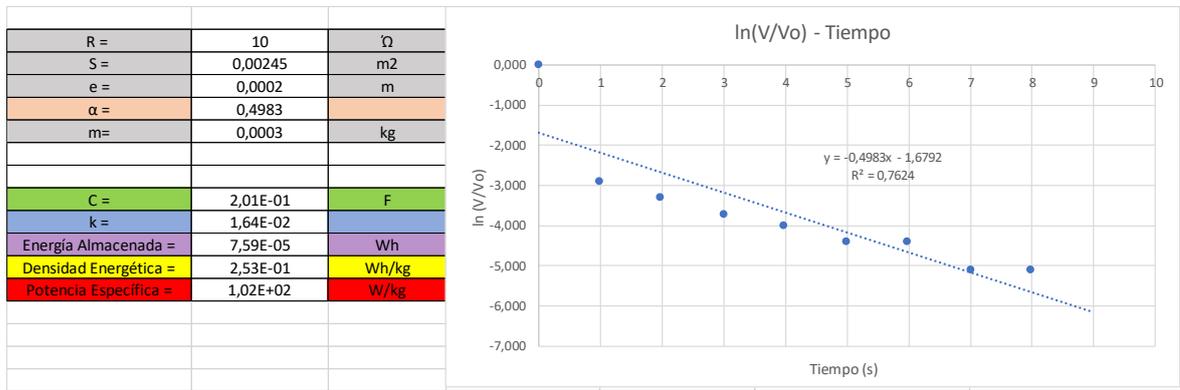


Figura A4- 5 Resultados obtenidos en la combinación n°2 - medición n°2

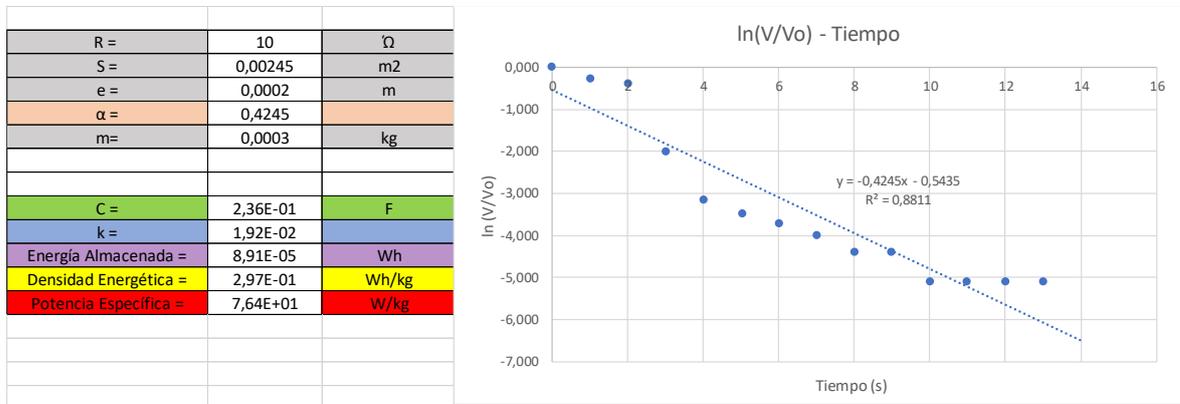


Figura A4- 6 Resultados obtenidos en la combinación n°2 - medición n°3

R =	10	Ω
S =	0,00245	m ²
e =	0,0002	m
α =	0,5026	
m =	0,0003	kg
C =	1,99E-01	F
k =	1,62E-02	
Energía Almacenada =	7,52E-05	Wh
Densidad Energética =	2,51E-01	Wh/kg
Potencia Específica =	8,21E+01	W/kg

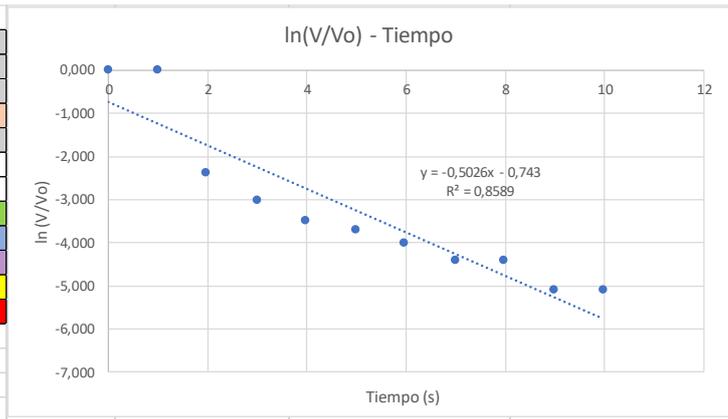


Figura A4- 7 Resultados obtenidos en la combinación n°3 - medición n°1

R =	10	Ω
S =	0,00245	m ²
e =	0,0002	m
α =	0,5922	
m =	0,0003	kg
C =	1,69E-01	F
k =	1,38E-02	
Energía Almacenada =	6,39E-05	Wh
Densidad Energética =	2,13E-01	Wh/kg
Potencia Específica =	7,67E+01	W/kg

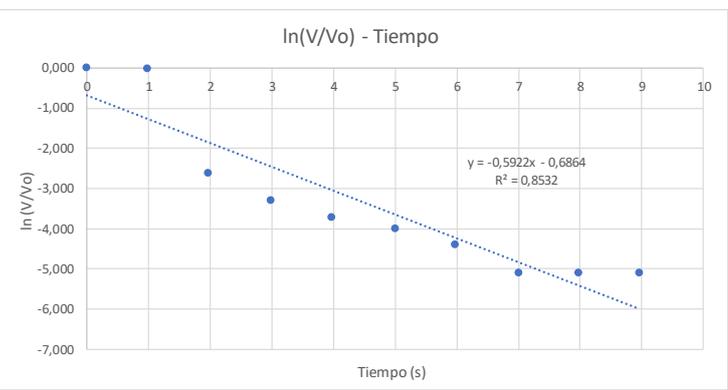


Figura A4- 8 Resultados obtenidos en la combinación n°3 - medición n°2

R =	10	Ω
S =	0,00245	m ²
e =	0,0002	m
α =	0,8018	
m =	0,0003	kg
C =	1,25E-01	F
k =	1,02E-02	
Energía Almacenada =	4,72E-05	Wh
Densidad Energética =	1,57E-01	Wh/kg
Potencia Específica =	7,09E+01	W/kg

