

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

MODELACIÓN Y SIMULACIÓN DE UN SISTEMA HÍBRIDO DE ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA ELÉCTRICA PARA LA PROPULSIÓN DE EMBARCACIONES TIPO TAXIS EN PUERTO AYORA

**TESIS PREVIA A LA OBTENCIÓN DEL GRADO DE MAGÍSTER EN
EFICIENCIA ENERGÉTICA**

Ing. JOFFRE REMIGIO CONSTANTE SEGURA
j.constante@hotmail.com

DIRECTOR: Dr. FREDDY GEOVANNY ORDÓÑEZ MALLA
freddy.ordonez@epn.edu.ec

CO DIRECTOR: Ing. GONZALO EFRAÍN GUERRÓN LÓPEZ, MSc.
armaguerron@gmail.com

Quito, Junio de 2016

DECLARACIÓN

Yo, Joffre Remigio Constante Segura, declaro que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que se ha consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

La Escuela Politécnica Nacional, puede hacer uso de los derechos correspondientes a este trabajo, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.

JOFFRE CONSTANTE

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por el Ing. Joffre Remigio Constante Segura bajo mi supervisión.

Dr. FREDDY ORDÓÑEZ

DIRECTOR DE PROYECTO

Ing. GONZALO GUERRÓN

**CO - DIRECTOR DE
PROYECTO**

AGRADECIMIENTOS

A la Escuela Politécnica Nacional y al Instituto Nacional de Eficiencia Energética y Energías Renovables. Un especial agradecimiento a Freddy Ordoñez, Carlos Naranjo, Gonzalo Guerrón y Marco Orozco.

A Dios, a mis familiares, profesores y amigos que me ayudaron a culminar con éxito esta etapa de mi vida.

Joffre Remigio Constante Segura

DEDICATORIAS

A Dios por haberme guiado a lo largo de mi vida por el camino correcto y brindarme salud, familia y sabiduría.

A mis padres Ana Segura y Yimy Constante, mi abuelita Maria Nicolasa y a mis familiares que me han apoyado no solamente en esta etapa sino a lo largo de toda mi vida.

Joffre Remigio Constante Segura

ÍNDICE GENERAL

DECLARACIÓN	i
CERTIFICACIÓN	ii
AGRADECIMIENTOS	iii
DEDICATORIAS	iv
ÍNDICE GENERAL	v
ÍNDICE DE FIGURAS	xi
ÍNDICE DE TABLAS	xvi
RESUMEN	xviii
PRESENTACIÓN	xix
CAPÍTULO 1. TECNOLOGÍAS DE PROPULSIÓN Y ALMACENAMIENTO ELÉCTRICO.....	1
1.1 INTRODUCCIÓN	1
1.2 GENERALIDADES DE LA TEORÍA DE LAS EMBARCACIONES	2
1.2.1 PLANOS Y LÍNEAS DE REFERENCIA	3
1.2.2 CARENA.....	4
1.2.3 DESPLAZAMIENTO	5
1.2.4 ARQUEO	5
1.2.5 DIMENSIONES.....	5
1.2.6 CALADOS	7
1.3 PREDICCIÓN DE LA POTENCIA DE PROPULSIÓN DE BUQUES.....	7
1.3.1 RESISTENCIA AL DESPLAZAMIENTO	8
1.3.2 SUPERFICIE MOJADA	10
1.3.3 COEFICIENTE DE RESISTENCIA POR FRICCIÓN.....	11

1.3.4	COEFICIENTE DE RESISTENCIA INCREMENTAL	11
1.3.5	COEFICIENTE DE RESISTENCIA POR EL AIRE	11
1.4	SISTEMAS DE PROPULSIÓN PARA MOVILIDAD MARÍTIMA	12
1.4.1	TECNOLOGÍA DE PLANTAS DE PROPULSIÓN.....	12
1.4.2	PROPULSIÓN ELÉCTRICA PARA MOVILIDAD MARÍTIMA	13
1.4.3	MOTORES DE CORRIENTE CONTINUA SIN ESCOBILLAS.....	14
1.4.4	COMPARACIÓN ENTRE MOTORES AC Y DC PARA MOVILIDAD MARÍTIMA	16
1.4.5	MOTORES ELÉCTRICOS UTILIZADOS ACTUALMENTE EN PROPULSIÓN MARÍTIMA.....	18
1.5	SISTEMAS DE ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA ELÉCTRICA	19
1.5.1	COMPARACIÓN ENTRE TECNOLOGÍAS DE ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA ELÉCTRICA.....	20
1.5.2	BATERÍAS.....	22
1.5.2.1	Características de baterías	24
	Ciclo de vida en función de la profundidad de descarga	24
	Capacidad disponible en función de la temperatura	25
	Capacidad disponible en función del índice de descarga C-rate.....	25
1.5.3	SUPERCAPACITORES.....	25
CAPÍTULO 2. MOVILIDAD MARÍTIMA EN PUERTO AYORA – GALÁPAGOS.....		30
2.1	ENERGÍA EN MOVILIDAD MARÍTIMA.....	30
2.2	LANCHAS TAXIS EN PUERTO AYORA – GALÁPAGOS	31
2.2.1	CASCOS DE LANCHAS TAXIS EN PUERTO AYORA – GALÁPAGOS	34
2.2.2	RUTAS DE OPERACIÓN	35
2.2.3	DISTANCIA DIARIA RECORRIDA	36

2.2.4	VIAJES DIARIOS.....	37
2.2.5	DISTANCIA POR RECORRIDO	37
2.2.6	TIEMPO POR RECORRIDO	38
2.2.7	TIEMPO ENTRE RECORRIDOS.....	39
2.2.8	VELOCIDAD DE NAVEGACIÓN	39
2.2.9	VIAJES POR HORA DEL DÍA	40
2.2.10	VELOCIDAD TÍPICA EN UN RECORRIDO	41
2.2.11	RUTAS DE OPERACIÓN.....	41
CAPÍTULO 3. DISEÑO Y SIMULACIÓN DE LA PROPULSIÓN ELÉCTRICA Y EL SISTEMA DE ALMACENAMIENTO		43
3.1	MOTOR ELÉCTRICO PARA PROPULSIÓN	44
3.2	CURVA DE OPERACIÓN REPRESENTATIVA DE LANCHAS TAXIS	46
3.3	DIMENSIONAMIENTO Y SIMULACIÓN DEL SISTEMA DE ALMACENAMIENTO CON BATERÍAS PARA UN DÍA.....	49
3.3.1	METODOLOGÍA.....	50
3.3.2	BATERÍAS DE PLOMO	53
3.3.2.1	Datos de entrada.....	53
3.3.2.2	Resultados	54
3.3.3	BATERÍAS DE Ni-MH.....	56
3.3.3.1	Datos de entrada.....	56
3.3.3.2	Resultados	57
3.3.4	BATERÍAS DE LITIO	58
3.3.4.1	Datos de entrada.....	59
3.3.4.2	Resultados	60

3.4	DIMENSIONAMIENTO Y SIMULACIÓN DEL SISTEMA DE ALMACENAMIENTO CON BATERÍAS PARA UN VIAJE	61
3.4.1	METODOLOGÍA.....	62
3.4.2	BATERÍAS DE PLOMO	62
3.4.2.1	Resultados	62
3.4.3	BATERÍAS DE Ni-MH.....	64
3.4.3.1	Resultados	64
3.4.4	BATERÍAS DE LITIO	66
3.4.4.1	Resultados	66
3.5	DIMENSIONAMIENTO Y SIMULACIÓN DEL SISTEMA DE ALMACENAMIENTO CON SUPERCAPACITORES PARA UN VIAJE.....	68
3.5.1	METODOLOGÍA.....	70
3.5.2	SUPERCAPACITORES.....	73
3.5.2.1	Datos de entrada.....	73
3.5.2.2	Resultados	74
3.6	DIMENSIONAMIENTO Y SIMULACIÓN DEL SISTEMA DE ALMACENAMIENTO HÍBRIDO (BATERÍAS Y SUPERCAPACITORES) PARA UN VIAJE	76
3.6.1	METODOLOGÍA.....	77
3.6.2	BATERÍAS DE PLOMO Y SC.....	79
3.6.2.1	Resultados	79
3.6.3	BATERÍAS DE Ni-MH Y SC.....	80
3.6.3.1	Resultados	81
3.6.4	BATERÍAS DE LITIO Y SC.....	82
3.6.4.1	Resultados	83

CAPÍTULO 4. RESULTADOS	85
4.1 COMPARACIÓN DE LOS DIFERENTES SISTEMAS DE ALMACENAMIENTO PROPUESTOS.....	85
4.2 SIMULACIÓN DEL SISTEMA DE ALMACENAMIENTO ÓPTIMO.....	87
4.3 VIABILIDAD DE PANELES FOTOVOLTAICOS.....	90
4.4 ANÁLISIS DE COSTOS DE LA PROPULSIÓN ELÉCTRICA Y A GASOLINA	91
4.4.1 COSTOS DE LA PROPULSIÓN ELÉCTRICA.....	91
4.4.2 COSTOS DE LA PROPULSIÓN A GASOLINA	92
4.5 ANÁLISIS DE GASES DE EFECTO INVERNADERO DE LA PROPULSIÓN ELÉCTRICA Y A GASOLINA.....	94
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	96
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	98
ANEXOS	101
ANEXO 1. Terminología de baterías y supercapacitores.....	102
ANEXO 2. Características de baterías de plomo gel, Ni-MH y litio	106
ANEXO 3. Características de supercapacitores	112
ANEXO 4. Tabla de resultados para la simulación con baterías de plomo para un día de operación	114
ANEXO 5. Tabla de resultados para la simulación con baterías de Ni-MH para un día de operación	118
ANEXO 6. Tabla de resultados para la simulación con baterías de litio para un día de operación	122
ANEXO 7. Tabla de resultados para la simulación con baterías de plomo para un viaje de operación.....	126

ANEXO 8. Tabla de resultados para la simulación con baterías de Ni-MH para un viaje de operación	130
ANEXO 9. Tabla de resultados para la simulación con baterías de litio para un viaje de operación	134
ANEXO 10. Tabla de resultados para la simulación con supercapacitores para un viaje de operación	138
ANEXO 11. Tabla de resultados para la simulación con baterías de plomo y SC para un viaje de operación	144
ANEXO 12. Tabla de resultados para la simulación con baterías de Ni-MH y SC para un viaje de operación	149
ANEXO 13. Tabla de resultados para la simulación con baterías de Litio y SC para un viaje de operación	153

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Planos de referencia de un buque	3
Figura 2. Líneas de referencia sobre el plano diametral	4
Figura 3. Esloras de un buque	6
Figura 4. Mangas y puntales de un buque	6
Figura 5. Calados de un buque	7
Figura 6. Métodos para evaluar la resistencia al desplazamiento de buques [3]	9
Figura 7. Motor DC sin escobillas controlado por inversor DC/AC	15
Figura 8. Eficiencia típica de un motor DC sin escobillas	16
Figura 9. Embarcación SOLARIS con paneles solares y baterías, Puerto Ayora.....	19
Figura 10. Génesis solar con paneles solares y 2 motores de 10 kW	19
Figura 11. Comparación de tecnologías de almacenamiento acorde a la energía y a la potencia.....	21
Figura 12. Circuito equivalente simple de una batería	22
Figura 13. Densidad de energía y densidad de potencia de baterías y supercapacitores	26
Figura 14. Circuito general para cargar un supercapacitor	27
Figura 15. Comportamiento de un capacitor, a) proceso de carga, b) proceso de descarga.....	27
Figura 16. Energía utilizada para cargar un capacitor y energía disipada en la resistencia	28
Figura 17. a) Circuito equivalente de un supercapacitor, b) circuito equivalente simplificado.....	29
Figura 18. Consumo de energía del sector transporte clasificado por sectores, Ecuador [32]	31
Figura 19. Ubicación geográfica de la operación de lanchas taxis en Puerto Ayora .	32
Figura 20. Lanchas taxis en Puerto Ayora	34
Figura 21. Modelo 3D del casco de la embarcación diseñada por el INER.....	35

Figura 22. Frecuencia relativa y acumulada de la distancia diaria recorrida de lanchas tipo taxis	36
Figura 23. Frecuencia relativa y acumulada del número de viajes diarios de lanchas tipo taxis	37
Figura 24. Frecuencia relativa y acumulada de la distancia por recorrido de lanchas tipo taxis	38
Figura 25. Frecuencia relativa y acumulada del tiempo por recorrido de lanchas tipo taxis	38
Figura 26. Frecuencia relativa y acumulada del tiempo entre recorridos de lanchas tipo taxis	39
Figura 27. Frecuencia relativa y acumulada de la velocidad de navegación de lanchas tipo taxis.....	40
Figura 28. Frecuencia relativa del número de viajes por hora del día de lanchas tipo taxis.....	40
Figura 29. Frecuencia relativa y acumulada de la velocidad de navegación en un viaje prototipo de lanchas tipo taxis.....	41
Figura 30. Rutas de operación de lanchas taxis en Puerto Ayora.....	42
Figura 31. Metodología de optimización para propulsión eléctrica en lanchas taxis. 43	
Figura 32. Curva de potencia en función de la velocidad y el peso.....	45
Figura 33. Curva representativa diaria de operación para recorrer la distancia media	47
Figura 34. Curva diaria de operación para recorrer el percentil 90 de la distancia....	48
Figura 35. Serie temporal de velocidad para un viaje de 1,6 km de distancia.....	48
Figura 36. Esquema general propuesto para la simulación del sistema de propulsión eléctrico con baterías	49
Figura 37. Metodología para la optimización del sistema de almacenamiento con baterías	52
Figura 38. Resistencia interna de baterías de plomo gel en función de la energía nominal [21].....	53
Figura 39. Simulación de C-rate y C-rate máximo en relación a la DOD de baterías de plomo para lanchas taxis.....	54

Figura 40. Simulación de costos anuales de baterías y energía en relación de la DOD de baterías de plomo gel	55
Figura 41. Resistencia interna de baterías de Ni-MH en función de la energía nominal [21].....	56
Figura 42. Simulación de C-rate y C-rate máximo en relación a la DOD de baterías de Ni-MH para lanchas taxis	57
Figura 43. Simulación de costos anuales de baterías y energía en relación de la DOD de baterías de Ni-MH	58
Figura 44. Resistencia interna de baterías de Litio en función de la energía nominal [21].....	59
Figura 45. Simulación de C-rate y C-rate máximo en relación a la DOD de baterías de Litio para un día de operación	60
Figura 46. Simulación de costos anuales de baterías y energía en relación de la DOD de baterías de Litio para un día de operación	61
Figura 47. Simulación de C-rate Carga y C-rate Descarga en relación a la DOD de baterías de plomo para un recorrido de lanchas taxis.....	63
Figura 48. Simulación de costos anuales y energía en relación de la DOD de baterías de plomo para un recorrido	64
Figura 49. Simulación de C-rate Carga y C-rate Descarga en relación a la DOD de baterías de Ni-MH para un recorrido de lanchas taxis	65
Figura 50. Simulación de costos anuales y energía en relación de la DOD de baterías de Ni-MH para un recorrido.....	66
Figura 51. Simulación de C-rate Carga y C-rate Descarga en relación a la DOD de baterías de Litio para un recorrido de lanchas taxis	67
Figura 52. Simulación de costos anuales y energía en relación de la DOD de baterías de Litio para un recorrido	68
Figura 53. Esquema general propuesto para la simulación del sistema de propulsión eléctrico con SC	69
Figura 54. Esquema de un convertidor de potencia para supercapacitor con IGBT [27].....	69

Figura 55. Metodología para la optimización del sistema de almacenamiento con supercapacitores.....	72
Figura 56. Resistencia interna de supercapacitores en función de la energía nominal [37].....	73
Figura 57. Eficiencia del proceso de carga del banco de supercapacitores en relación a la capacitancia.....	74
Figura 58. Simulación de costos anuales de SC y energía en relación de la capacitancia de almacenamiento de SC	75
Figura 59. Esquema general propuesto para la simulación del sistema de propulsión eléctrico con baterías y SC.....	77
Figura 60. Metodología para la optimización del sistema de almacenamiento híbrido	78
Figura 61. Simulación de costos anuales y costos de energía para el sistema de almacenamiento híbrido con baterías de plomo gel	80
Figura 62. Simulación de costos anuales y costos de energía para el sistema de almacenamiento híbrido con baterías de Ni-MH	82
Figura 63. Simulación de costos anuales y costos de energía para el sistema de almacenamiento híbrido con baterías de Litio	84
Figura 64. Simulación de la potencia y la corriente del sistema de baterías de plomo gel para un viaje de distancia media	89
Figura 65. Capacidad vs velocidad de descargar para una batería típica	103
Figura 66. Curva de descarga típica de una batería recargable.....	105
Figura 67. Ciclo de vida de una batería de plomo gel en función de la profundidad de descarga [21].....	106
Figura 68. Efectos de la temperatura en la capacidad de una batería de plomo ácido [21].....	107
Figura 69. Efecto del C-rate en la capacidad de una batería de plomo gel [21].....	107
Figura 70. Ciclo de vida de una batería de Ni-MH en función de la profundidad de descarga [24].....	108
Figura 71. Efectos de la temperatura en la capacidad de una batería de Ni-MH [23]	108

Figura 72. Capacidad de una batería de Ni-MH en función de la corriente de descarga [23].....	109
Figura 73. Ciclo de vida de una batería de Litio en función de la profundidad de descarga [25].....	110
Figura 74. Efectos de la temperatura en la capacidad de una batería de Litio [25].	110
Figura 75. Capacidad de una batería de Litio en función de la corriente de descarga	111
Figura 76. Capacitancia y ESR en función de la temperatura de un supercapacitor [26].....	112
Figura 77. Capacitancia en función del tiempo de uso y del voltaje de un supercapacitor [26].....	113
Figura 78. ESR en función del tiempo de uso y del voltaje de un supercapacitor [26]	113
Figura 79. Capacidad de un supercapacitor en función del número de ciclos y del voltaje de operación [26]	113

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Densidad energética de tecnologías de almacenamiento [19]	21
Tabla 2. Características de baterías recargables [20]	24
Tabla 3. Características técnicas de una lancha tipo taxi de Puerto Ayora	34
Tabla 4. Lanchas taxis para la instalación de GPS [14]	35
Tabla 5. Potencia [kW] del motor eléctrico para diferentes velocidades [km/h] y pesos [kg].....	46
Tabla 6. Costo total anual para cada porcentaje de sobredimensionamiento, baterías de plomo gel y SC	80
Tabla 7. Costo total anual para cada porcentaje de sobredimensionamiento, baterías de Ni-MH y SC	81
Tabla 8. Costo total anual para cada porcentaje de sobredimensionamiento, baterías de Litio y SC	83
Tabla 9. Comparación del punto óptimo de dimensionamiento para las diferentes configuraciones de sistemas de almacenamiento	87
Tabla 10. Características de las baterías ULTRACELL UCG35-12	87
Tabla 11. Características del sistema de almacenamiento con baterías de plomo gel	88
Tabla 12. Resultados de la simulación del sistema de baterías de plomo gel para un viaje de distancia media	89
Tabla 13. Costos de adquisición del sistema de propulsión eléctrico.....	91
Tabla 14. Costos anuales por adquisición y mantenimiento con sistema de propulsión eléctrico	92
Tabla 15. Costos de adquisición del sistema de propulsión a gasolina.....	92
Tabla 16. Costos anuales por adquisición y mantenimiento con sistema de propulsión a gasolina	93
Tabla 17. Comparación de consumos energéticos y económicos de la propulsión con MCI y motor eléctrico.	93
Tabla 18. Combustible anual consumido por propulsión eléctrica y a gasolina	94

Tabla 19. Características técnicas de una batería de plomo gel [21]	106
Tabla 20. Características técnicas de una batería de Ni-MH [23]	108
Tabla 21. Características técnicas de una batería de Litio [25]	109
Tabla 22. Características técnicas de un supercapacitor	112

RESUMEN

El sector marítimo no es ajeno a la problemática del calentamiento global y por el contrario, es un actor importante. Esto lleva a la necesidad de buscar y analizar alternativas tecnológicas limpias y eficientes como es la propulsión eléctrica.

El uso de la tecnología eléctrica para propulsión marítima de embarcaciones tiene una larga pero oscilatoria historia debido a que, al igual que en el transporte terrestre, esta tecnología fue abandonada en cierto momento por la popularidad de los motores de combustión interna.

La movilidad marítima en Galápagos utiliza combustibles fósiles que producen contaminación ambiental a las aguas por efecto de derrames de combustible y emisiones de gases de efecto invernadero. Existen embarcaciones en Puerto Ayora, específicamente en bahía Academia, que prestan el servicio de Taxi. Estas embarcaciones tienen la particularidad de que tienen rutas de operación de relativa corta longitud, lo que les hace un sector idóneo para pensar en movilidad eficiente mediante sistemas de propulsión con motores eléctricos.

El presente trabajo evalúa el uso de la tecnología eléctrica y específicamente el punto crítico actual, que es el almacenamiento de energía eléctrica. Hay que especificar que el peso del sistema de almacenamiento es importante ya que a mayor peso mayor potencia necesaria para impulsar una embarcación.

Al utilizar energía eléctrica para la propulsión, es necesario que la fuente primaria para la generación de electricidad no sea proveniente de combustibles fósiles. Actualmente el Ecuador impulsa el programa “cero combustibles fósiles en Galápagos”, el cual pretende impulsar las energías renovables. Este particular sustenta el uso de la electricidad en la propulsión eléctrica, sin embargo es necesario optimizar los sistemas impulsando la eficiencia energética.

PRESENTACIÓN

En la presente tesis se realizó el modelamiento y simulación de un sistema híbrido de almacenamiento con baterías y supercapacitores para embarcaciones que prestan el servicio de taxi en bahía Academia, Puerto Ayora, Santa Cruz – Galápagos. El objetivo es disminuir el uso de combustibles fósiles en galápagos por medio de la propulsión netamente eléctrica. Para aportar en este objetivo es necesario optimizar el sistema de almacenamiento con una función objetivo que permita minimizar los costos y la energía. Hay que destacar que el enfoque de este trabajo es encontrar el dimensionamiento óptimo del sistema de almacenamiento, puesto que el peso es fundamental en el desplazamiento de una embarcación.

En el Capítulo Uno se aborda las generalidades de la teoría de las embarcaciones, las tecnologías de propulsión eléctrica y las tecnologías de almacenamiento eléctrico para propulsión marítima. En la primera sección se presenta la metodología para calcular el motor de propulsión. En la sección posterior se trata brevemente los sistemas de almacenamiento y se especifican características técnicas de baterías y supercapacitores que se encuentran comercialmente en el mercado. Estos datos servirán posteriormente para las simulaciones.

En el Capítulo Dos se detalla las embarcaciones que prestan el servicio de taxi en Puerto Ayora. Se abarca el diseño del casco, sus especificaciones técnicas y se cuantifica las rutas de operación de las mismas. Dentro de las rutas de operación se cuantifica parámetros como la distancia diaria recorrida, la velocidad de navegación, el tiempo por recorrido, el tiempo entre viajes, el número de viajes diarios, entre otros. Este análisis permitirá dimensionar la potencia del motor eléctrico y la capacidad del sistema de almacenamiento.

En el Capítulo Tres se dimensiona el motor eléctrico y se simula todas las combinaciones de sistemas de almacenamiento. Las combinaciones son: i) sistema

netamente con baterías, plomo gel, Ni-MH y litio, ii) dimensionamiento netamente con supercapacitores y iii) sistema híbrido con baterías y supercapacitores.

En el Capítulo Cuatro se presentan los resultados de la simulación mediante la comparación de los resultados. Se escoge el sistema óptimo que no viole ninguna restricción técnica o de operación. Además, se realiza el análisis comparativo de costos y de emisiones de gases de efecto invernadero.

Finalmente se presentan las conclusiones y recomendaciones obtenidas en el desarrollo de este estudio. El principal objetivo de esta sección es simplificar futuros análisis de carácter similar, teniendo en cuenta que la eficiencia energética en el transporte tiene mayor impacto cada día.

CAPÍTULO 1. TECNOLOGÍAS DE PROPULSIÓN Y ALMACENAMIENTO ELÉCTRICO

1.1 INTRODUCCIÓN

La propulsión marítima consiste en ejercer una fuerza para trasladar una embarcación de un punto a otro sobre el agua. Esta fuerza tiene que vencer la resistencia al avance que presenta el agua y el aire.

La propulsión de embarcaciones marinas debe asegurar buenas características de maniobrabilidad, confort y seguridad, las cuales están estrechamente ligadas con la velocidad y la autonomía. La velocidad alcanzada depende de la potencia del motor y la resistencia al desplazamiento, que a su vez depende de la geometría que posee el casco. Por otro lado, la autonomía de la embarcación es inversamente proporcional a la velocidad. Si se desea mayor velocidad se necesita mayor potencia y por ende más consumo de energía y, si se requiere mayor autonomía, la energía demandada debe ser menor. Un equilibrio entre estas características son las que se buscan dependiendo de las funciones que va a realizar la embarcación.

A lo largo de la historia la tecnología para la propulsión de barcos ha cambiado continuamente. Se inició con los sistemas de remo y la combinación de remo – vela. A mediados del siglo XIX, con la aparición de los sistemas de vapor, se abandonaron estos sistemas y se adoptaron sistemas de propulsión con máquinas de vapor, incrementando la autonomía y la distancia de los viajes. A inicios del siglo XX se empezó a utilizar las turbinas de gas y los motores a Diésel. Actualmente se utilizan sistemas combinados para aprovechar las mejores características de cada tecnología. En ciertas aplicaciones especiales es necesario utilizar propulsión netamente eléctrica, además de que al igual que en los autos eléctricos, actualmente es la tecnología más eficiente. La limitante de esta tecnología es la fuente de

energía, ya que las baterías incrementan el peso de la embarcación, incrementando la potencia necesaria para el desplazamiento. En este capítulo se realiza un estudio del estado del arte de tecnologías de baterías para el sector marítimo, haciendo especial énfasis en los modelos equivalentes [1].

1.2 GENERALIDADES DE LA TEORÍA DE LAS EMBARCACIONES

Los estudios relevantes que se realizan en la teoría de las embarcaciones son los siguientes: flotabilidad, estabilidad, resistencia, propulsor, maniobrabilidad y comportamiento en el mar. El estudio de la resistencia al desplazamiento del buque permite calcular la potencia necesaria para desplazar la embarcación a una determinada velocidad [2].

Para el estudio de buques es necesario definir la siguiente nomenclatura:

- Casco: Envolvente de la embarcación.
- Proa: Define el lado delantero de la embarcación.
- Popa: Define el lado posterior o trasero de la embarcación.
- Estribor: Define el lado derecho de la embarcación mirando hacia la proa.
- Babor: Define el lado izquierdo de la embarcación mirando hacia la proa.
- Quilla: Estructura longitudinal que va desde la popa a la proa en la parte más baja de la embarcación, sirve para sostener las cuadernas.
- Cuadernas: Piezas curvas que se soportan en la quilla y están perpendiculares a esta. Su objetivo es dar forma al casco.

En las secciones que siguen se define más detalladamente la nomenclatura utilizada en el estudio de buques.

1.2.1 PLANOS Y LÍNEAS DE REFERENCIA

Para el estudio de la geometría de los buques se definen tres planos: longitudinal, horizontal y transversal, (mirar Figura 1) [2].

- El plano longitudinal es el plano vertical en el sentido popa-proa que divide al buque en dos partes simétricas, que son definidas como banda de estribor y babor.
- El plano horizontal es el plano paralelo a la superficie del mar, se traza en el punto más bajo de la quilla.
- El plano transversal es el plano perpendicular a los dos antes definidos. El corte del buque por el plano transversal forma secciones transversales delimitadas por el contorno del casco.

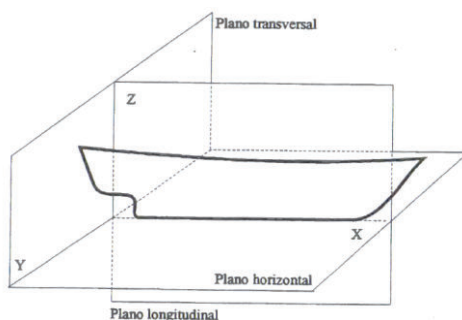


Figura 1. Planos de referencia de un buque¹

Además se define al plano diametral como el plano longitudinal limitado por el contorno del buque. Sobre el plano diametral se tienen las líneas de referencia mostradas en la Figura 2.

- Línea base: Línea horizontal que se traza por el punto más bajo de la quilla. Tiene la dirección de la línea formada por el cruce de los planos horizontal y longitudinal.

¹ Figura obtenida de [2].

- Línea de flotación: Línea que se forma por la intersección del casco y el plano de la superficie horizontal del mar. La altura entre la línea de flotación y la línea base es el calado.
- Perpendicular de popa (P_{pp}): Línea vertical que depende de la forma de la popa de la embarcación.
- Perpendicular de proa (P_{pr}): Línea vertical que depende de la forma de la proa y la línea de flotación.
- Perpendicular media (P_m): Línea vertical equidistante entre las dos perpendiculares antes descritas.

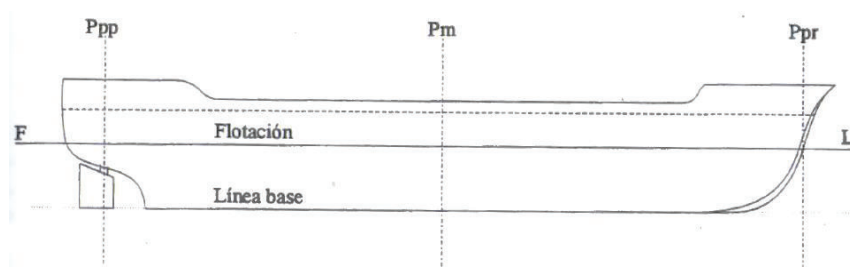


Figura 2. Líneas de referencia sobre el plano diametral²

1.2.2 CARENA

Se conoce como carena al volumen sumergido (∇) limitado por el casco y por la superficie de flotación.

La superficie de flotación divide al barco en la obra viva y la obra muerta. La obra viva es la que se encuentra por debajo de la superficie de flotación, que es la carena; y la obra muerta es la que se encuentra hacia arriba de la superficie de flotación. La obra viva también es la reserva de flotabilidad del buque [2].

² Figura obtenida de [2].

1.2.3 DESPLAZAMIENTO

Se define como desplazamiento (Δ) al peso del buque para una condición de carga dada. Se relaciona el volumen sumergido con el desplazamiento mediante la ecuación (1.1).

$$\Delta = \nabla * \gamma \quad (1.1)$$

Donde: Δ = Desplazamiento

∇ = Volumen sumergido

γ = Densidad del agua

Con esta fórmula se puede calcular el calado de un buque según el peso del mismo.

1.2.4 ARQUEO

Es el tamaño del buque y se divide en arqueo bruto y arqueo neto. Arqueo bruto es el tamaño total del buque y tamaño neto es la capacidad para transporte de carga comercial [2].

1.2.5 DIMENSIONES

A continuación se presentan las definiciones de algunas dimensiones características de las embarcaciones necesarias para el estudio de las mismas:

- Eslora: distancia longitudinal del buque sobre el plano diametral. De acuerdo al punto de referencia tomado se obtiene diferentes esloras, mismas que se muestran en la Figura 3 [2].

- Manga: distancia en sentido transversal del buque (ancho). Según el punto de referencia que se tome se obtienen diferentes mangas, mismas que se muestran en la Figura 4.
- Puntal: distancia vertical en la sección media del barco. El puntal de trazado es la distancia medida en la cuaderna maestra (cuaderna con máxima manga). El puntal máximo es la distancia vertical medida en la perpendicular media, Figura 4 [2].

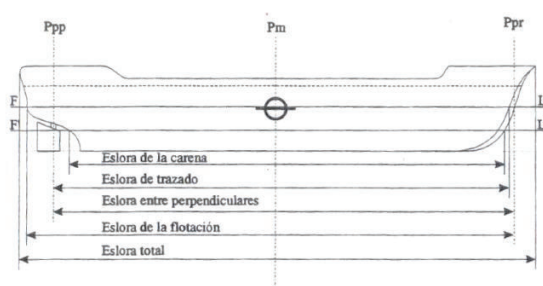


Figura 3. Esloras de un buque³

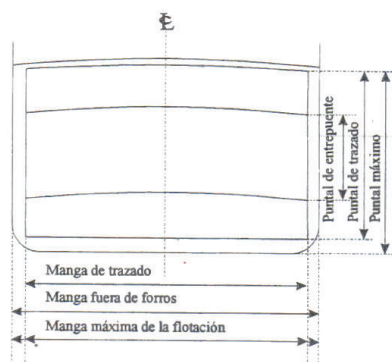


Figura 4. Mangas y puntales de un buque⁴

³ Figura obtenida de [2].

⁴ Figura obtenida de [2].

1.2.6 CALADOS

El calado es la distancia vertical entre un punto cualquiera para una línea de flotación asignada y la línea base, Figura 5. Según el punto de flotación se tienen los siguientes calados:

- Calado de popa (C_{pp}): Calado en la perpendicular de popa.
- Calado de proa (C_{pr}): Calado en la perpendicular de proa.
- Calado medio (C_{pm}): Calado en la perpendicular media.

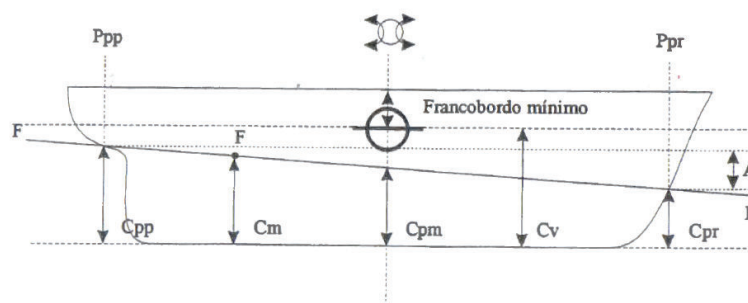


Figura 5. Calados de un buque⁵

1.3 PREDICCIÓN DE LA POTENCIA DE PROPULSIÓN DE BUQUES

La potencia efectiva (kW, HP, CV) es la que genera el empuje necesario para mover una embarcación a una velocidad específica. La potencia efectiva de propulsión está en función de la velocidad y de la resistencia que presenta el buque para moverse en el agua, ver ecuación (1.2).

$$P = V * R_T \quad (1.2)$$

Dónde: P = Potencia Efectiva [W]

⁵ Figura obtenida de [2].

V = Velocidad [m/s]

R_T = Resistencia total del buque [N]

Para obtener la potencia efectiva (P) de empuje, es necesario que la potencia de la máquina principal sea mayor, esto debido a las pérdidas en la transformación y transmisión de la misma. La potencia de la máquina principal se relaciona con la potencia efectiva por la ecuación (1.3).

$$\eta = \frac{P}{P_p} \quad (1.3)$$

Donde: η = rendimiento

P = Potencia efectiva

P_p = Potencia de la máquina principal

La diferencia entre la potencia efectiva y la potencia real de la maquina principal se debe a: eficiencia del motor primario, pérdidas en el eje, eficiencia de la propela para convertir la energía en empuje, eficiencia de la carena, entre otros [1].

1.3.1 RESISTENCIA AL DESPLAZAMIENTO

La resistencia al desplazamiento es la resistencia que presenta el buque al movimiento, esta resistencia es generada principalmente por el agua y por el aire.

Para evaluar la resistencia existe una amplia cantidad de métodos, los mismos que se presentan en la Figura 6.

Estos varían desde métodos tradicionales que han funcionado en la ingeniería naval clásica, hasta el uso de programas CFDs (Computational Fluids Dynamics). Los métodos tradicionales se basan en parámetros arquitectónicos de la forma del casco,

sin embargo, en modelos de cascos más complejos se presenta mayor exactitud en el análisis CFD [3].

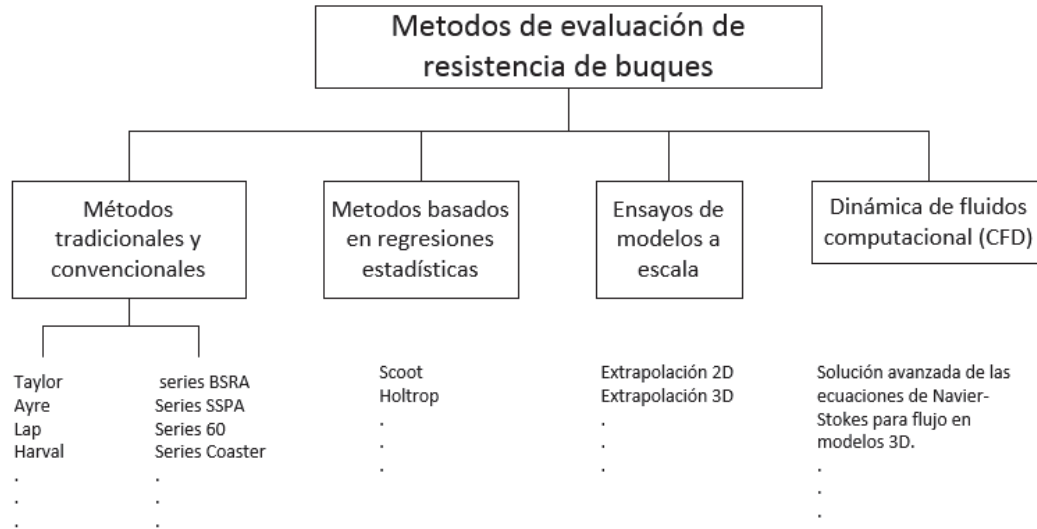


Figura 6. Métodos para evaluar la resistencia al desplazamiento de buques [3]

Un método clásico del cálculo de la resistencia al desplazamiento en embarcaciones se presenta en la ecuación (1.4).

$$R_T = R_{agua} + R_{aire} + R_{otros} \quad (1.4)$$

Donde: R_T = Resistencia total

R_{agua} = Resistencia del agua

R_{aire} = Resistencia del aire

R_{otros} = Resistencias varias

La anterior ecuación puede ser escrita también como se muestra en la ecuación (1.5).

$$C_T = C_F + C_A + C_{AA} = \frac{R_T}{\frac{1}{2} \rho S V^2} \quad (1.5)$$

Donde: C_T = Coeficiente de resistencia total

C_F = Coeficiente de resistencia por fricción

C_A = Coeficiente de resistencia incremental

C_{AA} = Coeficiente de resistencia por el aire

ρ = Densidad del agua

S = Superficie mojada del casco

V = Velocidad del buque

De esta ecuación se puede deducir que la resistencia total (R_T) crece con el cuadrado de la velocidad del buque [4].

1.3.2 SUPERFICIE MOJADA

La superficie mojada (S) se calcula con la ecuación (1.6), sin embargo existen varias modificaciones a esta ecuación según la forma del casco [4]. En la actualidad esta superficie se puede calcular con programas computacionales utilizando el modelo del buque tridimensional.

$$S = 1,025 * L_{pp} * (C_B * B + 1,7 * T) \quad (1.6)$$

Donde: L_{pp} = Eslora entre perpendiculares

C_B = Coeficiente de bloque

B = Manga a la altura de la línea de flotación

T = Calado en la perpendicular media

El coeficiente de bloque (C_B) o de afinamiento cúbico es la relación entre el volumen sumergido y el prisma rectangular que tiene por dimensiones la eslora, la manga y el calado a la altura de la línea de flotación considerada.

1.3.3 COEFICIENTE DE RESISTENCIA POR FRICCIÓN

El coeficiente de resistencia por fricción (C_F) se define por la ecuación (1.7).

$$C_F = \frac{0,075}{(\log R_n - 2)^2} = \frac{R_F}{\frac{1}{2} \rho S V^2} \quad (1.7)$$

La resistencia de fricción es la suma de las tensiones tangenciales a lo largo de la superficie mojada del buque, en la dirección del movimiento.

R_n es el número de Reynold y se calcula con la ecuación (1.8).

$$R_n = \frac{V * L_{wl}}{\nu} \quad (1.8)$$

Donde: ν = viscosidad cinemática del agua

L_{wl} = Eslora en la línea de flotación

1.3.4 COEFICIENTE DE RESISTENCIA INCREMENTAL

El coeficiente de resistencia incremental (C_A) está relacionado con la rugosidad de la superficie del casco. Generalmente la rugosidad utilizada en el modelo es diferente a la rugosidad del casco real [4]. El valor de C_A puede ser estimado con la ecuación (1.9).

$$1000 * C_A = 0,5 * \log(\Delta) - 0,1 * (\log(\Delta))^2 \quad (1.9)$$

1.3.5 COEFICIENTE DE RESISTENCIA POR EL AIRE

El coeficiente de resistencia por el aire (C_{AA}) es la resistencia al movimiento del buque que presenta este cuando se mueve a través del aire. Este valor se encuentra entre 0,0004 y 0,0007. Para pequeñas embarcaciones el C_{AA} es cercano a 0,0007 [4].

1.4 SISTEMAS DE PROPULSIÓN PARA MOVILIDAD MARÍTIMA

Los sistemas de propulsión para embarcaciones están diseñados para transformar un tipo de energía en trabajo mecánico y posteriormente ser empleada por las propelas para generar empuje. El sistema completo para transformar la energía almacenada en empuje está conformado por una serie de componentes con funciones específicas y los cuales, de manera general, se detallan a continuación [1]:

- Plantas, máquinas o motores: realizan la transformación de la energía almacenada en energía mecánica.
- Tren de engranajes: su objetivo es reducir las revoluciones de los motores de acuerdo al régimen de eficiencia de la propela, acoplar y desacoplar el motor del eje e invertir el sentido de giro en caso de que sea necesario.
- Eje de transmisión: conecta el movimiento desde el tren de engranajes hasta la propela.
- Propela: transforma el torque del eje de transmisión en empuje efectivo de la embarcación. Se conoce también como hélice.

1.4.1 TECNOLOGÍA DE PLANTAS DE PROPULSIÓN

Las plantas de propulsión, máquinas o motores se pueden clasificar de acuerdo a como se transforma la energía en ella, las plantas más utilizadas en embarcaciones son las siguientes:

- Máquinas de vapor: son máquinas que trabajan de acuerdo al ciclo termodinámico Rankine.
- Turbinas de gas: son máquinas que trabajan de acuerdo al ciclo termodinámico Brayton.
- Motor a gasolina y a diésel: son motores recíprocos que trabajan de acuerdo al ciclo termodinámico Otto y Diesel, respectivamente.

- Motores eléctricos: son máquinas que transforman la energía eléctrica a energía mecánica, su principio de funcionamiento se basa en que un conductor que porta corriente en presencia de un campo magnético experimenta una fuerza inducida sobre él [5]. En la sección 1.4.2 se ampliará la información de movilidad marítima con motores eléctricos.
- Plantas híbridas: son plantas que combinan dos tipos distintos de máquinas, por ejemplo diésel - eléctricas. El objetivo es aprovechar las características de cada tipo de propulsión con el fin de maximizar la eficiencia energética.

1.4.2 PROPULSIÓN ELÉCTRICA PARA MOVILIDAD MARÍTIMA

El uso de la tecnología eléctrica para propulsión marítima de embarcaciones tiene una larga pero oscilatoria historia debido a que, al igual que en el transporte terrestre, esta tecnología fue abandonada en cierto momento por la popularidad de los motores de combustión interna [6].

La instalación de propulsión eléctrica se ha realizado mayormente en barcos de pasajeros, sin embargo una amplia variedad de embarcaciones la están utilizando actualmente.

La tecnología de propulsión eléctrica emplea variadores electrónicos de frecuencia, lo que permite eliminar la caja de transmisión y acoplar el motor eléctrico directamente a la turbina o hélice. La provisión de variadores electrónicos de gran potencia siempre ha sido un problema, es por este motivo que en embarcaciones de gran tamaño se presenta la complicación al acoplar varios motores a un eje.

Existe una gran cantidad de razones por las cuales se justifica utilizar motores eléctricos para propulsión, entre estas se encuentran: flexibilidad de diseño, diversidad de carga, menor mantenimiento, amplio margen de control y principalmente bajo ruido y mayor eficiencia [6]. Como principal desventaja se tiene que actualmente no existe una tecnología viable para la acumulación de energía

eléctrica en grandes cantidades, más aun en el transporte marítimo donde el peso juega un papel fundamental.

Los motores eléctricos para propulsión de barcos pueden ser de corriente alterna, AC, o de corriente continua, DC.

Los motores DC actualmente son poco utilizados debido a que las redes eléctricas suministran AC, sin embargo existen aplicaciones especiales en las que todavía se requiere su instalación. La razón principal es su característica par – velocidad la cual puede ser variada en un amplio intervalo sin perder eficiencia, aunque actualmente los motores de AC pueden alcanzar esta característica con equipos de electrónica de potencia [5].

Existe una forma de construcción especial que permite que los motores no tengan escobillas. Este tipo de motor se detalla en la sección inmediatamente posterior y se conoce con varios nombres los cuales son: motor de corriente continúa sin escobillas, motor sincrónico de imanes permanentes, motor brushless, entre otros.

1.4.3 MOTORES DE CORRIENTE CONTINUA SIN ESCOBILLAS

Tres bobinados se disponen en el estator desfasados 120 grados entre sí con el objetivo de no utilizar anillos rozantes y minimizar el mantenimiento. El campo magnético en el rotor se genera con imanes permanentes.

El principio de funcionamiento se basa en que las bobinas que se encuentran frente a los polos norte y sur conducen corriente y en cuanto se rompe el contacto con esta bobina inmediatamente se energiza la siguiente. Este proceso iterativo se repite continuamente y la conmutación se lo realiza por medio de un sensor que determina la posición instantánea del motor (ver Figura 7) [7].

Este motor DC es similar a un motor AC sincrónico donde el rotor tiene imanes permanentes y el estator es alimentado por una fuente DC conmutada con

electrónica de potencia. De hecho, si el motor DC sin escobillas se alimenta con una fuente DC de frecuencia fija se comportaría como un motor síncrono. Si la corriente y la densidad de flujo son fijas, el par es constante independientemente de la velocidad. Debido a que las bobinas de la armadura están desfasadas 120 grados estas se comportan como si fueran excitadas por una fuente trifásica y la frecuencia responde a la ecuación de los motores trifásicos síncronos. En la Figura 7 se presenta el esquema general de un motor DC sin escobillas controlado con electrónica de potencia.

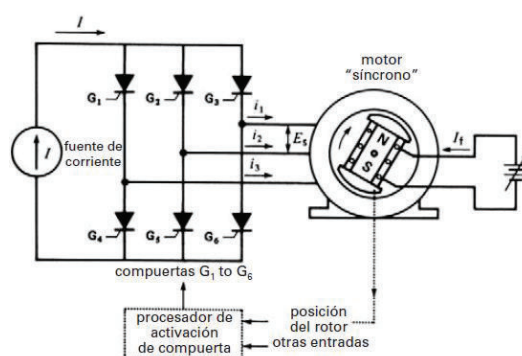


Figura 7. Motor DC sin escobillas controlado por inversor DC/AC⁶

En este tipo de motores existen pérdidas por: resistencia en los bobinados; pérdidas en el hierro del estator y rotor; y pérdidas por fricción. La eficiencia es función del torque y de la velocidad. Como ejemplo, en la Figura 8 se detalla un mapa de eficiencias para un motor de 80 kW. La eficiencia máxima es de 97,5 % para las condiciones dadas de velocidad y torque. La eficiencia media para la mayor parte de la región (de 40 a 80 Nm y 2000 a 6000 RPM) es del 97 % [8]. Un motor prototipo de 48 kW tiene una eficiencia máxima del 96% [9].

Cabe destacar que el motor DC sin escobillas o motor síncrono de imanes permanentes presenta una alta eficiencia en la mayor cantidad de puntos de operación.

⁶ Figura obtenida de [7].