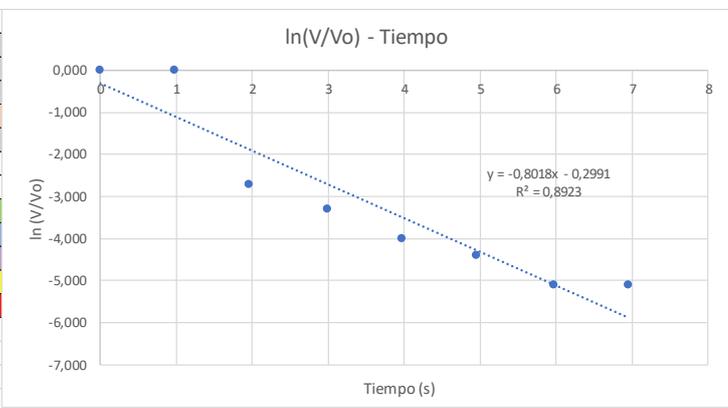


Figura A4- 9 Resultados obtenidos en la combinación n°3 - medición n°3

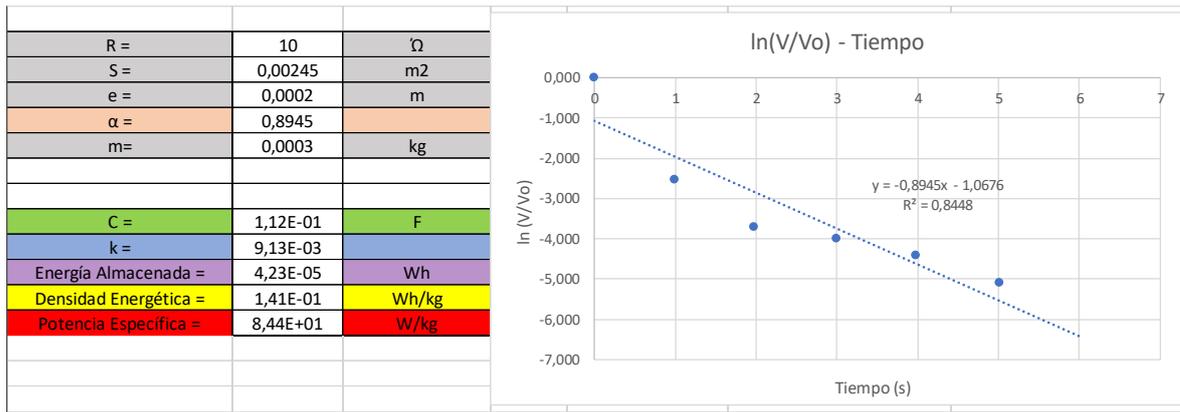


Figura A4- 10 Resultados obtenidos en la combinación n°4 - medición n°1

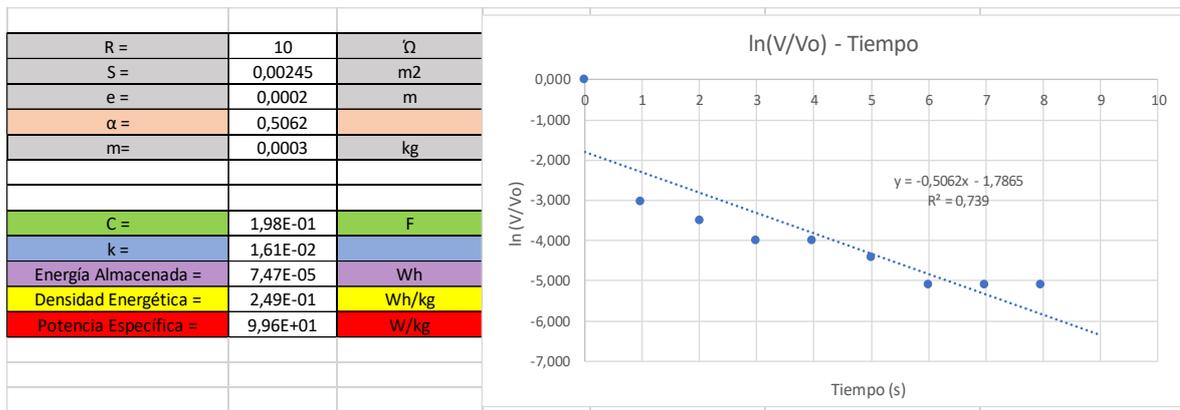


Figura A4- 11 Resultados obtenidos en la combinación n°4 - medición n°2

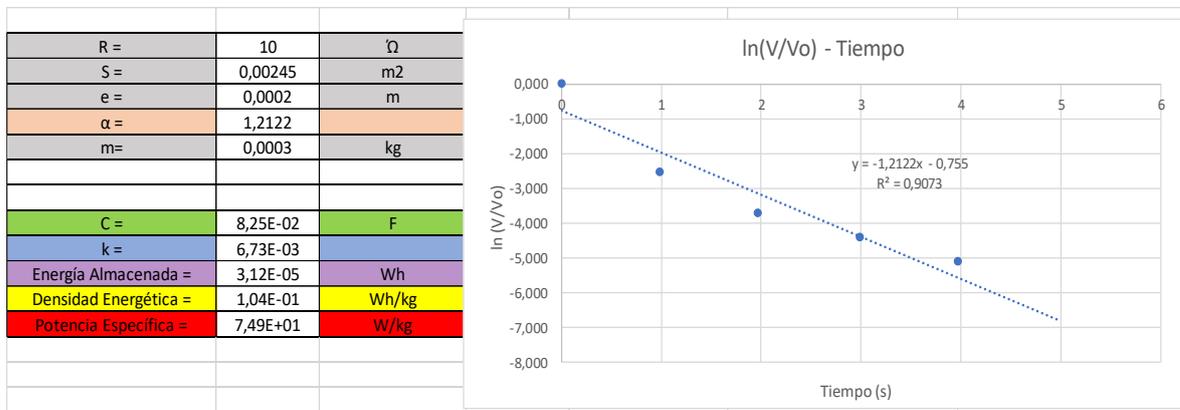


Figura A4- 12 Resultados obtenidos en la combinación n°4 - medición n°3

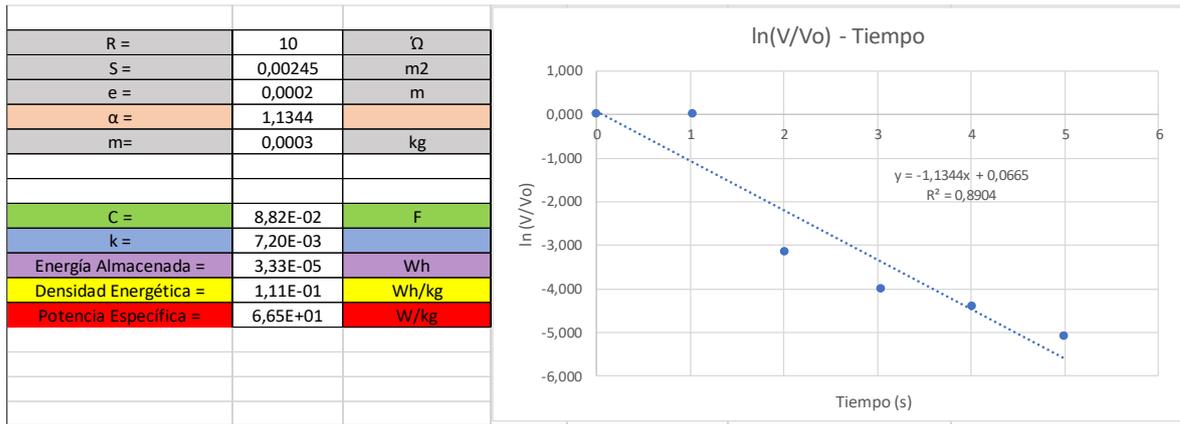


Figura A4- 13 Resultados obtenidos en la combinación n°5 - medición n°1

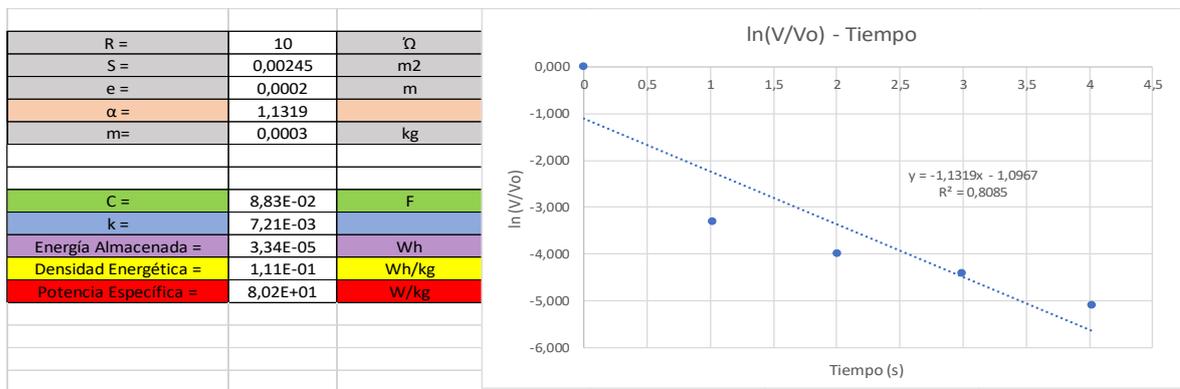