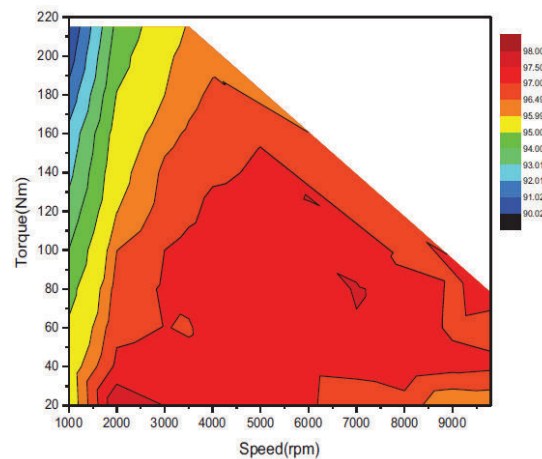


Figura 8. Eficiencia típica de un motor DC sin escobillas⁷

El motor DC sin escobillas presenta las siguientes ventajas:

- Extendidas horas de servicio sin requerir mantenimiento.
- Menor contaminación al no generar partículas de polvo por el desgaste de las escobillas.
- Más silencioso que otros motores eléctricos al no tener escobillas ruidosas.
- Elevada confiabilidad.

1.4.4 COMPARACIÓN ENTRE MOTORES AC Y DC PARA MOVILIDAD MARÍTIMA

Para la propulsión eléctrica de lanchas taxis de Puerto Ayora – Galápagos se pretende que el almacenamiento de energía sea por medio de baterías, supercapacitores o un sistema de almacenamiento híbrido entre estas dos tecnologías.

Teniendo esto como antecedente sería preferible utilizar motores DC para evitar transformar la corriente DC a AC. Sin embargo en movilidad marítima hay que tomar

⁷ Figura obtenida de [8].

en cuenta que: i) el mantenimiento y el peso de los motores eléctricos debe ser mínimo, y ii) se debe poder variar las características de par - velocidad necesaria para la propulsión.

Los motores AC sincrónicos necesitan una corriente trifásica AC en el estator y una fuente DC en el rotor. Esto es una desventaja puesto que se necesita un inversor DC/AC, aunque con electrónica de potencia esto se puede lograr con relativa simplicidad. El principal inconveniente son las escobillas necesarias para alimentar el campo DC del rotor. La excitación sin escobillas se utiliza en motores sincrónicos de gran potencia.

Los motores AC de inducción con rotor devanado tampoco son adecuados debido a que tienen escobillas y anillos colectores. Además, el colocar resistencias al rotor no es eficiente ya que genera calor y añade peso en la embarcación.

Los motores AC jaula de ardilla pueden ser adecuados ya que no tienen escobillas, sin embargo siguen necesitando una fuente AC trifásica.

Los motores DC tienen un punto a favor ya que no es necesario invertir la potencia a AC. La variación de velocidad depende del voltaje aplicado y se puede utilizar resistencias (método no eficiente) o un controlador electrónico de potencia. Como desventaja se tiene que poseen anillos colectores y escobillas, los cuales necesitan mantenimiento y reemplazo periódico.

Los motores DC sin escobillas o motores sincrónicos de imanes permanentes presentan fuertes ventajas para la movilidad marítima debido al bajo mantenimiento, a las buenas características de par-velocidad y al control con fuente de corriente continua.

1.4.5 MOTORES ELÉCTRICOS UTILIZADOS ACTUALMENTE EN PROPULSIÓN MARÍTIMA

Existen empresas a nivel mundial que se dedican a la venta de soluciones completas para movilidad marítima eléctrica. Estas soluciones contemplan motores eléctricos, baterías, paneles solares y los controles electrónicos para estos equipos. A continuación se presentan algunas de las empresas especialistas en propulsión eléctrica marítima y los tipos de motores que ofrecen:

- i) TEMA, empresa de Croacia, ofrece motores de imanes permanentes de 10 kW a 1000 kW [10], [11].
- ii) Torqeedo, empresa de Alemania, ofrece motores AC sincrónicos de imanes permanentes de 0,4 kW a 33 kW [12].
- iii) Krautler, empresa de Austria, ofrece motores trifásicos de libre mantenimiento de 2,5 kW a 30 kW [13].

Como se aprecia anteriormente la tendencia de las empresas es utilizar motores de imanes permanentes o lo que es lo mismo, motores DC sin escobillas, detallados en la sección 1.4.3. Esta tendencia se debe al bajo mantenimiento que estos necesitan.

En el Ecuador, específicamente en las islas Galápagos, existen dos embarcaciones con propulsión netamente eléctrica. Una se llama Solaris, que usa un motor de marca Torqeedo con paneles solares y baterías. Esta embarcación trabaja en bahía Academia de Puerto Ayora – Santa Cruz, Figura 9. La segunda se llama Génesis Solar y es un catamarán con baterías y paneles solares que trabaja actualmente en el canal de Itabaca entre Baltra y Santa Cruz. Este consta de dos motores sincrónicos trifásicos de imanes permanentes de 10 kW, 36 V, 137 Hz, marca Krautler, Figura 10, [14].

Finalmente, el uso de motores DC sin escobillas (o sincrónicos de imanes permanentes) en propulsión marítima es actualmente la opción más viable [15], [16], [17].



Figura 9. Embarcación SOLARIS con paneles solares y baterías, Puerto Ayora



Figura 10. Génesis solar con paneles solares y 2 motores de 10 kW

1.5 SISTEMAS DE ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA ELÉCTRICA

El almacenamiento de energía eléctrica (EES) se refiere al proceso de acumulación de energía eléctrica en otra forma de energía de tal manera que pueda, cuando sea necesario, ser reconvertida en electricidad. El EES tiene numerosas aplicaciones como: equipos portátiles, vehículos eléctricos, buques eléctricos, energía renovable, fuentes estacionarias de energía en sistemas de potencia, entre otras.

La idea principal en redes eléctricas es almacenar energía cuando es más barato generarla y entregarla en horas de alta demanda donde el costo de la energía es mayor [18].

Un sistema de almacenamiento tiene por lo menos los siguientes tres componentes:

1. Medio de almacenamiento: Es el reservorio que almacena la energía, por ejemplo una represa de agua a cierta altura, el tanque de combustible, baterías, supercapacitores, entre otros.

2. Sistema de conversión: Es el elemento que transforma la energía eléctrica a la forma en cómo se vaya a almacenar en el medio de almacenamiento, y viceversa. Por ejemplo un conversor AC/DC.
3. Equipos auxiliares: Todos los elementos y equipos auxiliares, como por ejemplo cables de conexión, protecciones, ventilación, etc.

Los EES pueden ser clasificados en dos tipos: i) sistemas con grandes intensidades de potencia pero poca capacidad de almacenamiento de energía y ii) sistemas para gestión de energía, con gran capacidad de almacenamiento pero potencia limitada. Un ejemplo son los supercapacitores y baterías, respectivamente.

1.5.1 COMPARACIÓN ENTRE TECNOLOGÍAS DE ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA ELÉCTRICA

Aunque existe una gran cantidad de otras tecnologías de almacenamiento, como por ejemplo celdas de combustibles, baterías de flujo, entre otras, en este apartado se realizará solamente una comparación entre las tecnologías consideradas dentro del presente trabajo.

En la Figura 11 se puede apreciar los rangos de aplicación de diferentes acumuladores de energía de acuerdo a la capacidad de energía y potencia que pueden almacenar y entregar.

En una lancha tipo taxi el almacenamiento eléctrico es del orden de varios kWh, por lo tanto todas las tecnologías que se encuentran en el lado derecho de la Figura 11, del orden de MWh, no pueden ser utilizadas en esta aplicación. De igual manera la potencia del propulsor es menor a 100 kW, esto conlleva a eliminar las tecnologías de volantes de inercia y superconductores magnéticos.

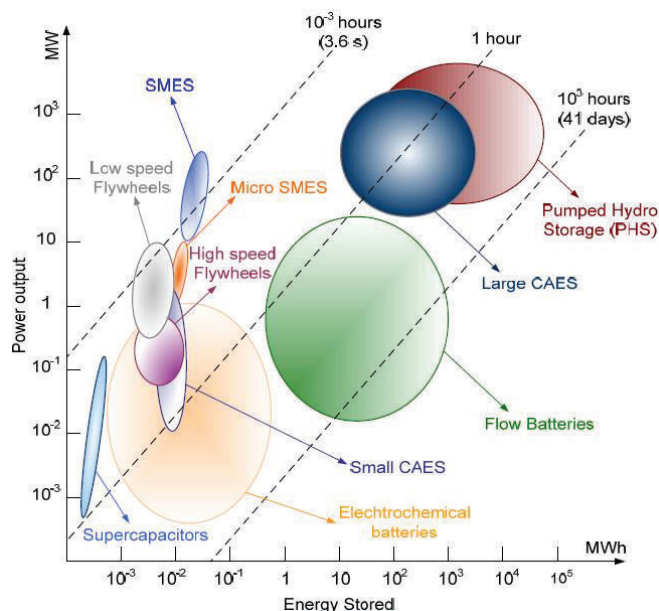


Figura 11. Comparación de tecnologías de almacenamiento acorde a la energía y a la potencia⁸

En la Tabla 1 se comparan las densidades de baterías y supercapacitores. Como se puede apreciar, las baterías tienen una densidad energética muy superior a los supercapacitores, sin embargo, se conoce que la densidad de potencia de un supercapacitor es muy superior a la de una batería, de hecho, se utilizan en la recuperación de energía por ejemplo en vehículos eléctricos.

DESCRIPCIÓN	DENSIDAD ENERGÉTICA [Wh/kg]	DENSIDAD DE POTENCIA [W/kg]
Baterías	50 - 250	75 - 500
Baterías de flujo	15	-
Supercapacitores	5 - 15	10000

Tabla 1. Densidad energética de tecnologías de almacenamiento [19]

Las baterías y los supercapacitores son tecnologías que se pueden utilizar en la movilidad eléctrica marítima, por este motivo se profundiza sobre estas dos tecnologías. En el ANEXO 1 se presenta la terminología necesaria para entender el estudio de baterías y SC.

⁸ Figura obtenida de [18].

1.5.2 BATERÍAS

Una celda electroquímica puede ser modelada como se presenta en la Figura 12. El voltaje interno generado se representa como una celda ideal E_{th} el cual es generado por las reacciones químicas. El voltaje de salida se representa como E_{out} y es el voltaje en terminales.

Existe una impedancia Z_i la cual genera una caída de voltaje y relaciona E_{th} con E_{out} por medio de la ecuación (1.10).

$$E_{out} = E_{th} - Z_i * I_i \quad (1.10)$$

La impedancia Z_i representa la resistencia del electrolito al transporte de iones a través de la batería. Se habla de impedancias y no de resistencia puesto que se puede modelar no solo la resistencia al transporte de iones sino también retardos de tiempo debido a las reacciones químicas.

La impedancia Z_e permite modelar la auto-descarga de una batería. Esta fuga de corriente se debe a que el electrolito permite el paso de una cantidad mínima de electrones I_e .

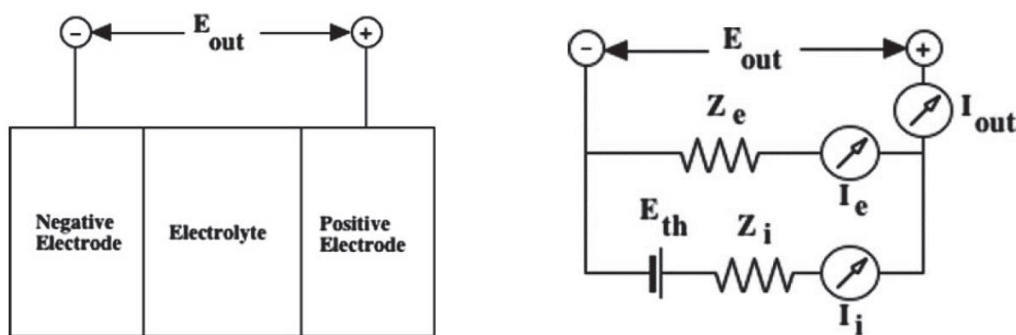


Figura 12. Circuito equivalente simple de una batería⁹

⁹ Figura obtenida de [40].

En este estudio se utilizará la impedancia Z_i en la modelación, sin embargo la impedancia Z_e será despreciada debido a que las baterías tendrán un funcionamiento continuo y la auto-descarga no será un factor importante.

Dentro de las baterías electroquímicas, estas se pueden clasificar en: baterías estándar (batería de plomo ácido, níquel-cadmio), baterías modernas (níquel-metal hidruro, Li-ion, Li-polymer), baterías especiales (Ag-Zn, Ni-H₂), baterías de flujo y baterías de alta temperatura [18].

Las baterías de plomo ácido, alcalinas recargables, Ag-Zn, Ni-H₂ y baterías de flujo, no son adecuadas para esta aplicación por ciertas características relacionadas a la densidad energética, al costo y al ciclo de vida.

Generalmente las baterías desechables presentan mayor densidad energética, menor tasa de auto descarga y son más baratas en comparación a las baterías recargables.

La mayoría de baterías recargables se basan en variaciones de la tecnología de: plomo ácido, níquel y litio, aunque existen a base de zinc y alcalinas recargables. La selección de una tecnología en particular depende del tamaño, peso, ciclo de vida, temperatura de operación y costos. Una comparación de las principales características necesarias para seleccionar una tecnología de baterías se presenta en la Tabla 2.

Las tecnologías que se encuentran dentro del campo de aplicación para movilidad eléctrica marítima son: plomo gel, Ni-MH y litio.

PARÁMETROS	UNIDADES	PLOMO ÁCIDO	NiCd	NiMH	Li-ion	Li- polymer	Li-iron phosphate	Alkalina recargable
Voltaje medio de la celda	V	2	1,2	1,2	3,6	1,8-3,0	3,2-3,3	1,5
Costo relativo	NiCd=1	0,6	1	1,5-2,0				0,5
Resistencia interna		Baja	Muy baja	Media	Alta			
Auto descarga	%/mes	2-4%	12-25%	20-25%	6-10%	18-20%		0,3%
Ciclo de vida	Ciclos hasta el 80% de la capacidad nominal	500-2000	500-1000	500-800	1000-1200		1500-2000	<25
Tolerancia a la sobrecarga		Alta	Media	Baja	Muy baja			Media
Densidad de energía volumétrica	Wh/litro	70-110	100-150	200-350	200-330	230-410	200	220
Densidad de energía gravimétrica	Wh/kg	30-45	40-60	60-80	120-160	120-210	100	80

Tabla 2. Características de baterías recargables [20]

1.5.2.1 Características de baterías

En este apartado se detallan las características que se deben conocer de una batería para poderla simular y optimizar en una aplicación específica. Estas características están detalladas en las hojas técnicas de los fabricantes y varían de una tecnología a otra.

Las características principales son: voltaje nominal, capacidad nominal, máxima corriente de descarga, energía específica y costo específico. Además, es necesario conocer ciertas gráficas o relaciones las cuales se detallan a continuación.

Ciclo de vida en función de la profundidad de descarga

Esta relación es del tipo exponencial decreciente y relaciona el número de ciclos de vida de una batería con la profundidad de descarga (DOD) que se alcanza en la

operación. A mayor DOD menor tiempo de vida de la batería. Esta relación es importante debido a que permite optimizar el sobredimensionamiento del banco de baterías para minimizar los costos del sistema.

Capacidad disponible en función de la temperatura

La capacidad nominal de una batería varía de acuerdo a la temperatura de operación, esta se puede ver reducida o incrementada según la tecnología de la batería.

Capacidad disponible en función del índice de descarga C-rate

Esta relación es del tipo exponencial decreciente y permite calcular los efectos de la magnitud de la corriente de descarga en la capacidad disponible de la batería. Esta relación es importante ya que si se alcanzan valores elevados de C-rate la capacidad nominal decrece exponencialmente.

En el ANEXO 2 se detallan las características antes mencionadas para las baterías de plomo gel, Ni-MH y litio. Estas características son obtenidas de los fabricantes y serán las que se utilicen en el capítulo 3 del presente trabajo para la simulación y optimización del sistema de almacenamiento.

1.5.3 SUPERCAPACITORES

Una de las principales diferencias entre las baterías y los supercapacitores es la energía específica y la densidad de potencia. Los supercapacitores presentan una energía específica menor a la de las baterías, sin embargo tienen una densidad de potencia sumamente mayor, Figura 13.

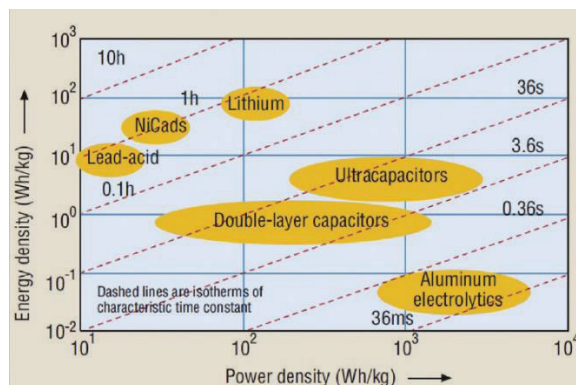


Figura 13. Densidad de energía y densidad de potencia de baterías y supercapacitores¹⁰

Suponiendo un circuito como el mostrado en la Figura 14, las ecuaciones (1.11 y 1.12) gobiernan la carga del supercapacitor para voltaje y corriente, respectivamente.

$$v(t) = V_{in} \left[1 - e^{\left[\frac{-t}{RC} \right]} \right] \quad (1.11)$$

$$i(t) = \frac{V_{in}}{R} e^{\left[\frac{-t}{RC} \right]} \quad (1.12)$$

La resistencia R representa la resistencia en serie equivalente (ESR) del capacitor, resistencia de cables, conexiones y otros. El voltaje de la fuente V_{in} es un voltaje DC constante.

Como se puede apreciar en las dos anteriores ecuaciones la carga depende de RC , la cual se conoce como constante del tiempo $\tau = RC$. En la Figura 15 a) se grafica las curvas de carga para voltaje y corriente.

Las ecuaciones (1.13 y 1.14) gobiernan la descarga del supercapacitor para voltaje y corriente.

$$v(t) = V_f e^{\left[\frac{-t}{RC} \right]} \quad (1.13)$$

$$i(t) = -\frac{V_f}{R} e^{\left[\frac{-t}{RC} \right]} \quad (1.14)$$

¹⁰ Figura obtenida de [20].

Donde: V_f = Voltaje inicial del capacitor antes de la descarga.

En la Figura 15 b) se grafica las curvas de descarga para voltaje y corriente.

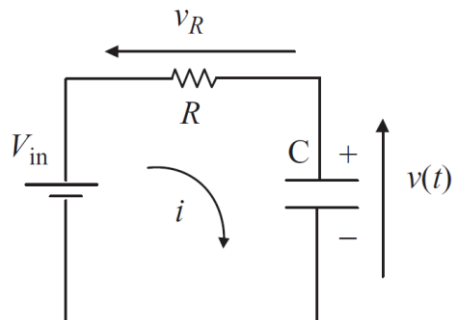


Figura 14. Circuito general para cargar un supercapacitor¹¹

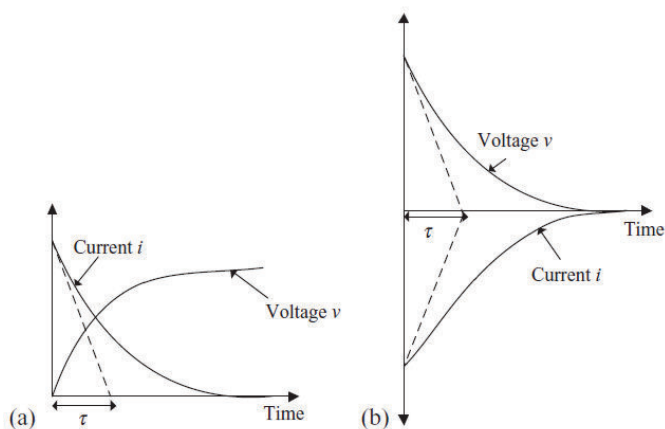


Figura 15. Comportamiento de un capacitor, a) proceso de carga, b) proceso de descarga¹²

La energía almacenada por un capacitor se calcula con la ecuación (1.15).

$$E = \frac{1}{2} CV^2 \quad (1.15)$$

Es importante destacar que si el capacitor es cargado desde 0 V hasta el voltaje nominal, el capacitor almacena una energía de $\frac{1}{2} CV^2$, y la resistencia disipa una

¹¹ Figura obtenida de [20].

¹² Figura obtenida de [20].

cantidad igual de energía, es decir, la eficiencia de carga es del 50%. Si el voltaje inicial del capacitor no es 0 V, la eficiencia es superior.

En la Figura 16 se detalla la energía almacenada en un capacitor y la energía disipada en la resistencia en el proceso de carga de un capacitor. Como se puede apreciar, primero se disipa la energía en la resistencia y luego se almacena en el capacitor, es por este motivo que para maximizar la eficiencia de carga es conveniente no descargar el capacitor a 0 V.

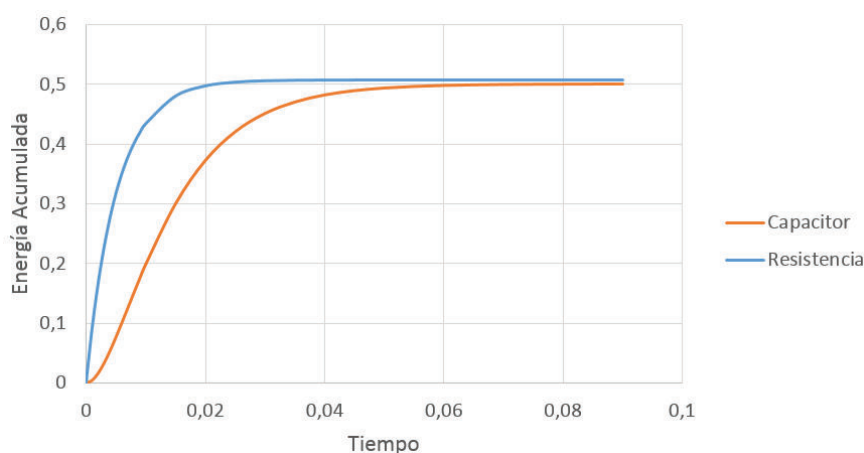


Figura 16. Energía utilizada para cargar un capacitor y energía disipada en la resistencia

En la Figura 17 a) se presenta el circuito equivalente de un capacitor y en la Figura 17 b) se detalla un circuito simplificado. ESL es la inductancia en serie equivalente y ESR es la resistencia en serie equivalente, esta última comprende la resistencia del cableado, de los electrodos y de los terminales. Estos parámetros son importantes cuando la aplicación es en alta frecuencia o alto voltaje. Las resistencias R_{ac} y R_{dc} representan las pérdidas en el dieléctrico para corrientes AC y DC, respectivamente. Estos parámetros son importantes en circuitos de precisión como integradores.

En este estudio se utilizará la resistencia ESR para cuantificar las pérdidas en el proceso de carga y descarga del SC.

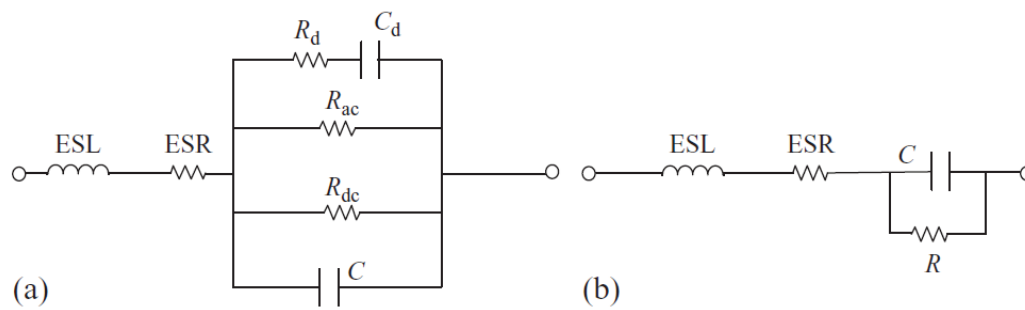


Figura 17. a) Circuito equivalente de un supercapacitor, b) circuito equivalente simplificado¹³

En el ANEXO 3 se detallan las características principales para los supercapacitores. Estas características son obtenidas de los fabricantes y serán las que se utilicen en el capítulo 3 del presente trabajo para la simulación y optimización del sistema de almacenamiento.

¹³ Figura obtenida de [20].

CAPÍTULO 2. MOVILIDAD MARÍTIMA EN PUERTO AYORA – GALÁPAGOS

El transporte se reconoce como una actividad de suma importancia debido a que permite el desarrollo del comercio, la industria, el crecimiento económico y social. Sin embargo tiene efectos negativos sobre el medio ambiente, la salud humana y el clima. En general, el transporte representa más del 50% del consumo de combustibles fósiles a nivel mundial y genera en torno al 13% de los gases de efecto invernadero [29]. En el presente capítulo se desarrolla la importancia de la eficiencia energética en el transporte, específicamente del sector marítimo. Además, se detalla la operación de lanchas taxis en Puerto Ayora.

2.1 ENERGÍA EN MOVILIDAD MARÍTIMA

A nivel mundial, el 39,9% de la energía es proveniente del petróleo, el 63,8% de este se destina al transporte. El sector marítimo representa el 9,5% de la energía consumida en el transporte [30], [31].

Cabe mencionar que en el sector marítimo se encuentra tanto el transporte de pasajeros como el de carga, este último representa la mayor cantidad de consumo de combustible en el sector. Para tener una idea, del total de transporte de carga, el 81,5% se realiza por navegación, el resto terrestre y aéreo. En el transporte de pasajeros tan solo el 0,3% se lo realiza por navegación [31].

La eficiencia energética en el sector marítimo es de suma importancia ya que el 56,8% del transporte se lo realiza por este medio, especialmente el transporte de carga [31].

En el Ecuador, el sector transporte representa el 42% del consumo de energía y el sector marítimo el 8%, ver Figura 18 [32].

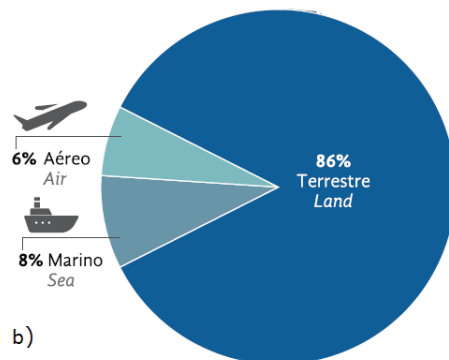


Figura 18. Consumo de energía del sector transporte clasificado por sectores, Ecuador [32]

2.2 LANCHAS TAXIS EN PUERTO AYORA – GALÁPAGOS

En la actualidad, los viajeros que llegan a las islas Galápagos lo hacen a través del Aeropuerto de Baltra y San Cristóbal, estas personas emplean pequeñas barcasas y lanchas taxi de fabricación rudimentaria que utilizan combustibles fósiles para trasladarse entre las islas, así como para efectuar el cabotaje hacia las grandes embarcaciones de turismo que operan en el Archipiélago [33].

De acuerdo a (Guyot-Téphany J, C Grenier, E Cléder and D Orellana) [34] las lanchas de cabotaje han reemplazado a las embarcaciones grandes de transporte público y actualmente no se conoce con precisión el número de lanchas que se dedican a esta actividad, aunque de acuerdo a (GNPS, GCREG, CDF, and GC) [35] se estimó la existencia de 44 lanchas de cabotaje operativas [33].

El uso de lanchas pequeñas trae consigo problemas ambientales. “La contaminación de las aguas se produce por el uso de combustibles en embarcaciones de cabotaje,

turística, taxis acuáticos y lanchas que transportan pasajeros inter isla.” (INER, 2013) [33].

El transporte marítimo en Galápagos es el principal medio utilizado para el traslado de pasajeros, así como también para movilizar la carga de los productos de consumo y de otros que cubren las necesidades de la población. El incremento de los residentes temporales y turistas han impulsado un desarrollo económico importante que se ha visto reflejado en una mayor demanda de los servicios y mercancías [33].

El presente estudio se centra en las lanchas que prestan el servicio de taxis en Santa Cruz, en la provincia de Galápagos – Ecuador. Estas operan en Puerto Ayora, en Bahía Academia. En la Figura 19 se presenta la ubicación geográfica, además se detalla el límite de operación de las lanchas taxis [14].

La distancia máxima de operación permitida es de 5 millas náuticas, la velocidad máxima permitida es 10 nudos y el horario de operación es de 24 horas [14].

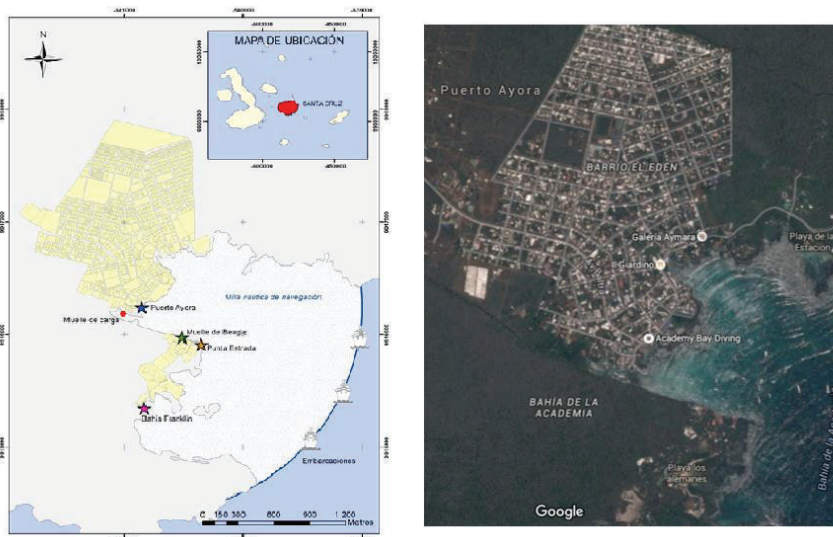


Figura 19. Ubicación geográfica de la operación de lanchas taxis en Puerto Ayora

Actualmente existen 2 cooperativas de lanchas taxis, Los Flamings y Charles Darwin, cada una cuenta con 12 unidades [14].

Las embarcaciones trabajan aproximadamente de 07h00 a 18h30. Luego de este horario operan solamente dos lanchas, una de cada cooperativa. Estas lanchas no operan con horarios, sino que lo hacen cuando existe demanda de los pasajeros.

En la Figura 20 se presenta una fotografía de las lanchas taxis en el lugar de operación.

Como ejemplo, en la Tabla 3 se presentan las especificaciones de las lanchas tipo taxi de acuerdo al “certificado de arqueo avalúo y clasificación” de una embarcación. Se especifica la eslora, la manga y el puntal, sin embargo la forma del casco se detalla en la siguiente sección. Un dato importante es la capacidad de pasajeros que puede llevar la embarcación, este dato permite dimensionar el motor eléctrico.

Las lanchas taxis cuentan con motores a gasolina de 4 tiempos en su mayoría y algunos de 2 tiempos. La potencia es de 40 y 50 HP, este último siendo el más utilizado, de marca Yamaha modelo F50A [14].

A fin de determinar la cantidad de combustible utilizado, se realizaron encuestas directamente a las personas que navegan las embarcaciones. De acuerdo a estas encuestas se tiene como resultado que:

- i) Las embarcaciones gastan aproximadamente \$35 de gasolina extra cada 4 o 5 días, más \$5 del transporte de la gasolina [14]. Este valor será verificado posteriormente con los GPS y su resultado de distancia diaria recorrida. El costo de la gasolina en la región insular es igual al precio en el continente, \$1,48.
- ii) Cada 15 días cambian 2 litros de aceite y filtro, el costo de aceite 10W30 es \$7 por litro y \$5 el filtro genérico. El filtro original cuesta entre \$15 y \$18. El filtro de gasolina se cambia cada mes, cuesta \$2,50 [14].



Figura 20. Lanchas taxis en Puerto Ayora

CARACTERÍSTICAS DE LA NAVE	
Tipo	Transbordador
Material del casco	Fibra de vidrio
ARQUEO	
Eslora	7,5 m
Manga	1,8 m
Puntal	0,9 m
Tonelaje de registro bruto	2,59 ton
Tonelaje de registro neto	0,78 ton
CLASIFICACIÓN	
Uso	Público
Servicio	Carga y pasaje
Propulsión	Mecánica
Capacidad de tripulantes	2
Capacidad de pasajeros	16
Avalúo	\$10100

Tabla 3. Características técnicas de una lancha tipo taxi de Puerto Ayora

2.2.1 CASCOS DE LANCHAS TAXIS EN PUERTO AYORA – GALÁPAGOS

El INER realizó el diseño de un casco eficiente, Figura 21, el cual presta los mismos servicios de las embarcaciones que actualmente operan como taxis. La eslora total es de 7,5 m, la manga máxima de 1,8 m y el puntal de sección media es 0,89 m.

En este estudio se utilizará este casco para el cálculo de la potencia necesaria en el motor.

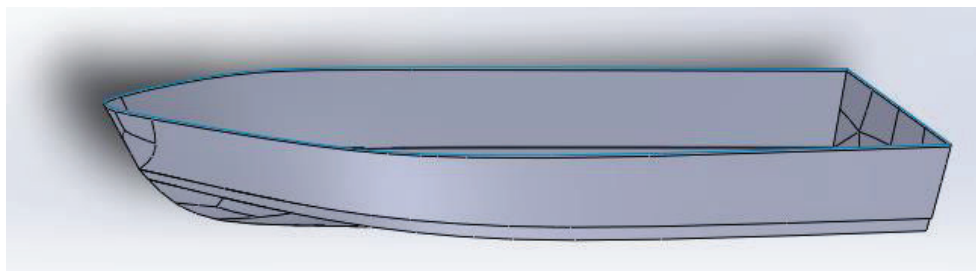


Figura 21. Modelo 3D del casco de la embarcación diseñada por el INER

2.2.2 RUTAS DE OPERACIÓN

Para determinar las rutas de operación de lanchas tipo taxis se ha seleccionado 5 lanchas de cada una de las dos cooperativas. Se instalaron dispositivos de posicionamiento global (GPS) por parte del INER con el fin de medir la velocidad, la distancia, las rutas, las horas de operación, entre otras. En la Tabla 4 se presentan los nombres de las embarcaciones de cada cooperativa que se han usado para la instalación de GPS.

La comunicación se realiza por conexión GPRS y se almacena en un portal web. La descarga de datos se realiza cada 15 días para que no exista pérdida de información. La precisión de los GPS es de 2,5 metros y la frecuencia de muestreo varía de 1 a 30 segundos [14]. El periodo de medición y análisis es desde el 22 de mayo de 2015 hasta el 31 de diciembre de 2015.

Cooperativa Charles Darwin	Cooperativa Los Flamings
JoeAndre	El Patucho
Joel	Elenita
Nayely	Esperanza
Tauro	Marlin
Viviana II	McQueen

Tabla 4. Lanchas taxis para la instalación de GPS [14]

Los datos registrados son: fecha, hora, latitud, longitud, velocidad, odómetro y distancia relativa. En el tratamiento de los resultados fue necesario realizar filtros para excluir datos erróneos, comprobar el registro del odómetro calculando la distancia entre coordenadas, esto debido a que se registran pequeñas distancias al estar la embarcación fondeada y analizar estadísticamente las series temporales. Los resultados obtenidos se muestran a continuación.

2.2.3 DISTANCIA DIARIA RECORRIDA

En la Figura 22 se presenta la frecuencia relativa y acumulada de la distancia diaria recorrida. Como se puede apreciar, el 80% de la distancia recorrida corresponde a 28 km y el 90% a 32 km. Estas distancias determinan el tamaño de la acumulación necesaria sobre la lancha. La media aritmética de la distancia diaria es 17,8 km.

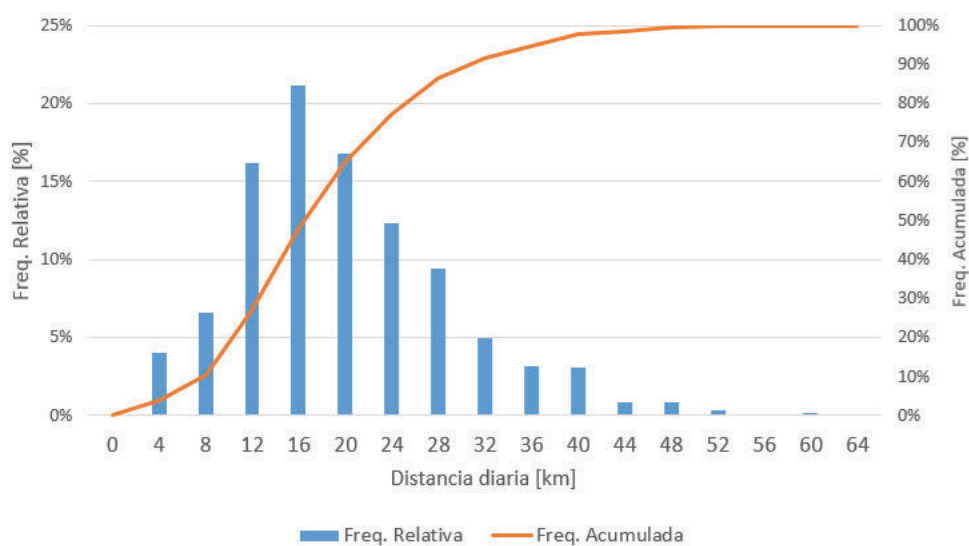


Figura 22. Frecuencia relativa y acumulada de la distancia diaria recorrida de lanchas tipo taxis

2.2.4 VIAJES DIARIOS

En la Figura 23 se presenta la frecuencia relativa y acumulada del número de viajes diarios de lanchas tipo taxis. Como se puede apreciar, el 80% del tiempo el número de viajes diarios es inferior a 30. La media aritmética es de 21 viajes diarios por lancha.

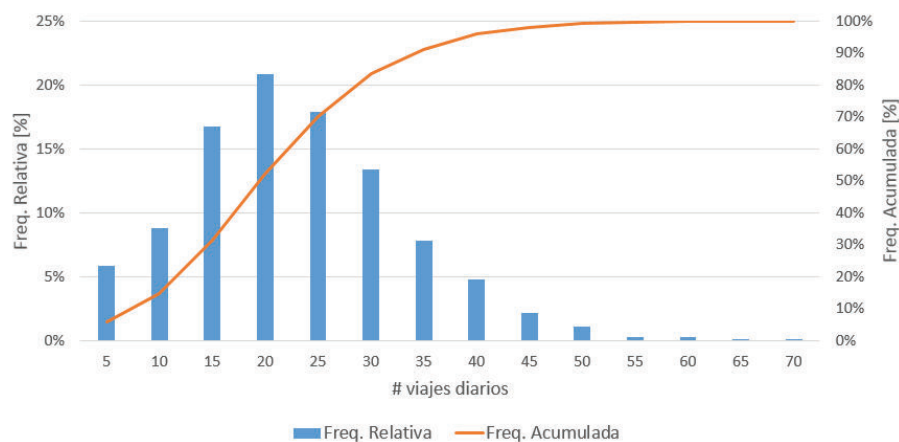


Figura 23. Frecuencia relativa y acumulada del número de viajes diarios de lanchas tipo taxis

2.2.5 DISTANCIA POR RECORRIDO

En la Figura 24 se presenta la frecuencia relativa y acumulada de la distancia recorrida en cada viaje por las lanchas tipo taxis. Como se puede apreciar, el 80% de los viajes tienen una distancia inferior a 1 km. La media aritmética es de 0,73 km por viaje.

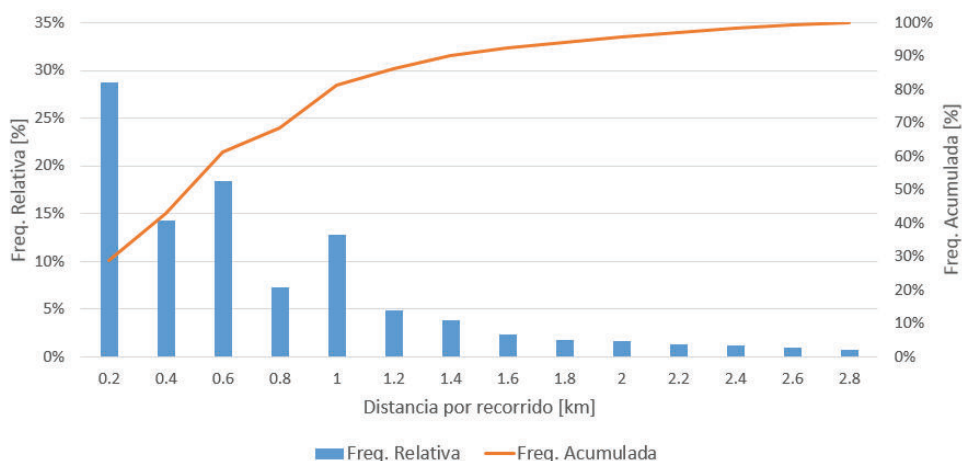


Figura 24. Frecuencia relativa y acumulada de la distancia por recorrido de lanchas tipo taxis

2.2.6 TIEMPO POR RECORRIDO

En la Figura 25 se presenta la frecuencia relativa y acumulada del tiempo utilizado en cada viaje o recorrido por las lanchas tipo taxis. Como se puede apreciar, el 80% de los viajes tienen una duración inferior a 9 minutos. La media aritmética es de 6 minutos con 20 segundos.

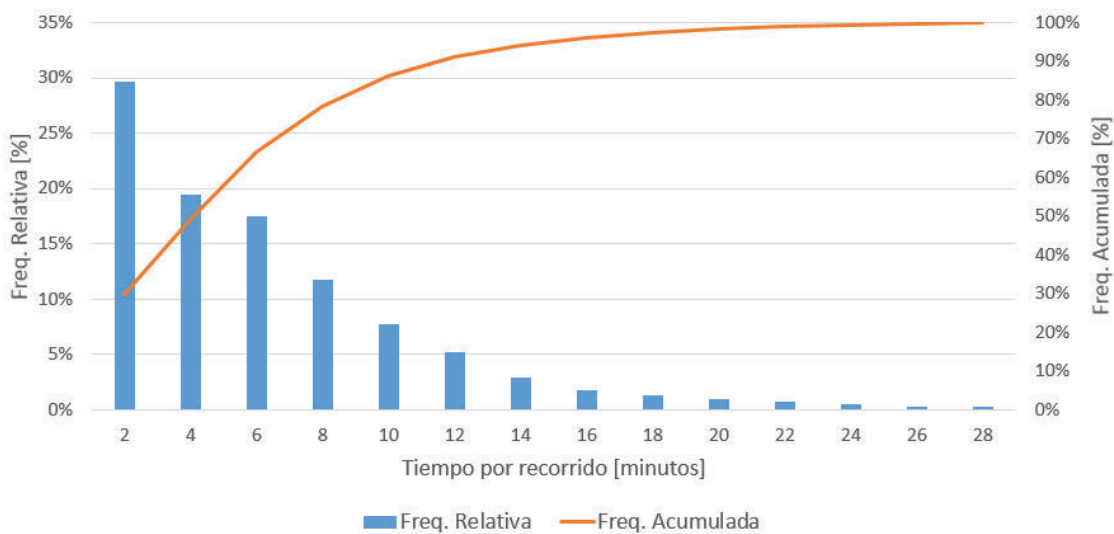


Figura 25. Frecuencia relativa y acumulada del tiempo por recorrido de lanchas tipo taxis

2.2.7 TIEMPO ENTRE RECORRIDOS

En la Figura 26 se presenta la frecuencia relativa y acumulada del tiempo de espera entre viajes o recorridos por las lanchas tipo taxis. Como se puede apreciar, el 80% del tiempo entre viajes es inferior a los 30 minutos. La media aritmética es de 26 minutos.

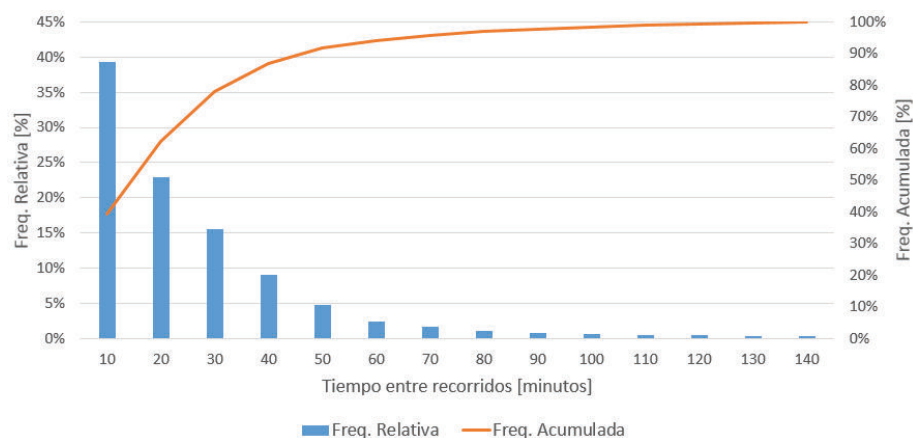


Figura 26. Frecuencia relativa y acumulada del tiempo entre recorridos de lanchas tipo taxis

2.2.8 VELOCIDAD DE NAVEGACIÓN

En la Figura 27 se presenta la frecuencia relativa y acumulada de la velocidad de navegación de las lanchas tipo taxis. Como se puede apreciar, el 80% del tiempo las lanchas navegan a una velocidad inferior a 10 km/h. Esta velocidad permite calcular la potencia del motor eléctrico para impulsar la embarcación. La media aritmética es de 6,9 km/h.

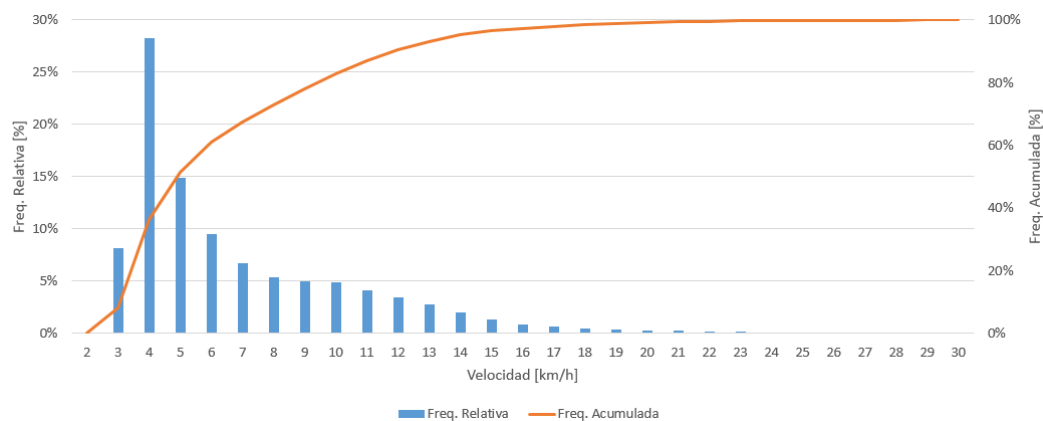


Figura 27. Frecuencia relativa y acumulada de la velocidad de navegación de lanchas tipo taxis

2.2.9 VIAJES POR HORA DEL DÍA

En la Figura 28 se presenta la frecuencia relativa del número de viajes por hora del día de las lanchas tipo taxis. Se concluye de este gráfico que no existe una hora preferencial en la cual hay mayor demanda de viajes, solo se puede concluir que desde las cero horas hasta las 6 de la mañana los viajes son bastante reducidos, es por esta razón que solo trabajan 2 taxis en estos horarios.

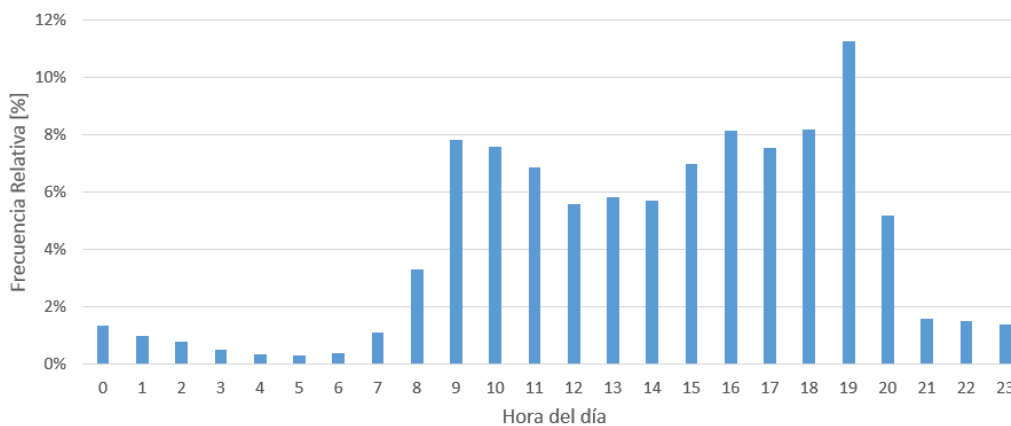


Figura 28. Frecuencia relativa del número de viajes por hora del día de lanchas tipo taxis

2.2.10 VELOCIDAD TÍPICA EN UN RECORRIDO

En la Figura 29 se presenta la frecuencia relativa y acumulada de las velocidades de navegación en un viaje o recorrido prototipo de las lanchas tipo taxis. La frecuencia relativa de la velocidad es la información importante ya que permitirá determinar la energía promedio consumida en un viaje. Se puede concluir también que en muy pocas ocasiones la embarcación supera los 16 km/h.