Figura A4- 14 Resultados obtenidos en la combinación n°5 - medición n°2

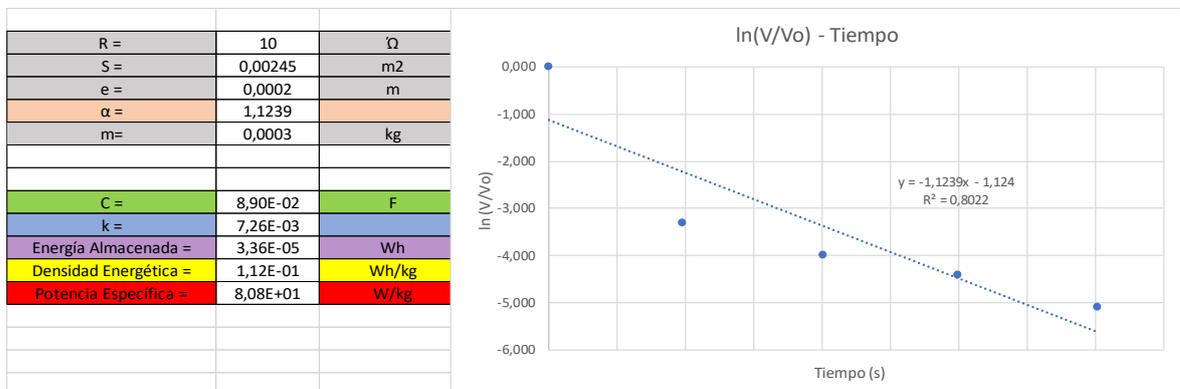


Figura A4- 15 Resultados obtenidos en la combinación n°5 - medición n°3

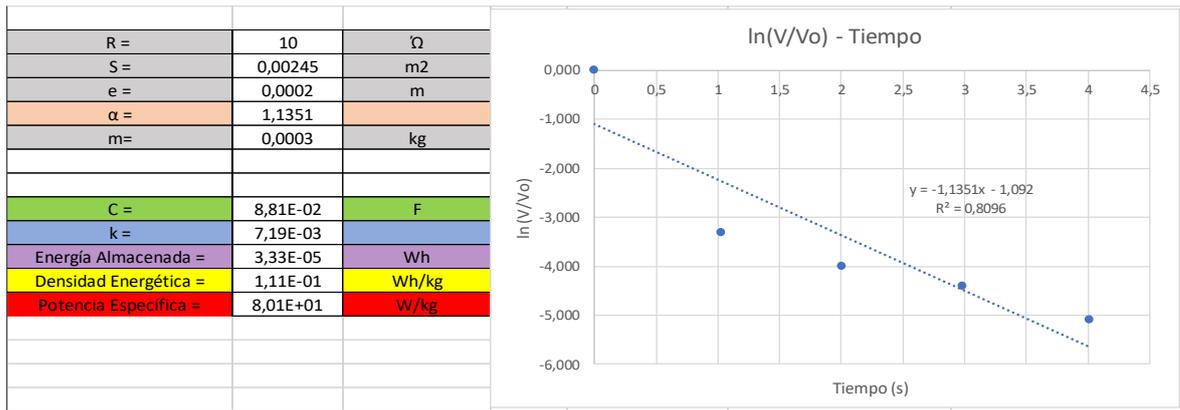


Figura A4- 16 Resultados obtenidos en la combinación n°6 - medición n°1

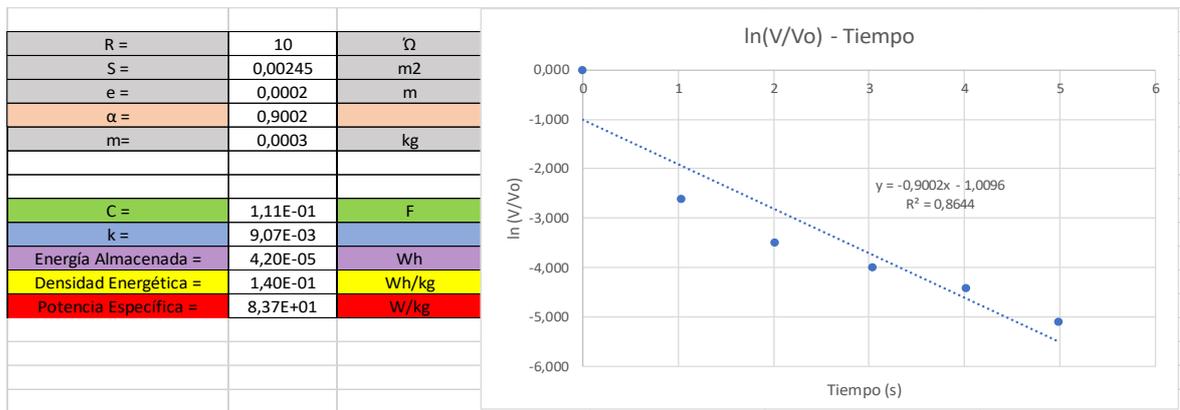


Figura A4- 17 Resultados obtenidos en la combinación n°6 - medición n°2

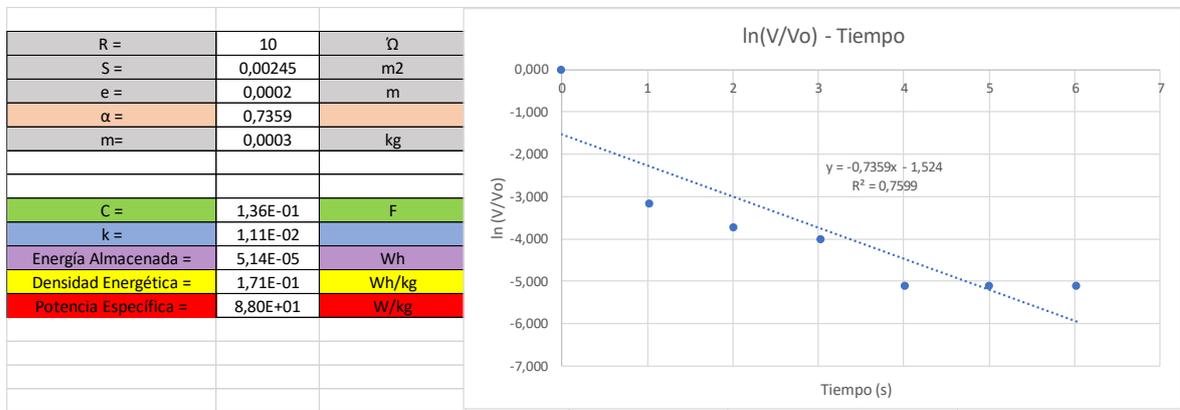


Figura A4- 18 Resultados obtenidos en la combinación n°6 - medición n°3

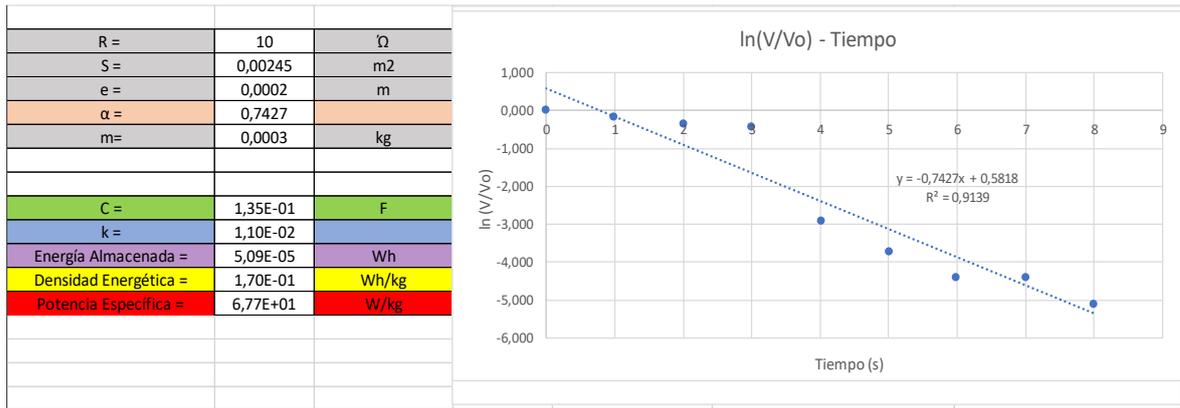