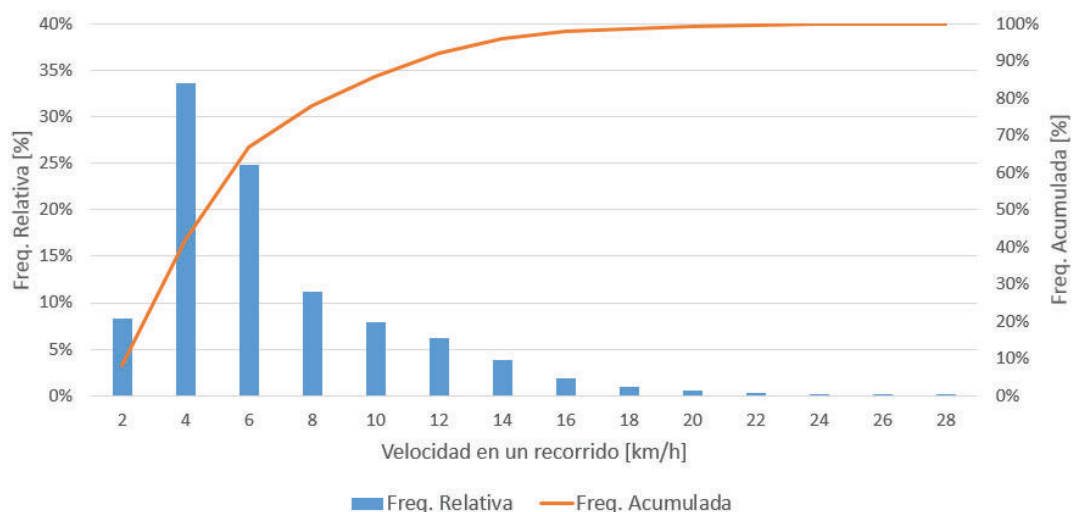


Figura 29. Frecuencia relativa y acumulada de la velocidad de navegación en un viaje prototipo de lanchas tipo taxis

2.2.11 RUTAS DE OPERACIÓN

A manera de ejemplo, en la Figura 30 se presentan algunos de los recorridos realizados por una embarcación en un tiempo determinado. De aquí cabe resaltar que los viajes no son de gran distancia y que se encuentran dentro de Bahía Academia.

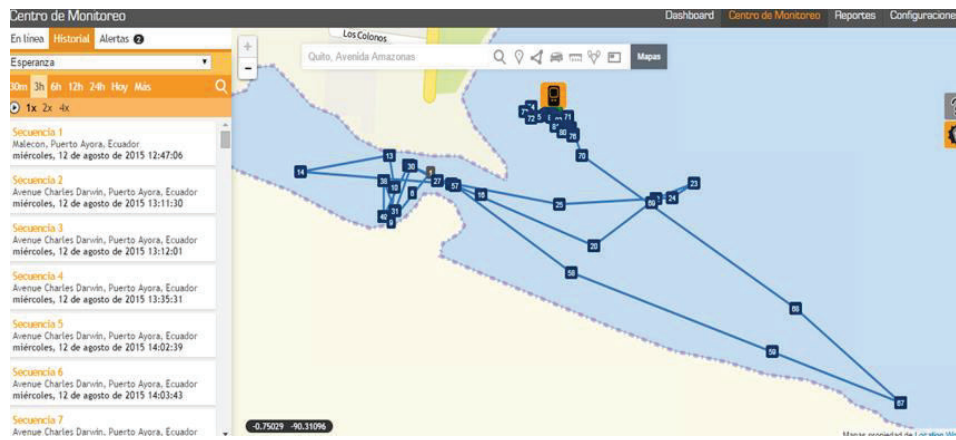


Figura 30. Rutas de operación de lanchas taxis en Puerto Ayora

CAPÍTULO 3. DISEÑO Y SIMULACIÓN DE LA PROPULSIÓN ELÉCTRICA Y EL SISTEMA DE ALMACENAMIENTO

El objetivo de este capítulo es dimensionar y simular el sistema de propulsión. En la sección 3.1 se dimensiona el motor eléctrico. En la sección 3.2 se establecen curvas de operación representativas de las lanchas taxis con el objetivo de posteriormente calcular el sistema de almacenamiento. En la sección 3.3 se simula el sistema de almacenamiento con baterías (plomo gel, Ni-MH y litio) para un día completo de operación. En la sección 3.4 se simula el sistema almacenamiento con baterías (plomo gel, Ni-MH y litio) para un viaje de operación. En la sección 3.5 se simula el sistema de almacenamiento con supercapacitores para un viaje de operación. En la sección 3.6 se simula el sistema de almacenamiento híbrido (baterías y SC) para un viaje de operación. Cada una de estas configuraciones tendrá como resultado un punto óptimo de operación, el objetivo final es obtener el sistema más económico, ver Figura 31.

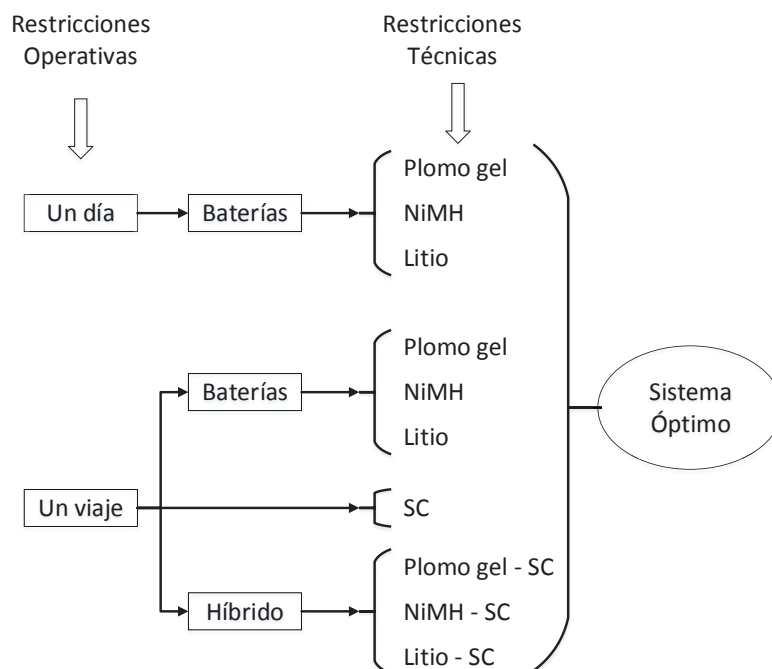


Figura 31. Metodología de optimización para propulsión eléctrica en lanchas taxis.

3.1 MOTOR ELÉCTRICO PARA PROPULSIÓN

El dimensionamiento del motor eléctrico para la propulsión depende principalmente de la forma del casco de la embarcación, de la velocidad a la que se desea navegar y del peso que va a transportar [4].

Las formas del casco de la embarcación están definidas con el modelo mostrado en la sección 2.2.1. Dado que el diseño del casco ya está definido, se calcula la curva de velocidad que relaciona la potencia con la velocidad y el peso, es decir $P = f(V, W)$ donde P es potencia, V velocidad y W peso.

El rango de velocidad se define de 0 a 18 km/h de acuerdo al percentil 99 de los datos de la Figura 27. El peso de la embarcación varía desde 1600 kg hasta 3000 kg.

Para el cálculo de la relación de potencia se utilizó el método de “Holtrop” debido a que es el recomendado para embarcaciones de carga general [4], sin embargo, para el cálculo de la potencia del motor eléctrico es necesario incluir la eficiencia de la hélice, la transmisión y el propio motor eléctrico. La eficiencia de la hélice varía entre 60-70%, el de la transmisión entre 94-96% y la del motor eléctrico entre 80-95% [1]. La eficiencia total se estima en 50% [12] [13].

De acuerdo a estas consideraciones, se calculó la potencia en función de la velocidad y el peso (ecuaciones 1.2 a 1.9). En la Figura 32 se presenta dicha curva, los puntos de color negro detallan los valores calculados por el método de “Holtrop”. La curva tridimensional representa la regresión polinómica de orden: 3 para la velocidad y 1 para el peso, ver ecuación (3.1).

$$P = -1,636 + 1,112 V + 0,0008027 W - 0,1372 V^2 - 0,0005103 V * W + 0,00467 V^3 + 5,345E - 5 V^2 * W \quad (3.1)$$

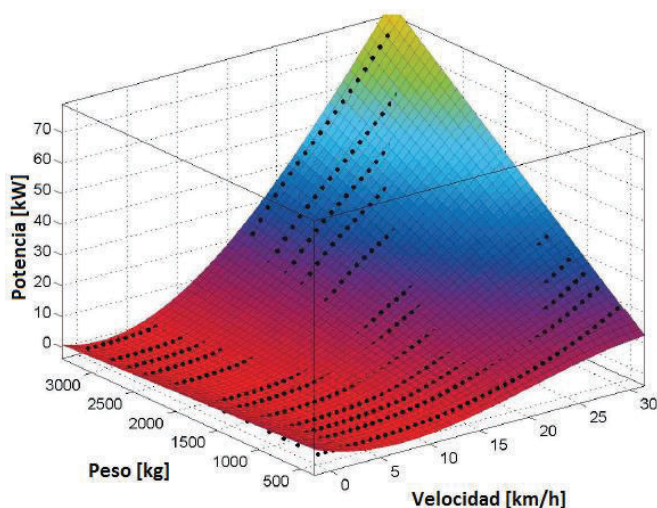


Figura 32. Curva de potencia en función de la velocidad y el peso

De las mediciones hechas en las actuales lanchas-taxis se obtuvo que para cumplir el 90% de las necesidades de velocidad se necesita alcanzar como mínimo 14 km/h, para el 80% 10 km/h y la media de 7 km/h. El peso de la embarcación sin motor, ni baterías, ni personas es de 800 kg [14]. La embarcación estará llena cuando existen 16 personas y un tripulante. Asumiendo un peso medio de una persona de 75 kg el peso de los viajeros es de 1275 kg. El peso del motor se asume en 160 kg y el peso de las baterías se lo debe añadir. Tomando en cuenta que la embarcación no siempre navega a su máxima capacidad ni a su máxima potencia, el peso varía entre 1650 kg y 2235 kg.

En la Tabla 5 se presenta el cálculo de la potencia del motor eléctrico para cada una de las condiciones descritas en el párrafo anterior. Para atender el 90% de las necesidades operativas de las embarcaciones se necesita un motor entre 7 y 9,5 kW. En el mercado marítimo existen motores de 5, 6, 8 y 10 kW [13], **por lo que se escoge al motor de 8 kW como el sistema propulsor de la embarcación tipo taxi.**

El peso de este motor es de 80 kg [13] y afecta de forma mínima el rendimiento puesto que se estimó anteriormente un peso de 160 kg para el mismo.

Velocidad \ Peso	14	10	7
1650	7	2,5	0,8
2250	9,5	3,1	0,9

Tabla 5. Potencia [kW] del motor eléctrico para diferentes velocidades [km/h] y pesos [kg].

3.2 CURVA DE OPERACIÓN REPRESENTATIVA DE LANCHAS TAXIS

Existen dos formas en las que se puede dimensionar el sistema de almacenamiento, la primera para una sola recarga diaria y que el almacenamiento dure para la operación de todo el día, y la segunda para que se pueda cargar en los momentos en que los taxis se encuentran fondeados esperando el turno de operación.

Para el primer caso se debe asegurar que la energía del sistema de almacenamiento cumpla al menos el 90% de las necesidades de distancia diaria recorrida, Figura 22. En el segundo caso, el sistema de almacenamiento debe suministrar la energía para recorrer al menos un viaje de 1,6 km, este valor es el 90% de la frecuencia acumulada de la Figura 24.

Curva de operación diaria

Se debe obtener dos series temporales con una duración de 24 horas, la primera tiene un número de viajes medio, 21 viajes, y la segunda el percentil 90, 33 viajes.

La metodología seleccionada es una combinación aleatoria que cumpla estadísticamente las condiciones medidas en la sección 2.2, esto es debido a que los viajes no siempre son los mismos, es decir, varían en distancia, tiempo, etc. Las variables aleatorias son: i) el tiempo por recorrido, siguiendo una distribución exponencial como se aprecia en la Figura 25, sección 2.2.6 y ii) el tiempo entre recorrido, siguiendo una distribución exponencial de acuerdo a la Figura 26, sección 2.2.7. La distribución de velocidades de un viaje se toma exactamente como está en

la Figura 29. Se itera el modelo hasta que la distancia diaria recorrida sea igual a la media aritmética o al percentil 90.

En la Figura 33 se presenta la curva diaria de operación para recorrer la distancia media con 21 viajes diarios, esta serie temporal permite simular el comportamiento del sistema de almacenamiento a lo largo del tiempo, por ejemplo 1, 5 o 10 años, dependiendo de las necesidades. La resolución de esta gráfica es cada 0,1 minutos, es decir 6 segundos.



Figura 33. Curva representativa diaria de operación para recorrer la distancia media

En la Figura 34 se presenta la curva diaria de operación para recorrer el percentil 90 de la distancia con 33 viajes diarios. Esta serie temporal sirve para calcular el sistema de almacenamiento para un día completo de operación sin recargas intermedias.



Figura 34. Curva diaria de operación para recorrer el percentil 90 de la distancia

Curva de operación de un viaje

Por otra parte, se obtuvo una gráfica de la velocidad para un viaje de 1,6 km de distancia. Esta gráfica sirve para dimensionar el sistema de almacenamiento en el caso que se recargue cuando la embarcación se encuentra fondeada. Para esto es necesario ajustar la Figura 24 para que la distancia recorrida en un viaje cumpla el percentil 90 como se presenta en la Figura 35.

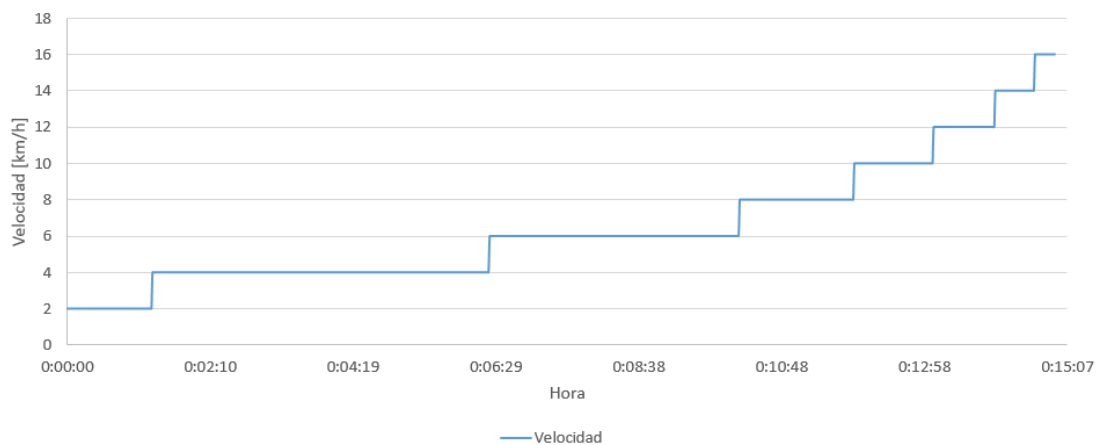


Figura 35. Serie temporal de velocidad para un viaje de 1,6 km de distancia

3.3 DIMENSIONAMIENTO Y SIMULACIÓN DEL SISTEMA DE ALMACENAMIENTO CON BATERÍAS PARA UN DÍA

En esta sección se dimensiona, simula y optimiza el sistema de almacenamiento netamente con **baterías**, comparando las baterías de plomo gel, Ni-MH y litio. El dimensionamiento se hace suponiendo que el almacenamiento debe proporcionar la energía para un **día completo** de operación con una sola recarga.

El diagrama propuesto para el sistema de propulsión con baterías de una embarcación eléctrica se presenta en la Figura 36. A continuación se detalla su configuración:

- “Pm” representa la potencia eléctrica que se debe entregar al motor eléctrico para navegar con un determinado peso y a una determinada velocidad.
- La potencia de entrada al inversor “Pinv” se relaciona con “Pm” por medio de la eficiencia del inversor.
- “Rint” es la resistencia interna de la batería.
- “Emin” es la energía mínima necesaria para el banco de baterías.
- “Iinv” es la corriente en amperios que pasa por la resistencia y llega al inversor, hay que notar que es corriente continua y que en el inversor se convierte a corriente alterna.

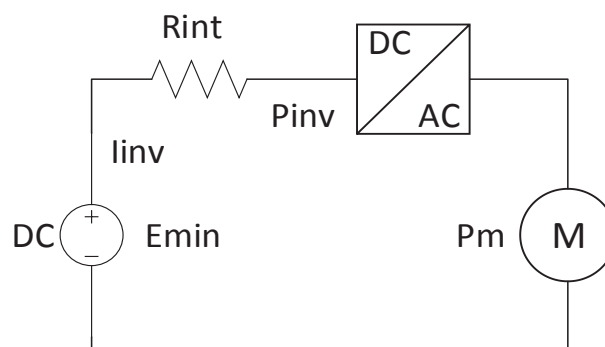


Figura 36. Esquema general propuesto para la simulación del sistema de propulsión eléctrico con baterías

3.3.1 METODOLOGÍA

La metodología planteada para la simulación se sintetiza en el diagrama de flujo de la Figura 37 y se basa en el esquema de la Figura 36. A continuación se detalla esta metodología:

- En los datos de entrada se encuentra: i) la curva diaria de velocidad, media y máxima, ii) peso inicial, 1600 kg, iii) voltaje de operación del motor, 48V [12] [13], iv) eficiencia del inversor, 85%, v) resistencia interna de la batería, Ω , vi) factor que aumenta o disminuye la capacidad a 28 °C, %, vii) densidad específica de la batería, Wh/kg y viii) el costo unitario \$/Wh.
- La simulación se ejecuta variando la DOD desde 1% hasta 100% debido a que, a menor DOD, mayor cantidad de ciclos de vida. La optimización se obtiene con la configuración que consiga el menor costo anual.
- El lazo while se ejecuta hasta que el error sea inferior a 1%. Este error relaciona la energía nominal de las baterías en la iteración “i” y en la iteración “i-1”. Este proceso iterativo se realiza debido a que si el peso de las baterías aumenta la energía necesaria también aumenta, y así sucesivamente hasta que el error entre iteración sea mínimo.
- La potencia del motor “Pm” se calcula con la ecuación (3.1). El peso es un dato de entrada y cambia en cada iteración porque se añade el peso de las baterías. La velocidad es el vector de la serie temporal de la Figura 33 para una distancia media.
- La potencia antes del inversor, Pinv, se calcula con la eficiencia del inversor.
- La energía mínima de las baterías, Emin, se calcula con: la potencia antes del inversor, las pérdidas en la Rint de la batería, la temperatura de operación y el índice de descarga C-rate. Estos datos son característicos de cada tipo de tecnología de baterías.
- La energía nominal de la batería se calcula con la energía mínima y la DOD.
- Para finalizar el lazo while, se calcula el peso de las baterías en la iteración “i” y se calcula el error con la iteración “i-1”.

- Cuando se termina de ejecutar el lazo while, se tiene como restricción que la energía disponible del banco de baterías debe ser mayor a la energía necesaria en un día con distancia percentil 90 (Figura 34).
- Los resultados incluyen principalmente: la energía nominal de las baterías, el índice de descarga C-rate, la energía disponible de las baterías, el costo de las baterías, el número de ciclos de vida, el costo anual de la batería, el costo anual de la energía (0,092 \$/kWh [36]) y el costo total.

Con la tabla de resultados se puede obtener el sistema de almacenamiento que menor costo anual presente, es decir, el sistema óptimo. Sin embargo, existen algunas restricciones que se deben tomar en cuenta y que son las siguientes:

- La caída de voltaje en la resistencia entre la batería y el inversor se recomienda que no sea superior al 5% de 48V, es decir 2,4V.
- El peso de las baterías en ningún caso podrá ser superior a la capacidad total de la embarcación, de hecho, debe ser sumamente inferior. La capacidad máxima de la embarcación es de alrededor de 2000 kg [14].
- El C-rate de descarga debe ser inferior al máximo recomendado para cada tipo de tecnología de baterías.

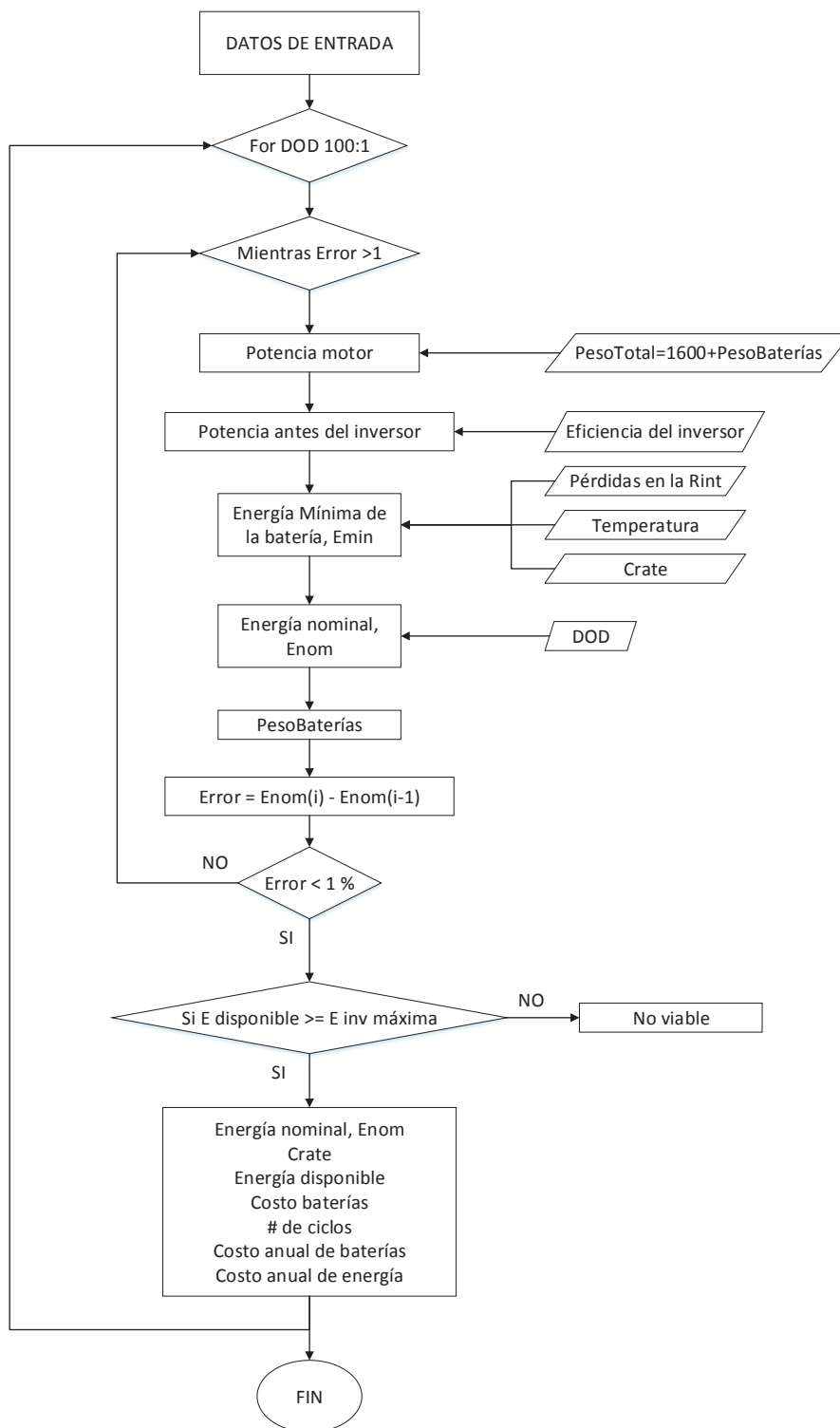


Figura 37. Metodología para la optimización del sistema de almacenamiento con baterías

3.3.2 BATERÍAS DE PLOMO

En esta sección se simula las baterías de plomo gel para un día completo de operación de acuerdo a la metodología de la sección 3.3.1.