Figura A4- 19 Resultados obtenidos en la combinación n°7 - medición n°1

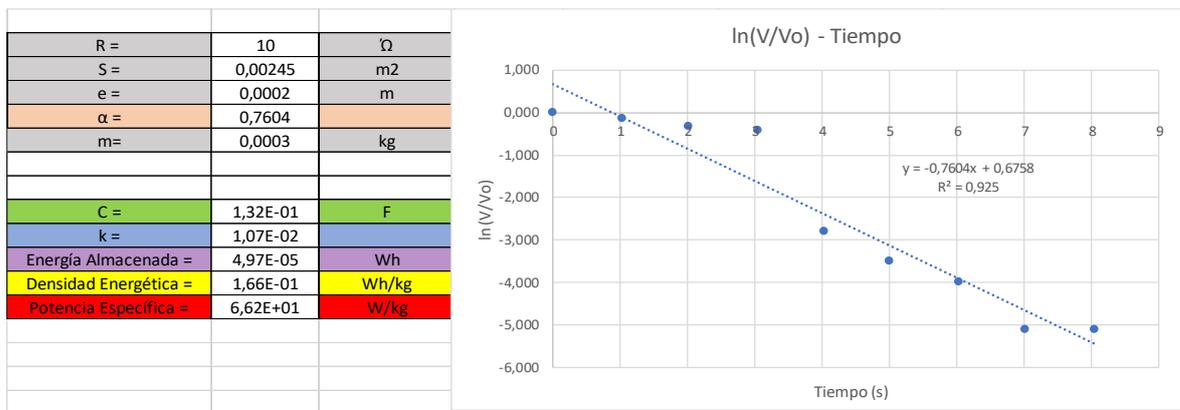


Figura A4- 20 Resultados obtenidos en la combinación n°7 - medición n°2

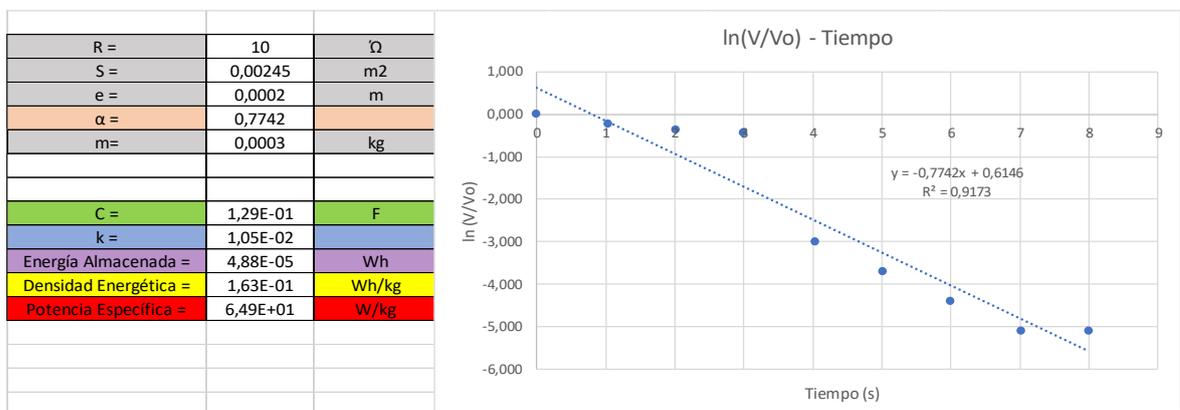


Figura A4- 21 Resultados obtenidos en la combinación n°7 - medición n°3

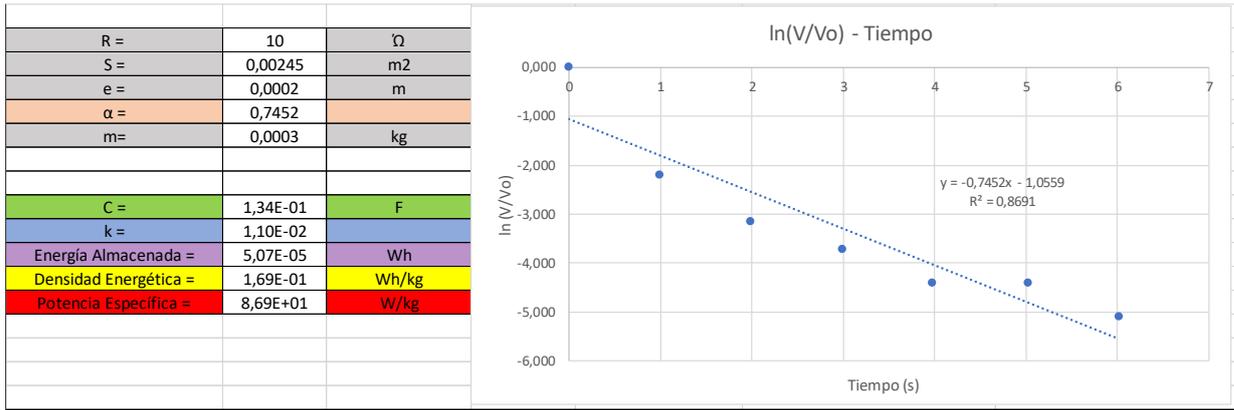


Figura A4- 22 Resultados obtenidos en la combinación n°8 - medición n°1

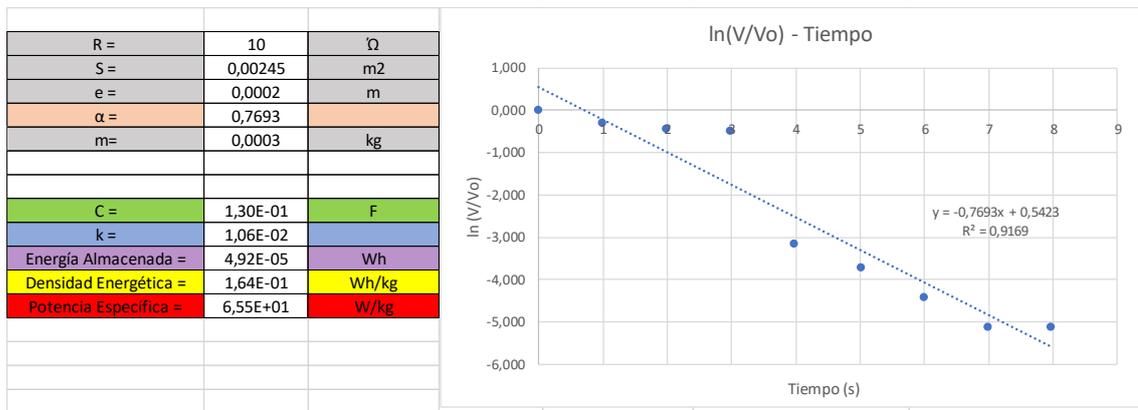


Figura A4- 23 Resultados obtenidos en la combinación n°8 - medición n°2

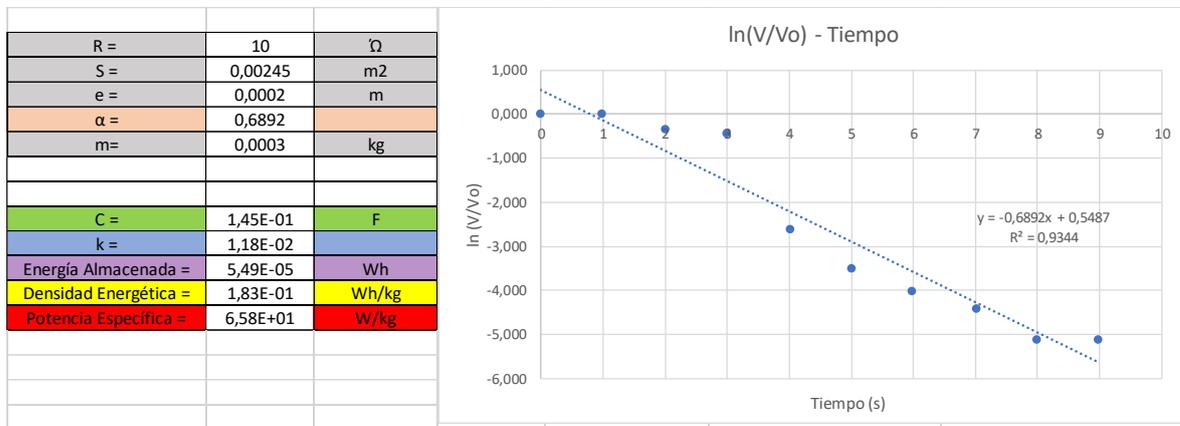


Figura A4- 24 Resultados obtenidos en la combinación n°8 - medición n°3