3.3.2.1 Datos de entrada

Los datos de entrada se obtienen de la sección de baterías de plomo del ANEXO 2. La resistencia interna, para un voltaje de 48V, se presenta en la Figura 38. Como se verá posteriormente la energía mínima necesaria para un día completo de trabajo es de 4,4 kWh para una DOD del 100%. Como se estima que la DOD será inferior, la resistencia interna se estima como constante con un valor de 0,01 Ω .

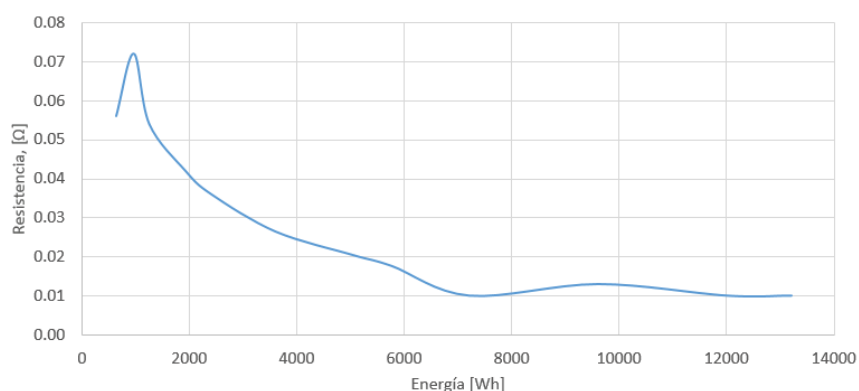


Figura 38. Resistencia interna de baterías de plomo gel en función de la energía nominal [21]

La profundidad de descarga, DOD [por unidad de 0 a 1], se relaciona con el número de ciclos de la batería de plomo por la ecuación (3.2), esta ecuación es resultado de una regresión del tipo exponencial doble de la Figura 67.

$$NumeroCiclos = 8520 * e^{-8,061 * DOD} + 3056 * e^{-2,075 * DOD} \quad (3.2)$$

El índice de descarga, C-rate, se relaciona con la capacidad [por unidad de 0 a 1] de la batería de plomo por la ecuación (3.3), esta ecuación es resultado de una regresión del tipo exponencial doble de la Figura 69.

$$\text{Capacidad} = 0,513 * e^{-4,3 * \text{Crate}} + 0,6115 * e^{-0,1623 * \text{Crate}} \quad (3.3)$$

3.3.2.2 Resultados

Los resultados de la simulación para una DOD desde 100% hasta 1% se presenta en el ANEXO 4. El modelo no converge cuando la DOD es inferior o igual a 23%.

Las restricciones se cumplen cuando la DOD es inferior o igual a 48 %.

En la Figura 39 se presenta el índice de descarga C-rate y C-rate máximo para cada DOD. Cabe destacar que el C-rate decrementa con la disminución de la DOD puesto que el incremento de la capacidad de las baterías es más influyente que el aumento del peso de las mismas. Adicionalmente, el C-rate y C-rate máximo en ningún caso viola las restricciones, de hecho, a la DOD de 48% los valores son 0,17 y 1,47, respectivamente.

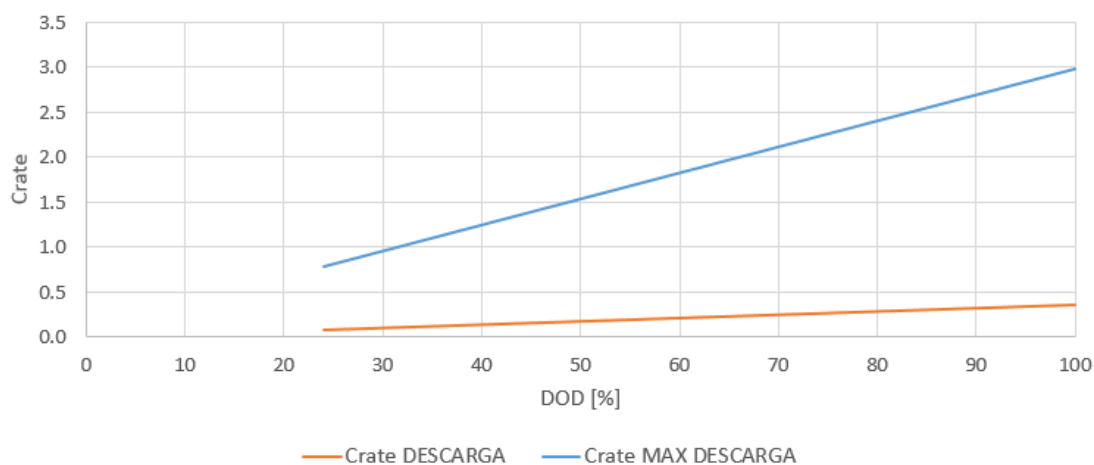


Figura 39. Simulación de C-rate y C-rate máximo en relación a la DOD de baterías de plomo para lanchas taxis

La caída de voltaje media en la resistencia es de 0,04 V, la caída de voltaje máxima es 2,5 V, valores admisibles para el inversor.

En la Figura 40 se grafica la tendencia de los costos anuales en función de la DOD simulada. Como se puede apreciar, a mayor DOD mayor costo anual, esto es debido a que el decremento de la vida útil de las baterías se relaciona exponencialmente con la DOD, mientras que el incremento del peso es lineal y por tanto el primer factor tiene más incidencia en la optimización.

Tomando en cuenta que la DOD debe encontrarse entre 24 y 48%, el valor mínimo y óptimo se encuentra a una DOD de 28%, ver Figura 40. Esto significa una capacidad nominal de 16,5 kWh de baterías, a 48 V, 344 Ah, C-rate de 0,1, C-rate máximo de 0,9, 367 kg de baterías de plomo gel y un costo anual de \$787 dólares. Para mayor detalle estos resultados se presentan en el ANEXO 4.

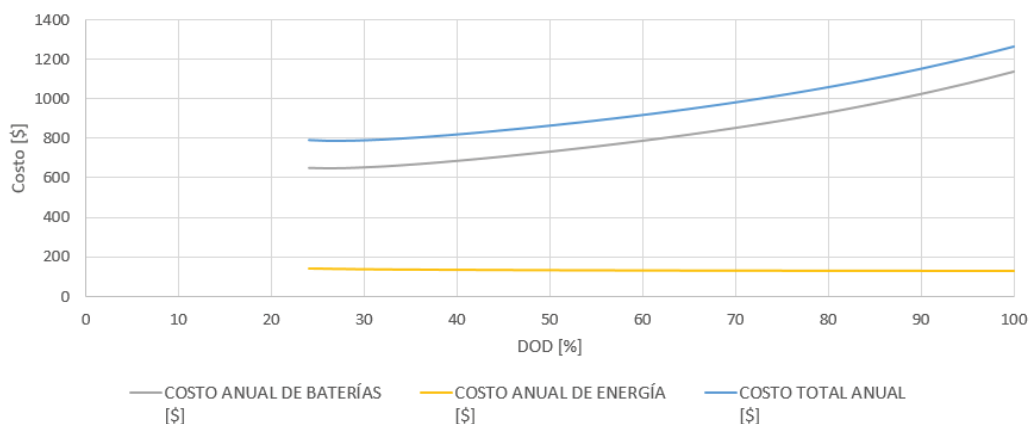


Figura 40. Simulación de costos anuales de baterías y energía en relación de la DOD de baterías de plomo gel

3.3.3 BATERÍAS DE Ni-MH

En esta sección se simula las baterías de Ni-MH para un día completo de operación de acuerdo a la metodología de la sección 3.3.1.

3.3.3.1 Datos de entrada

Los datos de entrada se obtienen de la sección de baterías de Ni-MH del ANEXO 2. La resistencia interna de las baterías de Ni-MH, para un voltaje de 48V, se presenta en la Figura 41. Como se observó en la anterior simulación la energía mínima necesaria para un día completo de trabajo es de 4,4 kWh para una DOD del 100%. Como se estima que la DOD será inferior, la resistencia interna se estima como constante con un valor de 0,01 Ω .

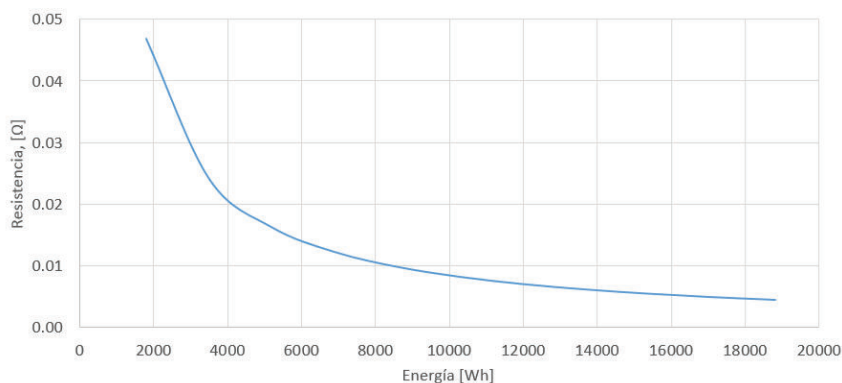


Figura 41. Resistencia interna de baterías de Ni-MH en función de la energía nominal [21]

La profundidad de descarga, DOD [por unidad de 0 a 1], se relaciona con el número de ciclos de la batería de Ni-MH por la ecuación (3.4), esta ecuación es resultado de una regresión del tipo exponencial doble de la Figura 70.

$$\text{NumeroCiclos} = 7021 * e^{-9,036 * DOD} + 2647 * e^{-2,025 * DOD} \quad (3.4)$$

El índice de descarga, C-rate, se relaciona con la capacidad [por unidad de 0 a 1] de la batería de plomo por la ecuación (3.5), esta ecuación es resultado de una regresión del tipo polinómica de orden 2 de la Figura 72.

$$\text{Capacidad} = -0,015 * \text{Crate}^2 - 0,065 * \text{Crate} + 1 \quad (3.5)$$

3.3.3.2 Resultados

Los resultados de la simulación para una DOD desde 100% hasta 1% se presenta en el ANEXO 5. El modelo no converge cuando la DOD es inferior o igual a 21%.

Las restricciones se cumplen cuando la DOD es inferior o igual a 57 %.

En la Figura 42 se presenta el índice de descarga C-rate y C-rate máximo para cada DOD. Cabe destacar que el C-rate decrementa con la disminución de la DOD. Adicionalmente, el C-rate y C-rate máximo en ningún caso viola las restricciones, de hecho, a la DOD de 57% los valores son 0,20 y 1,66, respectivamente.

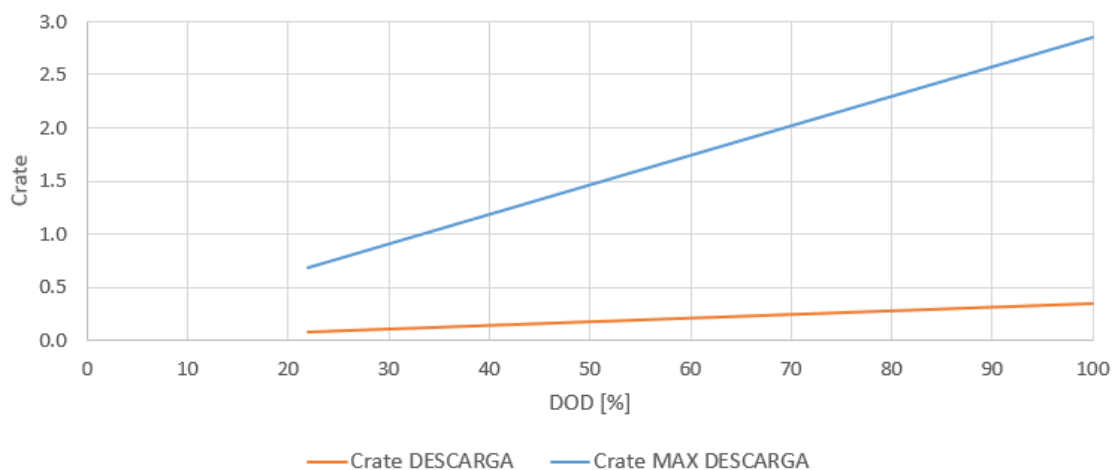


Figura 42. Simulación de C-rate y C-rate máximo en relación a la DOD de baterías de Ni-MH para lanchas taxis

La caída de voltaje media en la resistencia es de 0,04 V, la caída de voltaje máxima es 2,5 V, valores admisibles para el inversor.

En la Figura 43 se grafica la tendencia de los costos anuales en función de la DOD simulada. Tomando en cuenta que la DOD debe encontrarse entre 22 y 57%, el valor mínimo y óptimo se encuentra a una DOD de 28%. Esto significa una capacidad nominal de 17 kWh de baterías, a 48 V, 354 Ah, C-rate de 0,1, C-rate máximo de 0,85, 321 kg de baterías de Ni-MH y un costo anual de \$2394 dólares. Para mayor detalle estos resultados se presentan en el ANEXO 5.

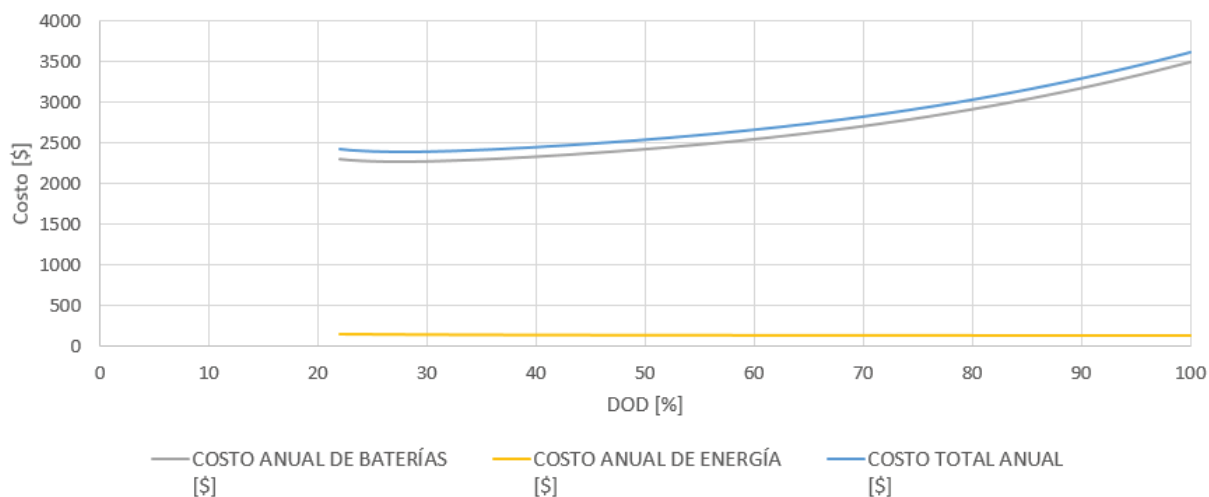


Figura 43. Simulación de costos anuales de baterías y energía en relación de la DOD de baterías de Ni-MH

3.3.4 BATERÍAS DE LITIO

En esta sección se simula las baterías de litio para un día completo de operación de acuerdo a la metodología de la sección 3.3.1.

3.3.4.1 Datos de entrada

Los datos de entrada se obtienen de la sección de baterías de litio del ANEXO 2. La resistencia interna de las baterías de litio, para un voltaje de 48V, se presenta en la Figura 44. Como se observó en las simulaciones anteriores la energía nominal esta alrededor de los 17 kWh, por lo que la resistencia interna se estima como constante con un valor de 0,002 Ω .

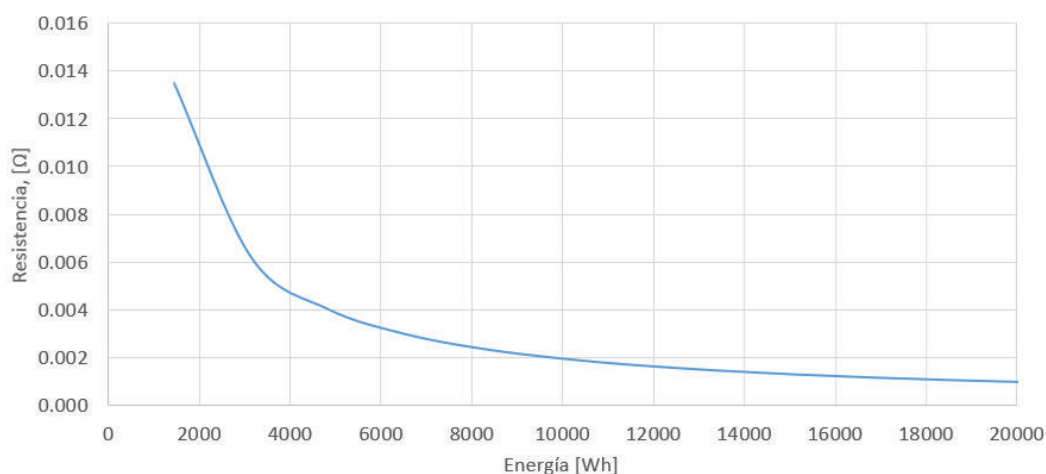


Figura 44. Resistencia interna de baterías de Litio en función de la energía nominal [21]

La profundidad de descarga, DOD [por unidad de 0 a 1], se relaciona con el número de ciclos de la batería de litio por la ecuación (3.6), esta ecuación es resultado de una regresión del tipo exponencial doble de la Figura 73.

$$\text{NumeroCiclos} = 1,093E6 * e^{-16,32 * DOD} + 5,156E4 * e^{-3,523 * DOD} \quad (3.6)$$

El índice de descarga, C-rate, se relaciona con la capacidad [por unidad de 0 a 1] de la batería de plomo por la ecuación (3.7), esta ecuación es resultado de una regresión del tipo polinómica de orden 2 de la Figura 75.

$$\text{Capacidad} = -0,01278 * \text{Crate}^2 - 0,1019 * \text{Crate} + 1,038 \quad (3.7)$$

Como restricción adicional para las baterías de litio se tiene que la capacidad de las baterías de litio decrece en el orden de 4% anual, por lo tanto la capacidad nominal de las baterías en el punto óptimo debe ser superior para abastecer estas pérdidas.

3.3.4.2 Resultados

Los resultados de la simulación para una DOD desde 100% hasta 1% se presenta en el ANEXO 6. El modelo no converge cuando la DOD es inferior o igual a 8%.

Las restricciones se cumplen cuando la DOD es inferior o igual a 29 %.

En la Figura 45 se presenta el índice de descarga C-rate y C-rate máximo para cada DOD. Cabe destacar que el C-rate decrementa con la disminución de la DOD puesto que el incremento de la capacidad de las baterías es más influyente que el aumento del peso de las mismas. Adicionalmente, el C-rate y C-rate máximo en ningún caso viola las restricciones, de hecho, a la DOD de 57% los valores son 0,20 y 1,66, respectivamente.

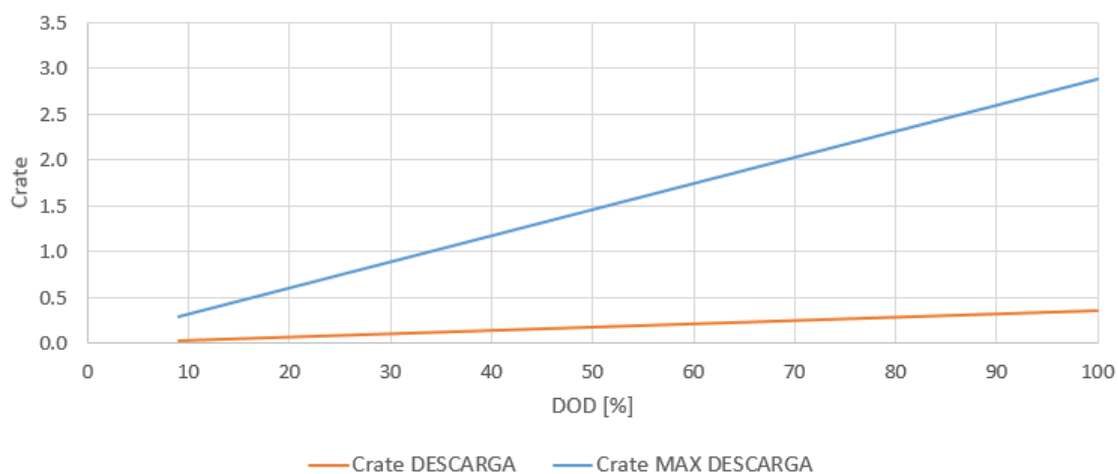


Figura 45. Simulación de C-rate y C-rate máximo en relación a la DOD de baterías de Litio para un día de operación

La caída de voltaje media en la resistencia es de 0,01 V, la caída de voltaje máxima es 0,5 V, valores admisibles para el inversor.

En la Figura 46 se grafica la tendencia de los costos anuales en función de la DOD simulada. Claramente se destaca que el lugar óptimo se encuentra a una DOD de 29%. En este punto se tiene una capacidad nominal de 15 kWh de baterías de litio, a 48 V, 313 Ah, C-rate de 0,1, C-rate máximo de 0,86, 116 kg de baterías de litio y un costo anual de \$2129 dólares a 12,6 años de vida útil.

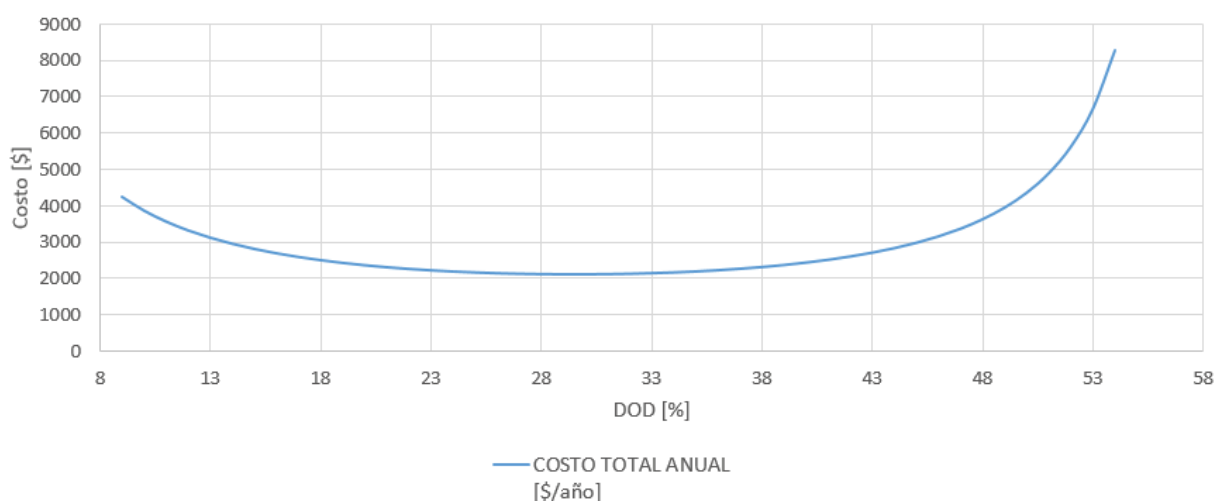


Figura 46. Simulación de costos anuales de baterías y energía en relación de la DOD de baterías de Litio para un día de operación

3.4 DIMENSIONAMIENTO Y SIMULACIÓN DEL SISTEMA DE ALMACENAMIENTO CON BATERÍAS PARA UN VIAJE

En esta sección se dimensiona, simula y optimiza el sistema de almacenamiento netamente con **baterías**, comparando las baterías de plomo gel, Ni-MH y litio. El dimensionamiento se hace suponiendo que el almacenamiento debe proporcionar la energía para **un viaje**.

3.4.1 METODOLOGÍA

La metodología utilizada es la detallada en la sección 3.3.1.

En los datos de entrada se adiciona: la cantidad media de viajes diarios (21 viajes) y el tiempo medio entre viajes (26 minutos). Este tiempo servirá para cargar las baterías. Adicionalmente la resistencia interna de la batería cambiará su magnitud puesto que su capacidad nominal disminuye.

A la tabla de resultados se añade el “C-rate de carga” necesario para entregar la energía de un viaje, como restricción se tiene que este valor debe ser el adecuado para que no dañe las baterías, además de que la carga rápida actualmente se estima en 3 horas, 0,33 C-rate.

3.4.2 BATERÍAS DE PLOMO

En esta sección se simula las baterías de plomo gel para un viaje de operación de acuerdo a la metodología de la sección 3.4.1.

Los datos de entrada y las ecuaciones son iguales a los de la sección 3.3.2. La resistencia interna se toma como constante en $0,06 \Omega$ debido a que la energía por viaje se encuentra entre 0,3 y 1,5 kWh.

3.4.2.1 Resultados

Los resultados de la simulación para una DOD desde 100% hasta 1% se presenta en el ANEXO 7.

En la Figura 47 se presenta el C-rate de carga y descarga en función de la DOD. Se puede notar claramente que estos índices son elevados y como se mencionó en las restricciones, el C-rate de carga no puede ser superior a 0,33. Con esta restricción se tiene que el punto óptimo debe situarse entre 14% y 1% de la DOD.

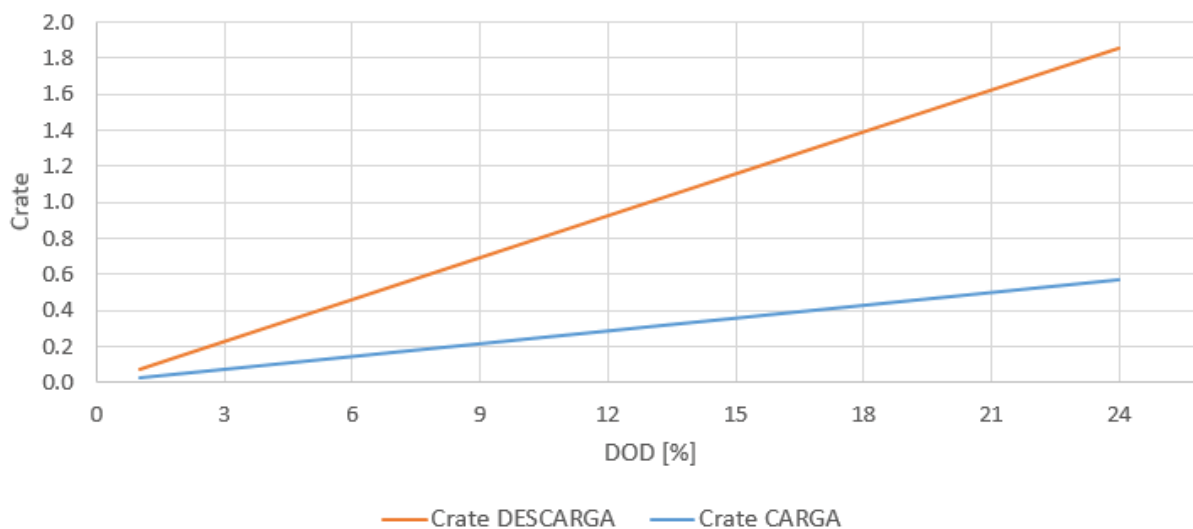


Figura 47. Simulación de C-rate Carga y C-rate Descarga en relación a la DOD de baterías de plomo para un recorrido de lanchas taxis

La caída de voltaje media en la resistencia es de 1,8 V, un valor admisible para el inversor.

En la Figura 48 se grafica la tendencia de los costos anuales en función de la DOD simulada. Como se puede apreciar a mayor DOD menor costo anual, esto es debido a que en este caso la vida útil de las baterías juega un rol importante y es mejor que la batería dure poco y se descargue profundamente.

Tomando en cuenta que la DOD debe encontrarse entre 1 y 14%, el valor mínimo y óptimo se encuentra a una DOD de 14%. Esto significa una capacidad nominal de 1,4 kWh de baterías, a 48 V, 29 Ah, C-rate carga de 0,32, C-rate descarga de 1,1, 31,1 kg de baterías de plomo y un costo anual de \$717 dólares. Cabe hacer mención que el tiempo de vida de las baterías es de 0,66 años, es decir que se debe cambiar

la batería cada 8 meses con un costo de \$391. Para mayor detalle estos resultados se presentan en el ANEXO 7.

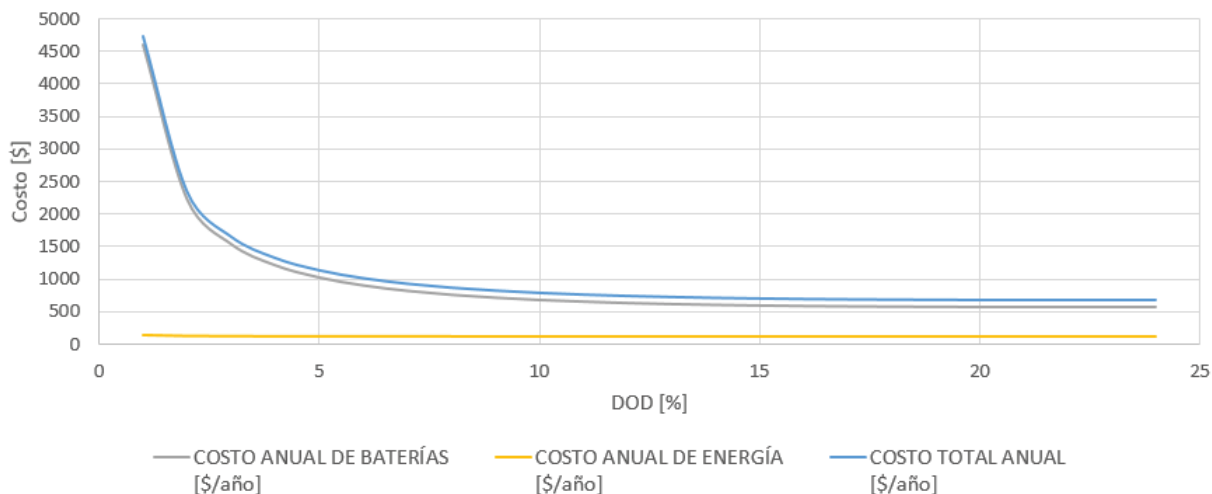


Figura 48. Simulación de costos anuales y energía en relación de la DOD de baterías de plomo para un recorrido

3.4.3 BATERÍAS DE Ni-MH

En esta sección se simula las baterías de Ni-MH para un viaje de operación de acuerdo a la metodología de la sección 3.4.1.

Los datos de entrada y las ecuaciones son iguales a los de la sección 3.3.3. La resistencia interna se toma como constante en $0,1 \Omega$.

3.4.3.1 Resultados

Los resultados de la simulación para una DOD desde 100% hasta 1% se presenta en el ANEXO 8.

En la Figura 49 se presenta el C-rate de carga y descarga en función de la DOD. Se puede notar claramente que estos índices son elevados y como se mencionó en las restricciones, el C-rate de carga no puede ser superior a 0,33. Con esta restricción se tiene que el punto óptimo debe situarse entre 15% y 1% de la DOD.

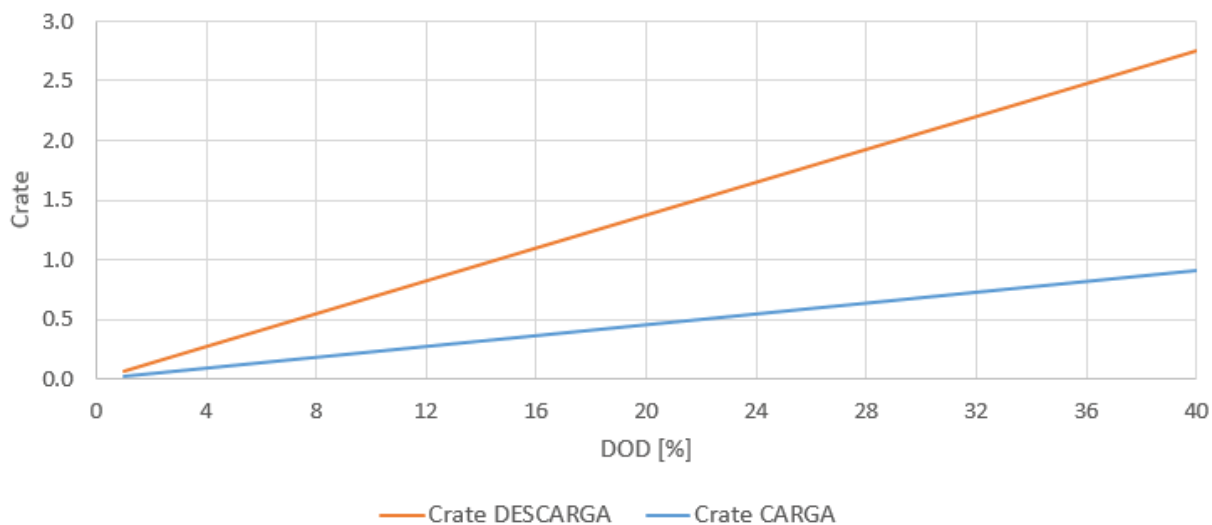


Figura 49. Simulación de C-rate Carga y C-rate Descarga en relación a la DOD de baterías de Ni-MH para un recorrido de lanchas taxis

La caída de voltaje media en la resistencia es de 1,6 V, un valor admisible para el inversor.

En la Figura 50 se grafica la tendencia de los costos anuales en función de la DOD simulada. Como se puede apreciar a mayor DOD menor costo anual, esto es debido a que en este caso la vida útil de las baterías juega un rol importante y es mejor que la batería dure poco y se descargue profundamente.

Tomando en cuenta que la DOD debe encontrarse entre 1 y 15%, el valor mínimo y óptimo se encuentra a una DOD de 15%. Esto significa una capacidad nominal de 1,5 kWh de baterías, a 48 V, 31 Ah, C-rate carga de 0,33, C-rate descarga de 1, 27,6 kg de baterías de Ni-MH y un costo anual de \$2367 dólares. Cabe hacer mención que el tiempo de vida de las baterías es de 0,49 años, es decir que se debe cambiar

la batería cada 6 meses con un costo de \$1098. Para mayor detalle estos resultados se presentan en el ANEXO 8.

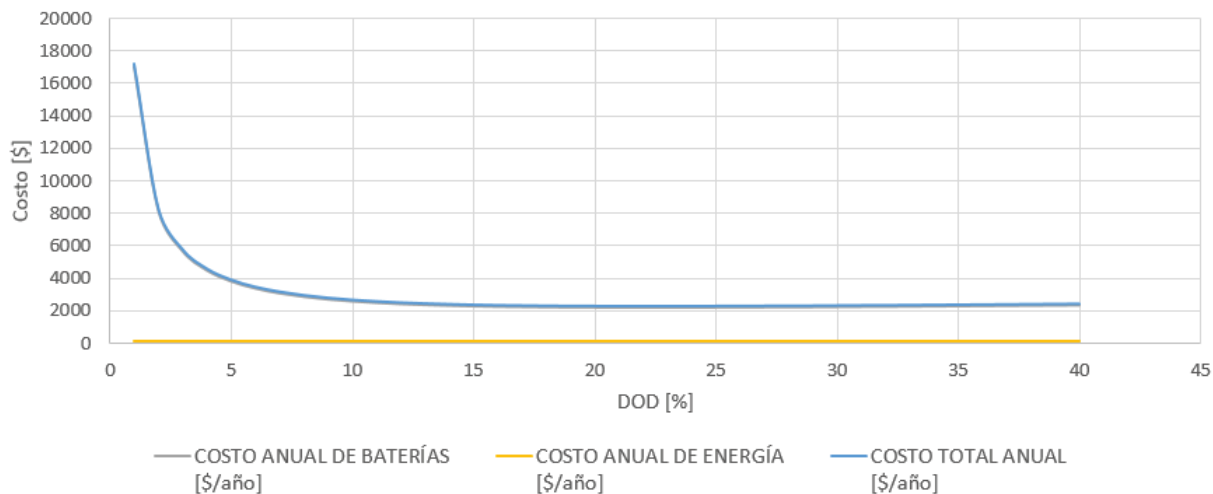


Figura 50. Simulación de costos anuales y energía en relación de la DOD de baterías de Ni-MH para un recorrido

3.4.4 BATERÍAS DE LITIO

En esta sección se simula las baterías de litio para un viaje de operación de acuerdo a la metodología de la sección 3.4.1.

Los datos de entrada y las ecuaciones son iguales a los de la sección 3.3.4. La resistencia interna se toma como constante en $0,014 \Omega$.

3.4.4.1 Resultados

Los resultados de la simulación para una DOD desde 100% hasta 1% se presenta en el ANEXO 9.

En la Figura 51 se presenta el C-rate de carga y descarga en función de la DOD. Se puede notar claramente que estos índices son elevados y como se mencionó en las restricciones, el C-rate de carga no puede ser superior a 0,33. Con esta restricción se tiene que el punto óptimo debe situarse entre 14% y 1% de la DOD.

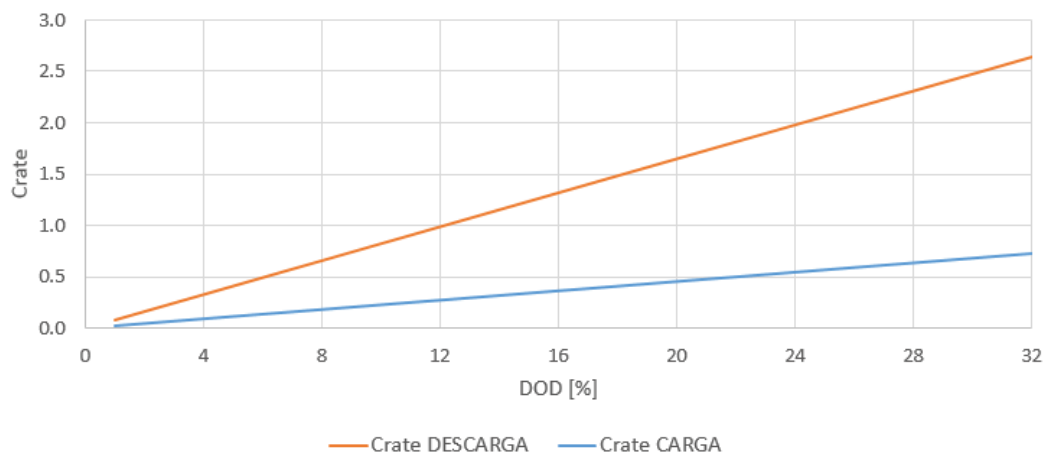


Figura 51. Simulación de C-rate Carga y C-rate Descarga en relación a la DOD de baterías de Litio para un recorrido de lanchas taxis

La caída de voltaje media en la resistencia es de 0,44 V, un valor admisible para el inversor.

En la Figura 52 se grafica la tendencia de los costos anuales en función de la DOD simulada. Claramente se destaca que el lugar óptimo se encuentra a una DOD de 14%. Esto significa una capacidad nominal de 1,3 kWh de baterías, a 48 V, 27 Ah, C-rate carga de 0,32, C-rate descarga de 1,15, 10 kg de baterías de Litio y un costo anual de \$238 dólares. Cabe hacer mención que el tiempo de vida de las baterías es de 17 años, este valor es una variable sensible. Para mayor detalle estos resultados se presentan en el ANEXO 9.

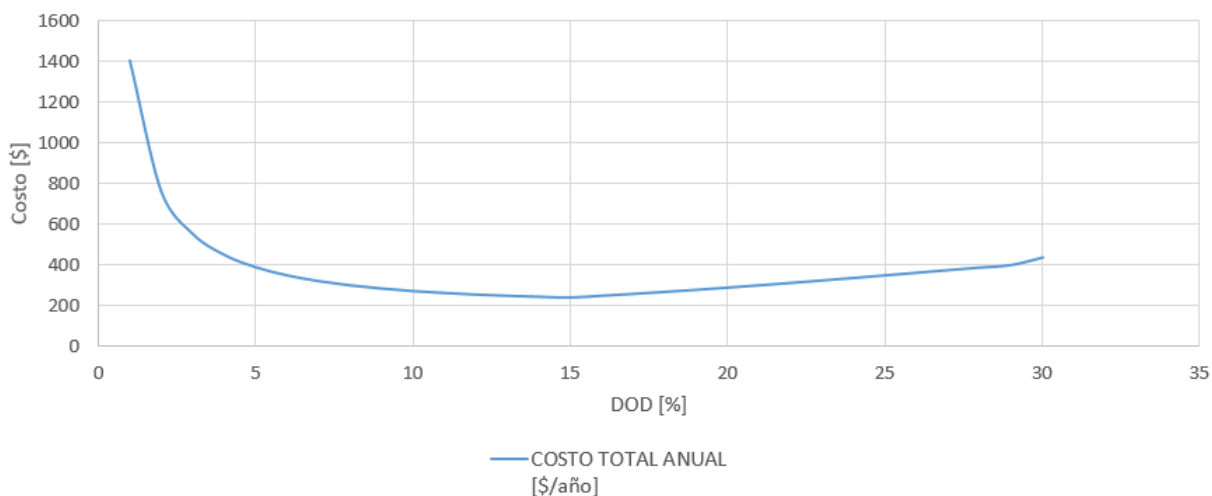


Figura 52. Simulación de costos anuales y energía en relación de la DOD de baterías de Litio para un recorrido

3.5 DIMENSIONAMIENTO Y SIMULACIÓN DEL SISTEMA DE ALMACENAMIENTO CON SUPERCAPACITORES PARA UN VIAJE

En esta sección se dimensiona, simula y optimiza el sistema de almacenamiento netamente con **supercapacitores**. El dimensionamiento se hace suponiendo que el almacenamiento debe proporcionar la energía para **un viaje**.

El diagrama propuesto para el sistema de propulsión con supercapacitores de una embarcación eléctrica se presenta en la Figura 53. A continuación se detalla su configuración:

- “P_m” representa la potencia eléctrica que se debe entregar al motor eléctrico.
- La potencia de entrada al inversor “P_{inv}” se relaciona con “P_m” por medio de la eficiencia del inversor.
- La potencia de entrada al convertidor de potencia “P_{dc}” se relaciona con “P_{inv}” por medio de la eficiencia de este convertidor. Este equipo es el que

permite obtener un voltaje DC plano, es decir que no se reduce exponencialmente como es típico en un supercapacitor, además permite que los picos de corriente demandados del supercapacitor no sean de gran magnitud. En la Figura 54 se detalla el esquema eléctrico básico de un convertidor de potencia para supercapacitores, las tres bobinas se utilizan para reducir el pico de corriente.

- “ R_{int} ” es la resistencia interna del supercapacitor.
- “ E_{min} ” es la energía mínima necesaria para el banco de SC.
- “ i_{inv} ” es la corriente en amperios que circula por la resistencia y que es demandada del supercapacitor, hay que notar que esta corriente crece exponencialmente puesto que el voltaje decrece con el tiempo y la potencia entregada debe ser constante.

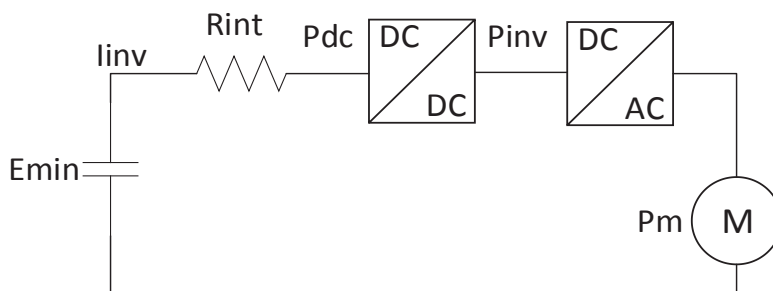


Figura 53. Esquema general propuesto para la simulación del sistema de propulsión eléctrico con SC

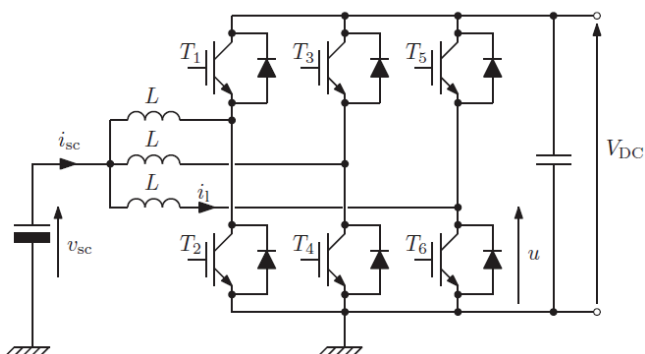


Figura 54. Esquema de un convertidor de potencia para supercapacitor con IGBT [27]

3.5.1 METODOLOGÍA

La metodología planteada se sintetiza en el diagrama de flujo de la Figura 55 y se basa en el esquema de la Figura 53. A continuación se detalla esta metodología:

- Los datos de entrada son iguales a los de las baterías, sin embargo se añaden los siguientes: i) eficiencia del convertidor DC/DC, 85% [27], ii) número de ciclos de un SC y iii) costo del convertidor DC/DC.
- Con los datos de entrada se calcula la energía antes del convertidor de potencia DC/DC, la resistencia del SC, la energía nominal de los SC y la capacitancia equivalente. Este proceso permite definir la capacitancia mínima que debe tener el banco de SC.
- Para la optimización se realiza la simulación (lazo for) de la capacitancia del banco de SC desde la capacitancia mínima calculada con anterioridad, hasta el doble de esta capacitancia, es decir el doble de la energía de almacenamiento. Se selecciona estos límites puesto que dependiendo de la profundidad de descarga se cargue el SC, el proceso de carga es más o menos eficiente.
- Dentro del lazo “for” se calcula: la energía nominal, la resistencia interna, el peso de los SC, la potencia por viaje, la potencia antes del inversor y del convertidor DC/DC, la energía antes del convertidor DC/DC, el voltaje mínimo de descarga del SC y la energía nominal del banco de SC. Como restricciones se tiene que la energía nominal de los SC debe ser superior a la energía mínima necesaria para un viaje.
- Finalmente se calcula: el costo de adquisición de los SC, el costo anual de los SC, el costo anual de la energía y el costo total. Este último valor incluye el costo adicional del convertidor de potencia DC/DC.

La tabla de resultados incluye cada una de estas simulaciones y se escoge la iteración que presente los costos totales mínimos sin violar ninguna restricción.

Las restricciones son similares a las de baterías, sin embargo se añaden las siguientes:

- La corriente de descarga del supercapacitor no debe exceder el límite permitido.
- La capacitancia del SC decrece aproximadamente 20% al final de la vida útil [20], hay que asegurar que el SC cumpla con los requerimientos de operación a lo largo de su vida.
- En el proceso de carga la corriente no pueden ser excesiva, esto puesto que afectaría al supercapacitor y a la red eléctrica.