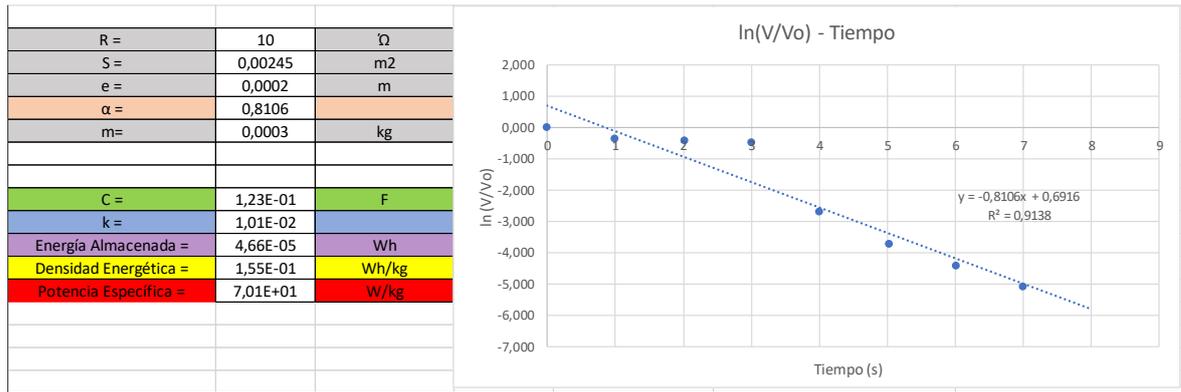


Figura A4- 25 Resultados obtenidos en la combinación n°9 - medición n°1

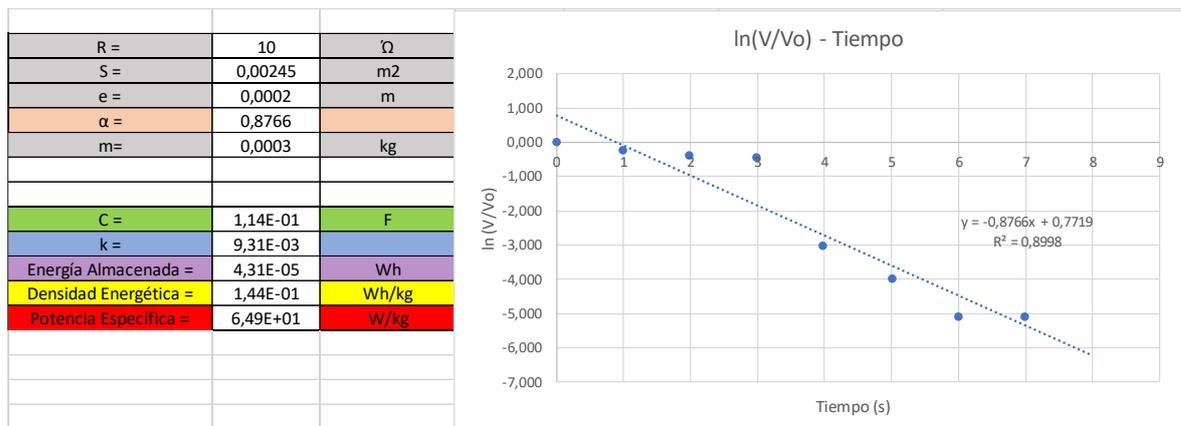


Figura A4- 26 Resultados obtenidos en la combinación n°9 - medición n°2

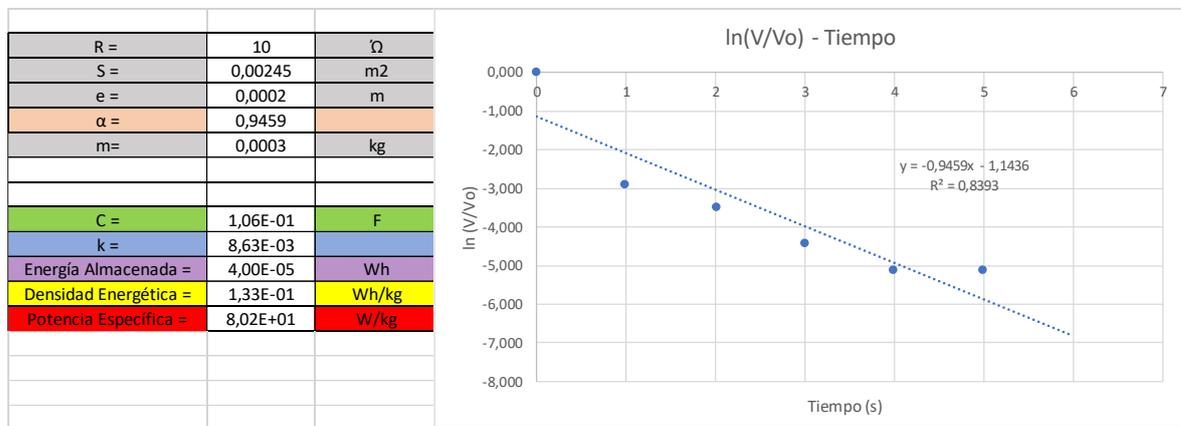


Figura A4- 27 Resultados obtenidos en la combinación n°9 - medición n°3

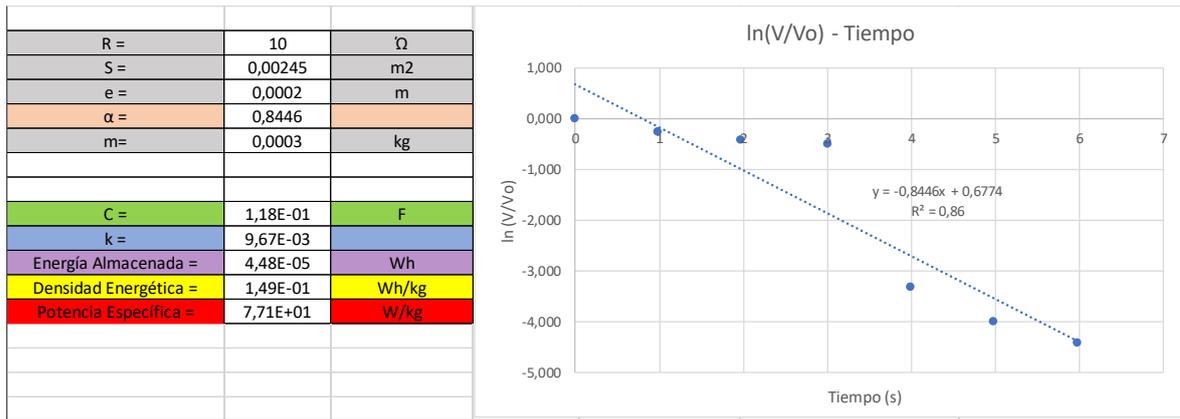


Figura A4- 28 Resultados obtenidos en la combinación n°10 - medición n°1

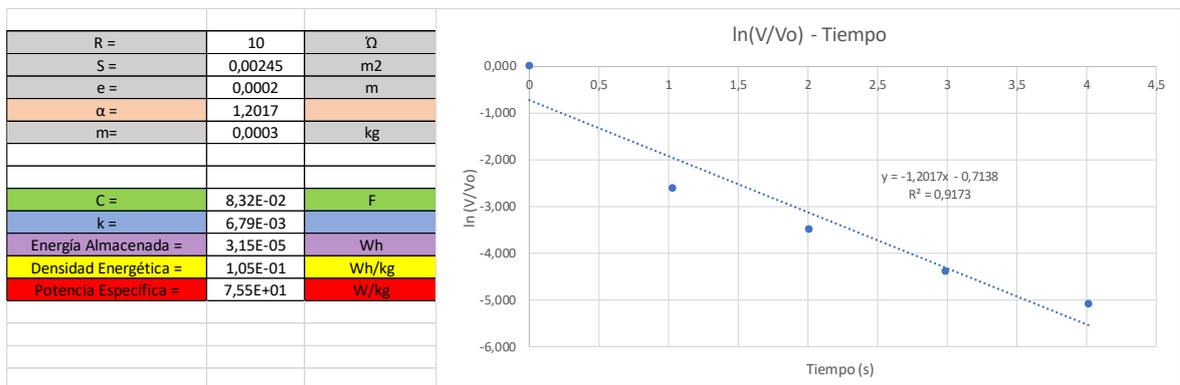


Figura A4- 29 Resultados obtenidos en la combinación n°10 - medición n°2

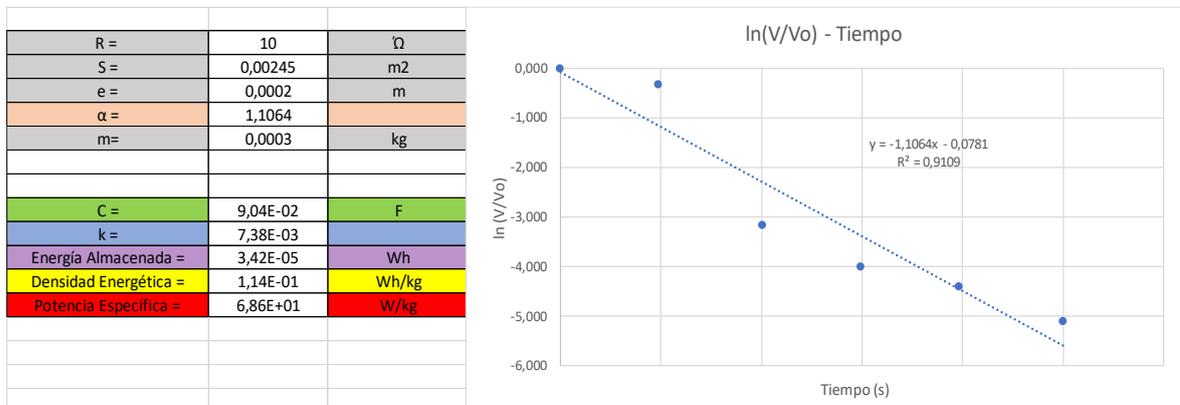


Figura A4- 30 Resultados obtenidos en la combinación n°10 - medición n°3

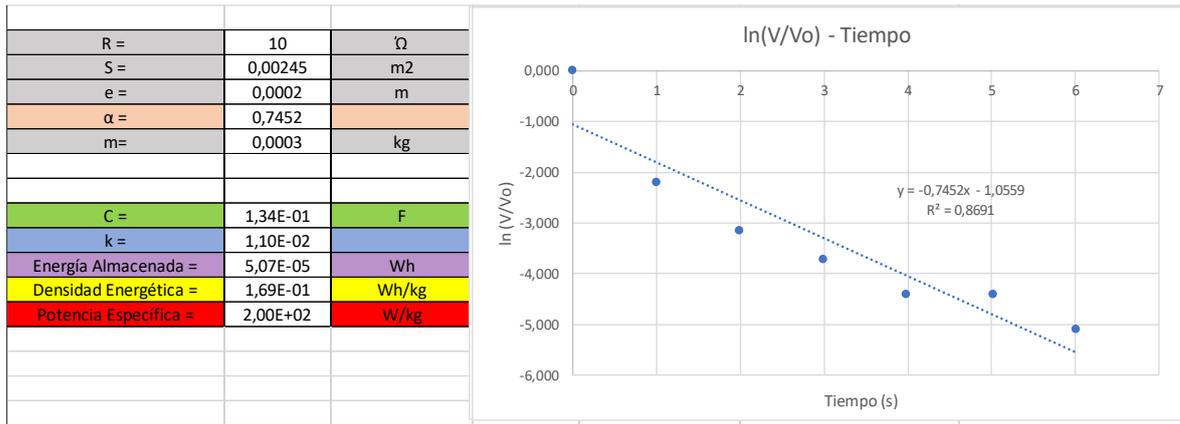


Figura A4- 31 Resultados obtenidos en la combinación n°11 - medición n°1

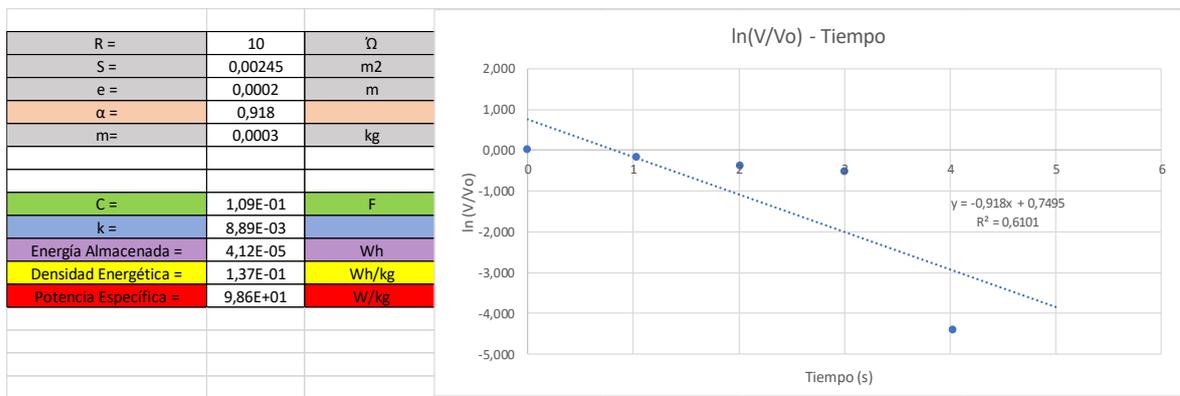


Figura A4- 32 Resultados obtenidos en la combinación n°11 - medición n°2

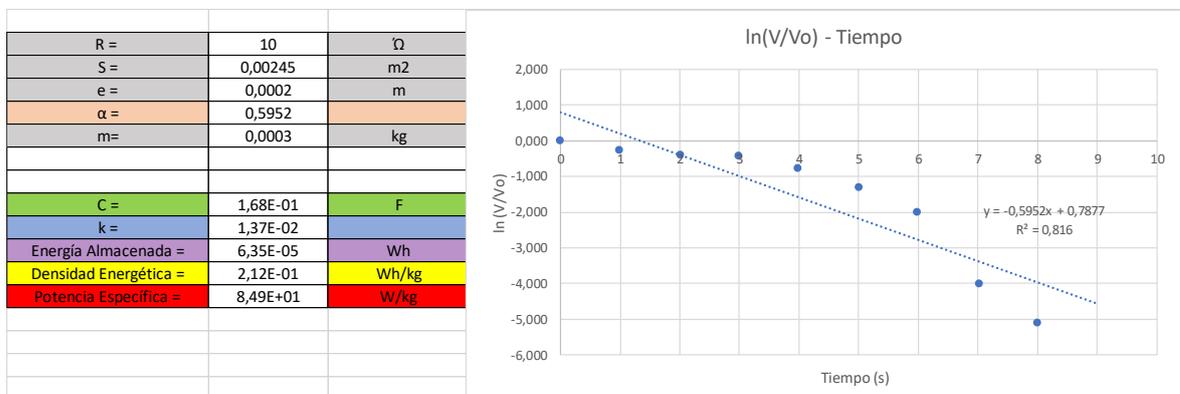


Figura A4- 33 Resultados obtenidos en la combinación n°11 - medición n°3

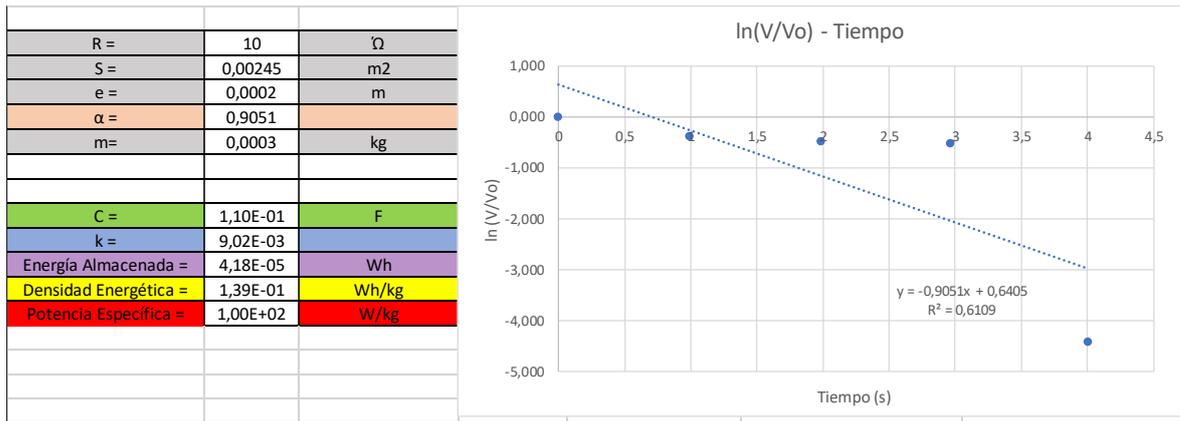


Figura A4- 34 Resultados obtenidos en la combinación n°12 - medición n°1

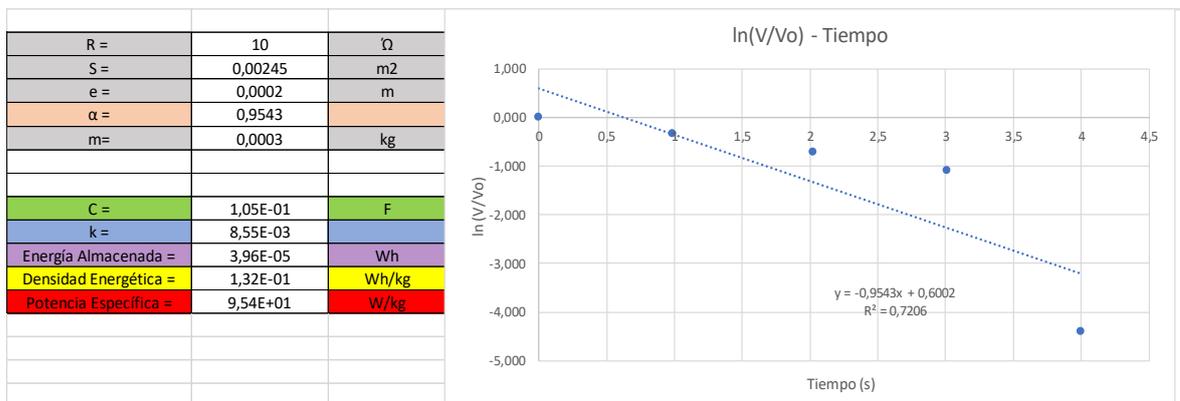


Figura A4- 35 Resultados obtenidos en la combinación n°12 - medición n°2

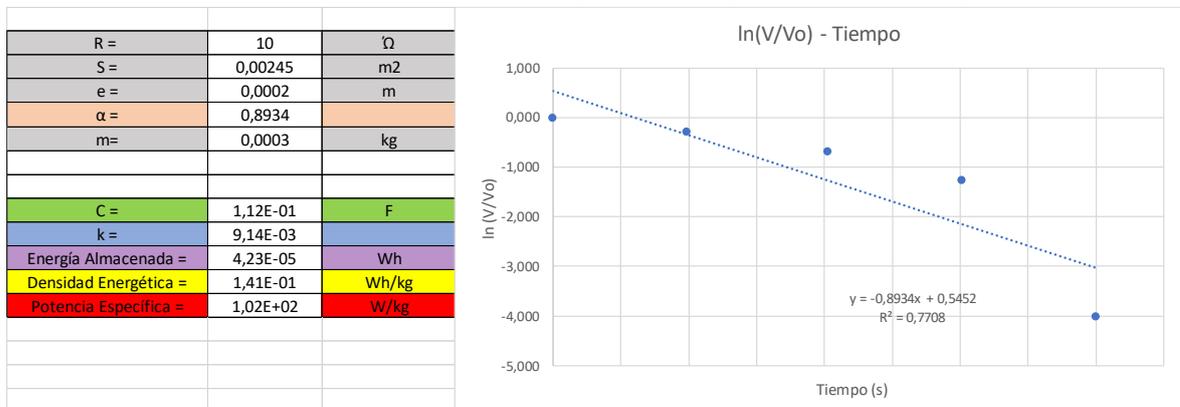


Figura A4- 36 Resultados obtenidos en la combinación n°12 - medición n°3

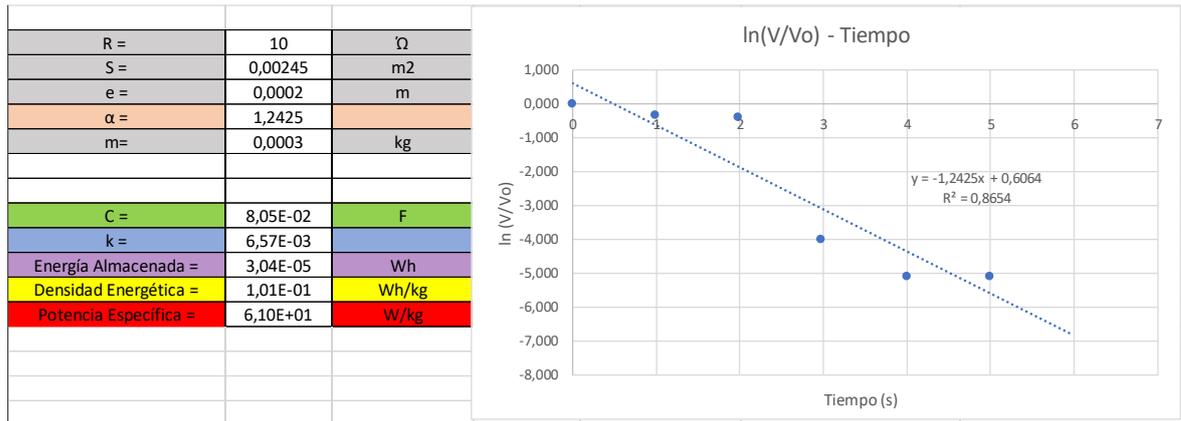


Figura A4- 37 Resultados obtenidos en la combinación n°13 - medición n°1

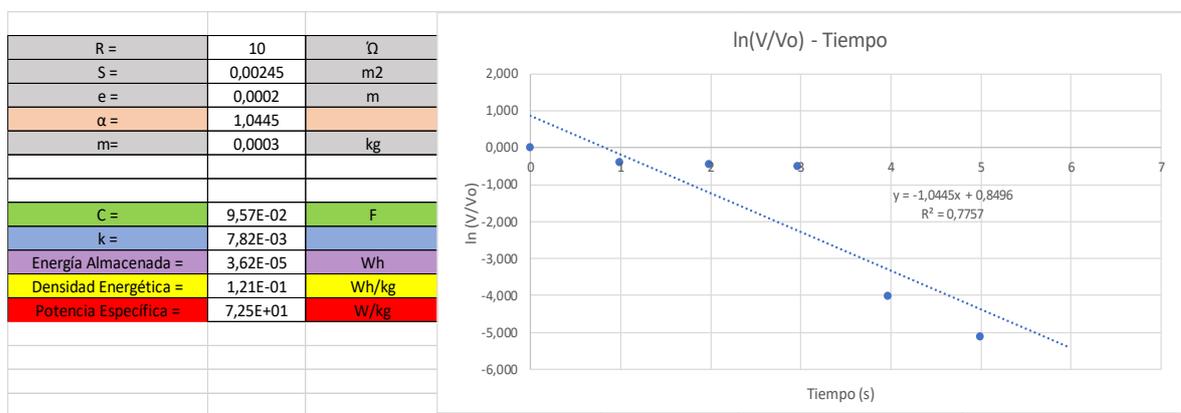


Figura A4- 38 Resultados obtenidos en la combinación n°13 - medición n°2

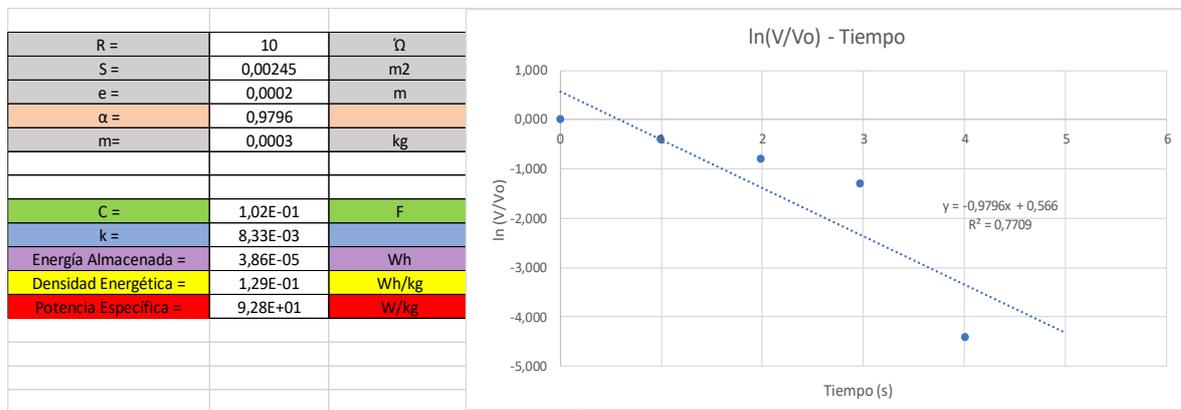


Figura A4- 39 Resultados obtenidos en la combinación n°13 - medición n°3

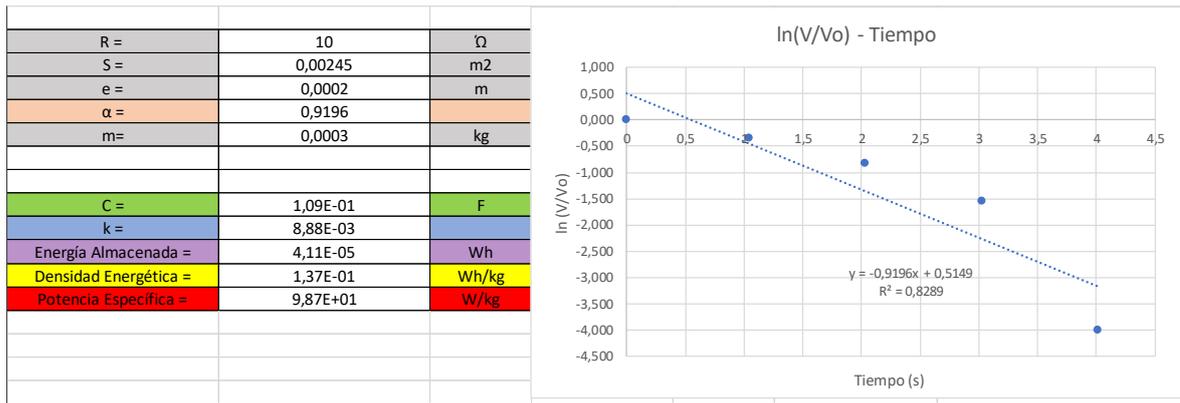


Figura A4- 40 Resultados obtenidos en la combinación n°14 - medición n°1

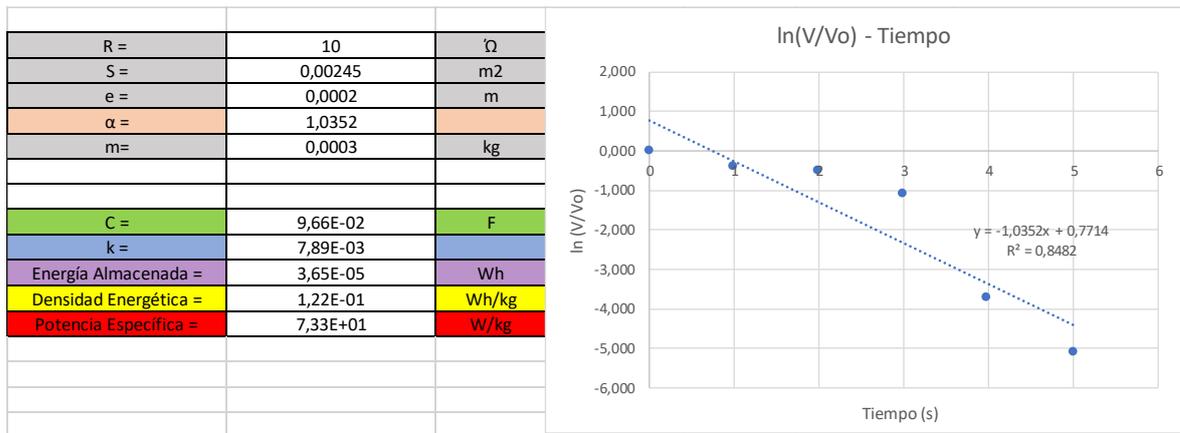


Figura A4- 41 Resultados obtenidos en la combinación n°14 - medición n°2

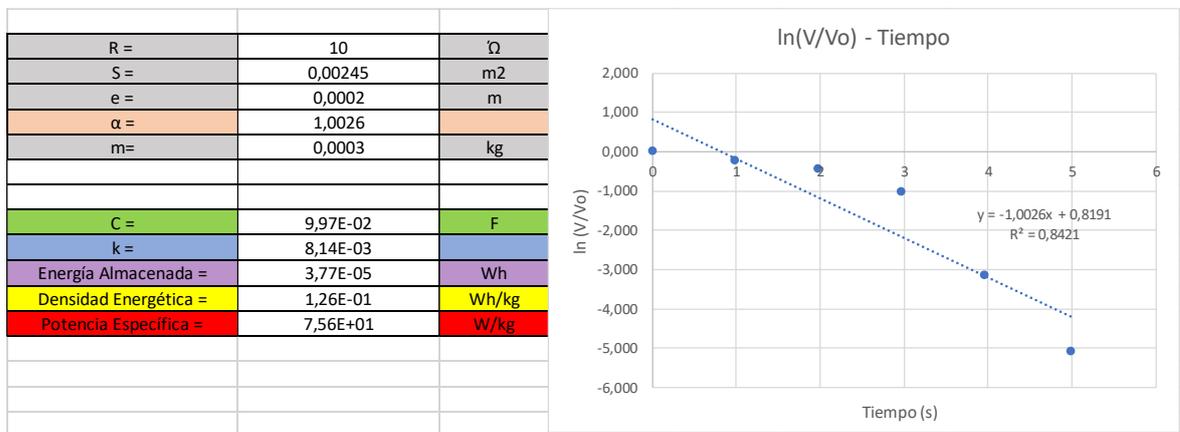


Figura A4- 42 Resultados obtenidos en la combinación n°14 - medición n°3

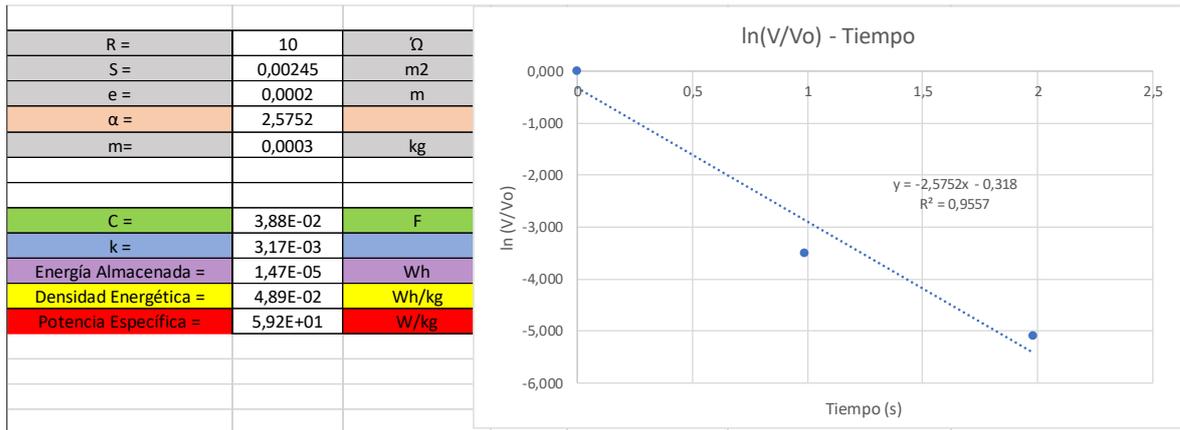


Figura A4- 43 Resultados obtenidos en la combinación n°15 - medición n°1

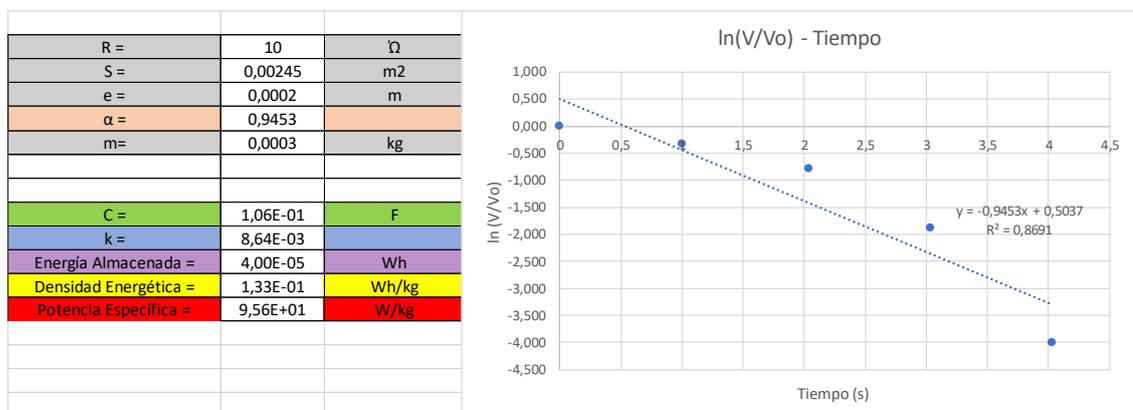


Figura A4- 44 Resultados obtenidos en la combinación n°15 - medición n°2

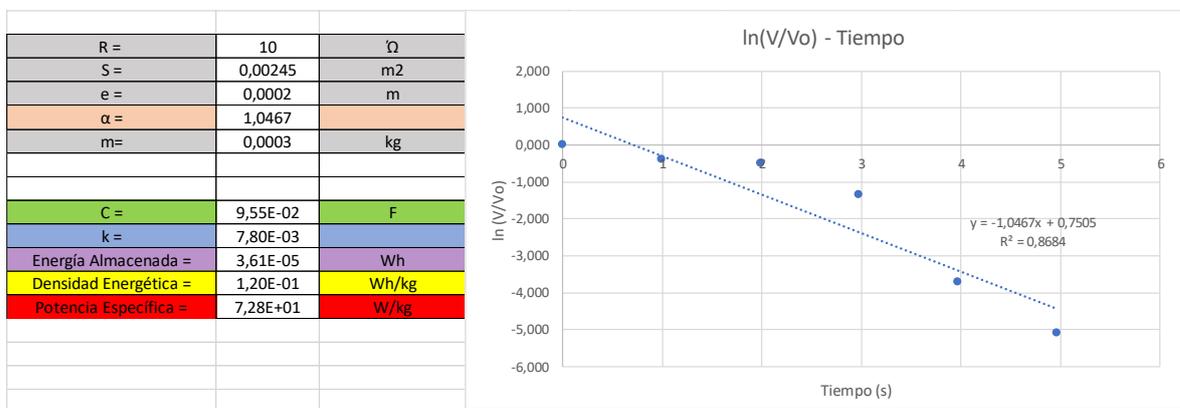


Figura A4- 45 Resultados obtenidos en la combinación n°15 - medición n°3