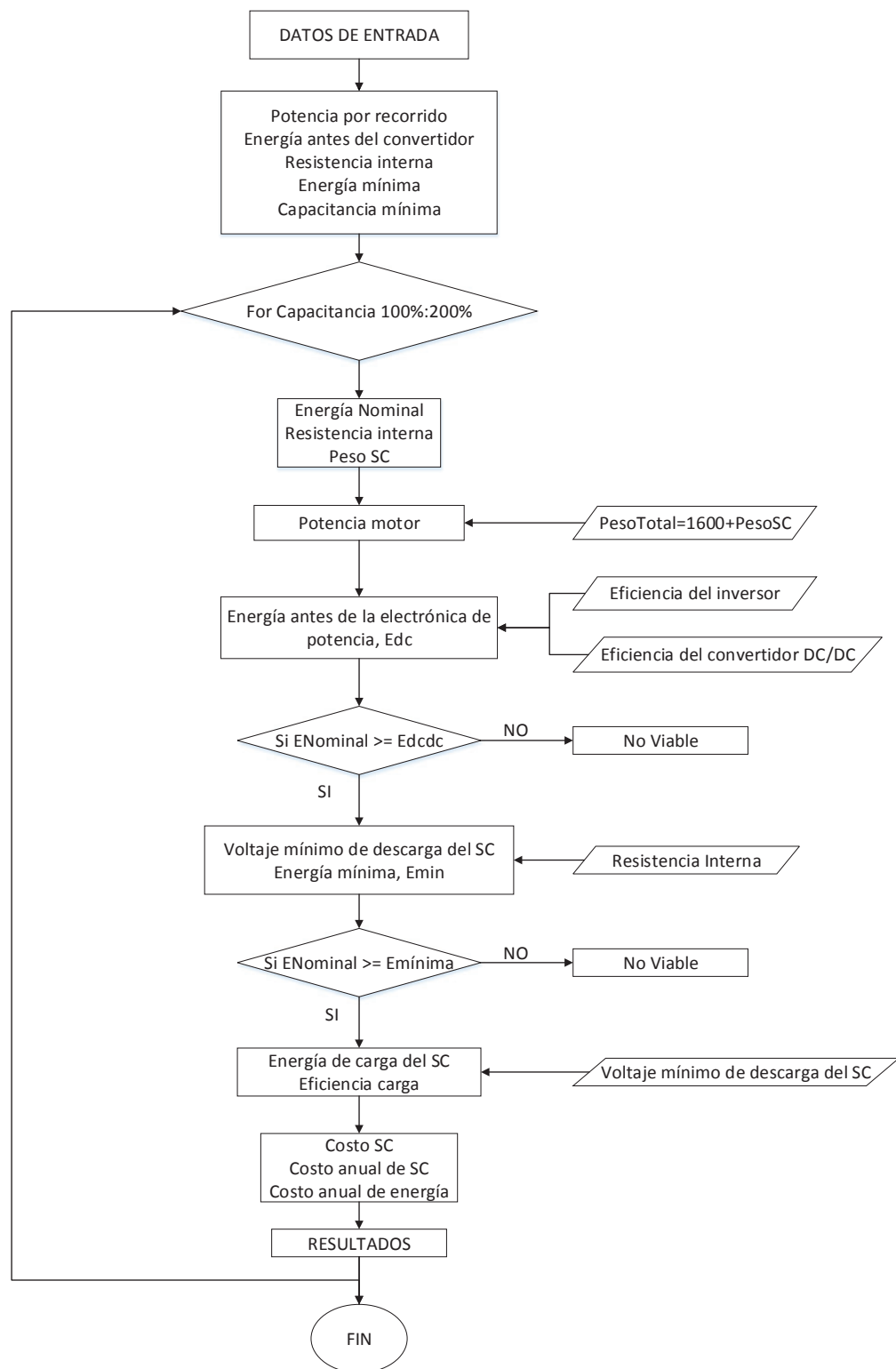


Figura 55. Metodología para la optimización del sistema de almacenamiento con supercapacitores

3.5.2 SUPERCAPACITORES

3.5.2.1 Datos de entrada

Los datos de entrada se obtienen del ANEXO 3. El número de ciclos de vida de un supercapacitor es de 1 millón de ciclos, sin embargo a 28°C se tiene un tiempo de vida aproximado de 44000 horas. Si cada recorrido tiene máximo 15 minutos y son 21 viajes diarios, se tiene un tiempo de vida de aproximadamente 25 años, lo que equivale a 200 mil ciclos [37].

El costo del convertidor de potencia DC/DC es aproximadamente \$6000, [27].

La resistencia interna de los supercapacitores, para un voltaje de 48V, se presenta en la Figura 56. La ecuación (3.8) modela la relación de resistencia-energía nominal para un supercapacitor.

$$Resistencia = 0,01022 * e^{-0,01142*E_{nominal}} + 0,001789 * e^{-0,001626*E_{nominal}} \quad (3.8)$$

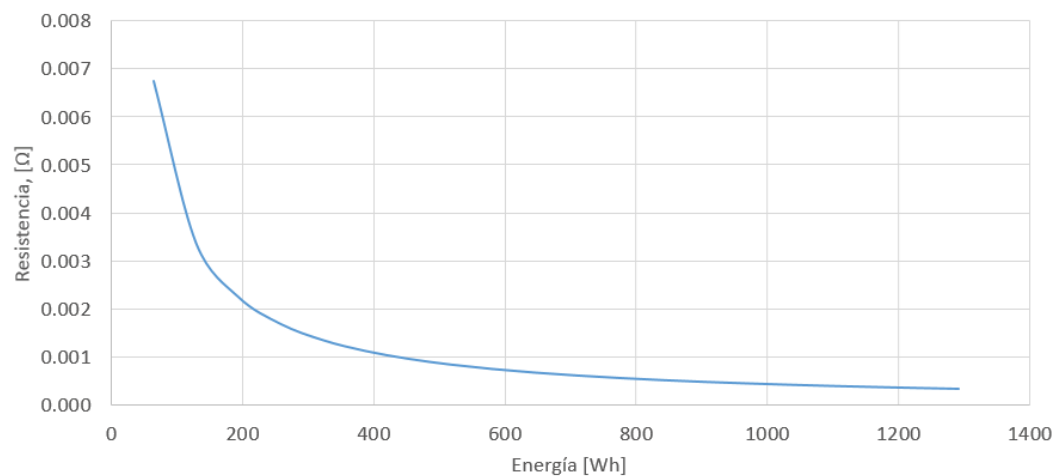


Figura 56. Resistencia interna de supercapacitores en función de la energía nominal [37]

3.5.2.2 Resultados

Los resultados de la simulación para una capacitancia que varía desde 1367 F a 2727 F, se presenta en el ANEXO 10.

En la Figura 57 se presenta la eficiencia de carga en función de la capacitancia nominal del banco de SC, claramente se observa que a mayor capacitancia mayor eficiencia de carga.

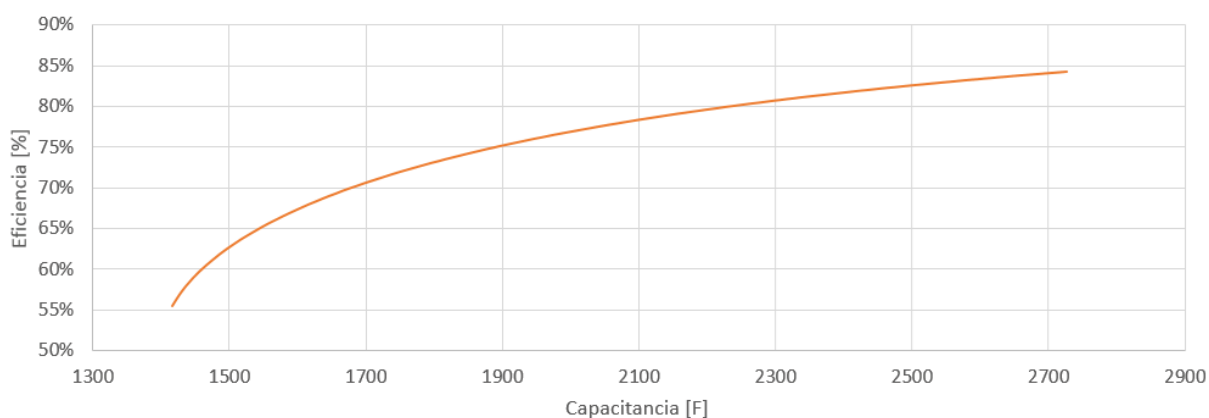


Figura 57. Eficiencia del proceso de carga del banco de supercapacitores en relación a la capacitancia

En la Figura 58 se grafica el costo total anual, el costo anual de SC y el costo anual de la energía. Se observa que el costo anual de la energía tiende a decrecer con el aumento de la capacitancia, además, el valor absoluto de su pendiente negativa es menor a la pendiente positiva del costo anual de los SC. Este particular permite concluir que el punto óptimo se encuentra cuando el sistema de almacenamiento tiene la menor capacitancia sin quebrantar ninguna restricción.

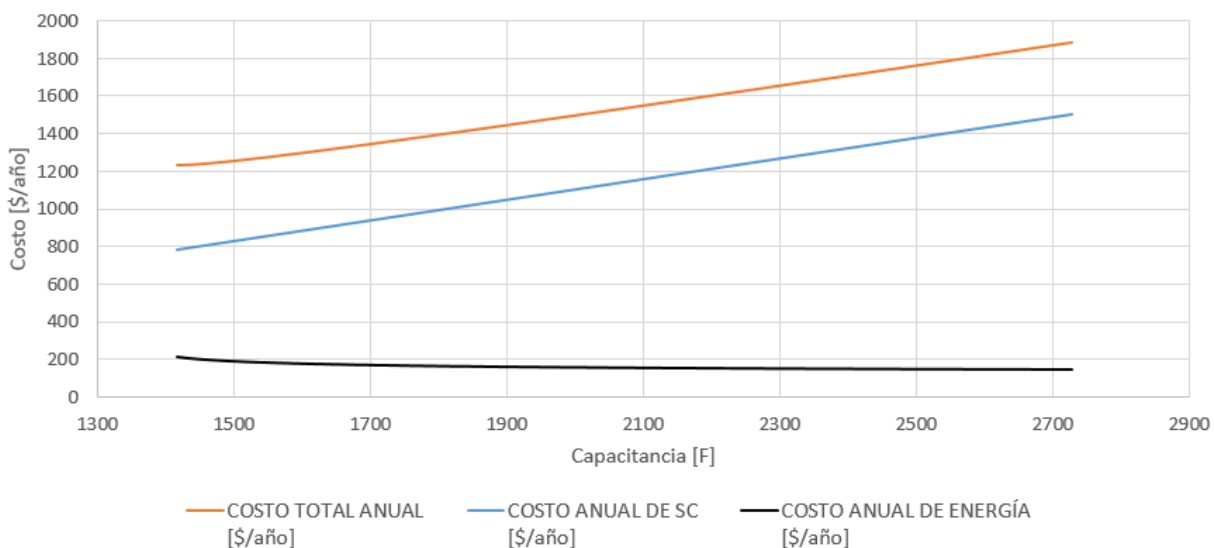


Figura 58. Simulación de costos anuales de SC y energía en relación de la capacitancia de almacenamiento de SC

La restricción de la corriente máxima de descarga del supercapacitor no excede en ningún caso el valor definido en las hojas técnicas [37]. La caída de voltaje máxima en la resistencia se encuentra entre 0,15 V y 0,32 V.

El menor costo anual se encuentra a una capacitancia de 1417 F, sin embargo se debe incrementar este valor en 20% para que el sistema de almacenamiento cumpla sus funciones correctamente al final de su vida útil. El punto óptimo se encuentra a 1767 F, 0,56 kWh, 141 kg de peso, eficiencia de carga de 72%, costo del SC de \$25446, costo anual de SC de \$975, costo anual de energía de \$162 y un costo anual total de \$1377, ver ANEXO 10.

Cabe destacar que la variable sensible es el número de ciclos del SC. Esta simulación se ha realizado con un valor conservador de 200 mil ciclos, sin embargo las hojas técnicas presentan hasta 1 millón de ciclos. Con esto se concluye que la vida útil puede ser sumamente superior, probablemente más del doble, y consecuentemente el costo anual de los SC descienda en la misma relación.

3.6 DIMENSIONAMIENTO Y SIMULACIÓN DEL SISTEMA DE ALMACENAMIENTO HÍBRIDO (BATERÍAS Y SUPERCAPACITORES) PARA UN VIAJE

En esta sección se dimensiona, simula y optimiza el sistema de almacenamiento con **baterías y supercapacitores**. El dimensionamiento se hace suponiendo que el almacenamiento debe proporcionar la energía para **un viaje**. La optimización se realiza simulando el porcentaje de energía entregado por el SC y las baterías desde 1 a 99%.

El diagrama propuesto para el sistema de propulsión con baterías y supercapacitores de una embarcación eléctrica se presenta en la Figura 59. A continuación se detalla su configuración:

- “Pm” representa la potencia eléctrica que se debe entregar al motor eléctrico para un viaje.
- “Pbat” representa el porcentaje de la potencia que será abastecida por la batería.
- “Psc” es el porcentaje de la potencia que será abastecida por el supercapacitor.
- “Pdc” es la potencia de entrada al convertidor de potencia DC/DC.
- “Rint bat” y “Rint SC” son las resistencias internas de la batería y el SC, respectivamente.
- “Ibat” e “Isc” son las corrientes de la batería y el SC, respectivamente.
- “Ebat” e “Esc” es la energía necesaria en la batería y el SC, respectivamente. Cabe destacar que a este valor se debe añadir varios efectos como por ejemplo la temperatura y el C-rate, según sea el caso.

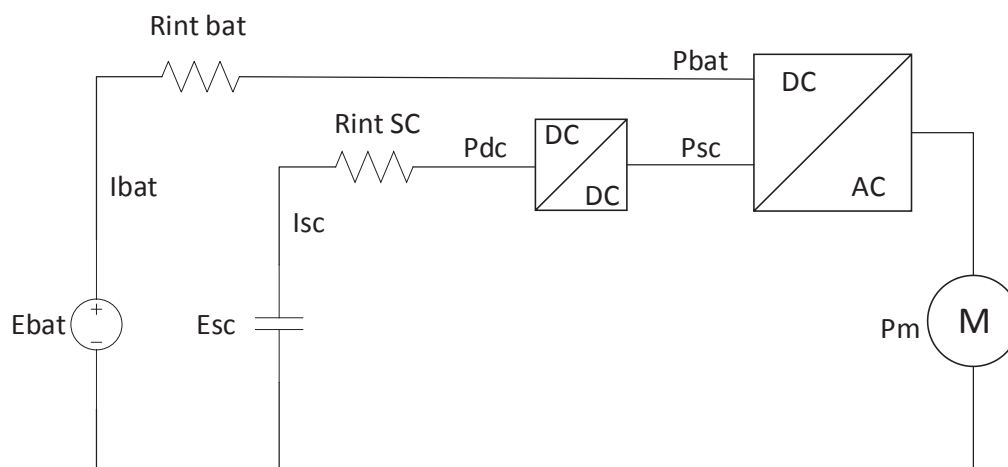


Figura 59. Esquema general propuesto para la simulación del sistema de propulsión eléctrico con baterías y SC

3.6.1 METODOLOGÍA

La metodología planteada se sintetiza en el diagrama de flujo de la Figura 60 y se basa en el esquema de la Figura 59. A continuación se detalla esta metodología:

- En los datos de entrada son los detallados anteriormente para baterías y SC.
- El lazo while se ejecuta hasta que el error sea inferior a 1%. Se calcula la potencia entregada al motor, la potencia antes del inversor el cual se incrementa por un factor de sobredimensionamiento y, la potencia destinada a la batería y al SC, de acuerdo al porcentaje de simulación.
- Finalmente se presentan los resultados para baterías y SC. Estos incluyen: costo de adquisición, costo anual, costo de la energía, DOD, tiempo de vida, entre otros.

Las restricciones son las mismas que se han detallado para baterías y SC.

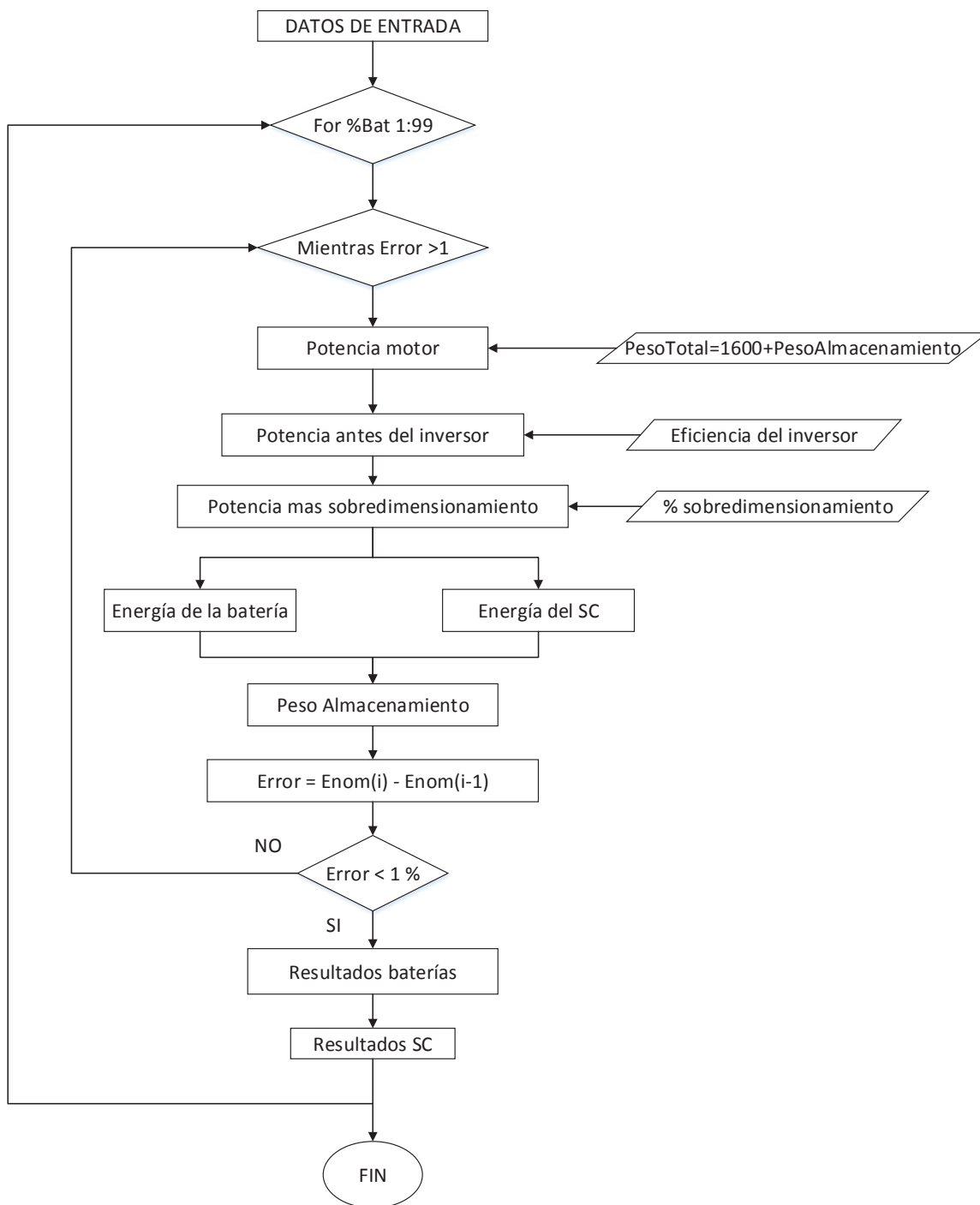


Figura 60. Metodología para la optimización del sistema de almacenamiento híbrido

3.6.2 BATERÍAS DE PLOMO Y SC

En esta sección se simula las baterías de plomo gel y SC para un viaje de operación de acuerdo a la metodología de la sección 3.6.1.

Para las baterías de plomo es necesario definir la ecuación (3.9) que relaciona la resistencia con la energía nominal, esta ecuación es resultado de una regresión de la Figura 38.

$$Resistencia = 0,07602 * e^{-0,0003331*Enominal} + 0,003391 * e^{0,00007912*Enominal} \quad (3.9)$$

3.6.2.1 Resultados

El porcentaje de sobredimensionamiento es una variable que se debe definir para minimizar los costos. En la Tabla 6 se presenta el costo total anual para cada configuración de sobredimensionamiento, tanto para las baterías como para los SC. Se aprecia que el sobredimensionamiento de los SC debe ser cercano a cero, mientras que el sobredimensionamiento óptimo para las baterías se encuentra entre 30 y 40%.

Tomando como porcentaje de sobredimensionamiento 10% y 40%, para los SC y las baterías, respectivamente, la tabla de resultados se presenta en el ANEXO 11.

En la Figura 61 se presentan los costos anuales en relación al porcentaje de energía entregado por las baterías. Se puede apreciar claramente que el costo mínimo se encuentra cuando el sistema tiende a ser compuesto netamente por baterías. Para confirmar esta hipótesis se observa el lugar en donde se encuentra el valor óptimo para cada configuración de la Tabla 6 y efectivamente el costo mínimo en todas las configuraciones tiende a que el sistema sea compuesto por baterías.

SC \ BATERÍA	0%	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%
0%	\$ 966	\$ 968	\$ 969	\$ 971	\$ 972	\$ 974	\$ 975	\$ 979	\$ 981	\$ 982	\$ 984
10%	\$ 960	\$ 962	\$ 963	\$ 965	\$ 966	\$ 968	\$ 969	\$ 973	\$ 975	\$ 976	\$ 978
20%	\$ 957	\$ 958	\$ 960	\$ 961	\$ 963	\$ 964	\$ 966	\$ 970	\$ 971	\$ 973	\$ 974
30%	\$ 955	\$ 957	\$ 958	\$ 960	\$ 961	\$ 963	\$ 964	\$ 968	\$ 969	\$ 971	\$ 972
40%	\$ 955	\$ 956	\$ 958	\$ 960	\$ 961	\$ 963	\$ 964	\$ 968	\$ 969	\$ 971	\$ 972
50%	\$ 956	\$ 958	\$ 959	\$ 961	\$ 962	\$ 964	\$ 965	\$ 969	\$ 971	\$ 972	\$ 974
60%	\$ 958	\$ 960	\$ 962	\$ 963	\$ 965	\$ 966	\$ 968	\$ 971	\$ 973	\$ 974	\$ 976
70%	\$ 962	\$ 963	\$ 965	\$ 966	\$ 968	\$ 969	\$ 971	\$ 975	\$ 976	\$ 978	\$ 979
80%	\$ 966	\$ 967	\$ 969	\$ 970	\$ 972	\$ 973	\$ 975	\$ 978	\$ 980	\$ 982	\$ 983
90%	\$ 970	\$ 972	\$ 973	\$ 975	\$ 976	\$ 978	\$ 979	\$ 983	\$ 985	\$ 986	\$ 988
100%	\$ 975	\$ 977	\$ 978	\$ 980	\$ 981	\$ 983	\$ 985	\$ 988	\$ 990	\$ 991	\$ -

Tabla 6. Costo total anual para cada porcentaje de sobredimensionamiento, baterías de plomo gel y SC

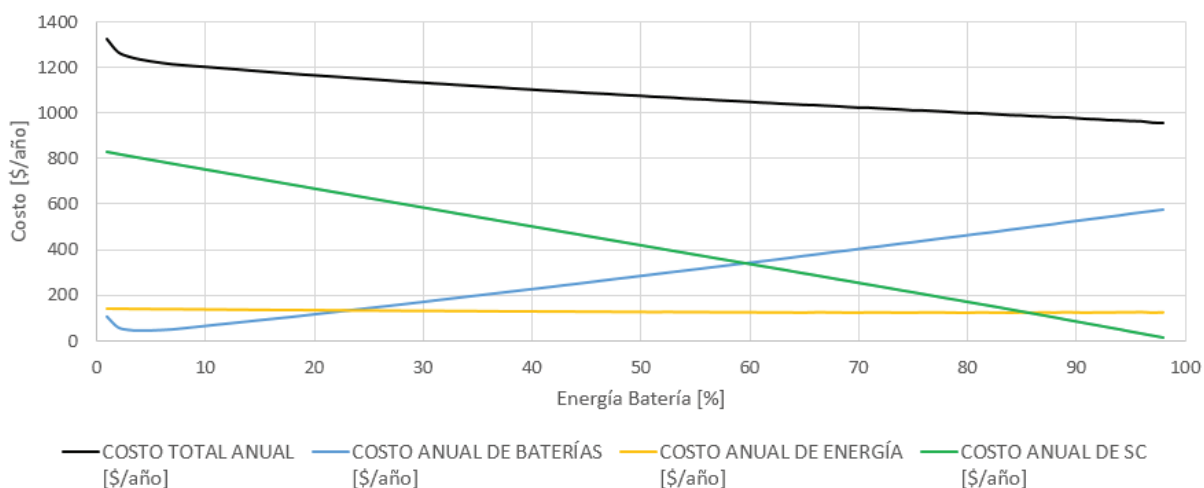


Figura 61. Simulación de costos anuales y costos de energía para el sistema de almacenamiento híbrido con baterías de plomo gel

3.6.3 BATERÍAS DE Ni-MH Y SC

En esta sección se simula las baterías de Ni-MH y SC para un viaje de operación de acuerdo a la metodología de la sección 3.6.1.

Para las baterías de Ni-MH es necesario definir la ecuación (3.10) que relaciona la resistencia con la energía nominal, esta ecuación es resultado de una regresión de la Figura 41.

$$Resistencia = 0,098 * e^{-0,0006523*E_{nominal}} + 0,01917 * e^{-0,00008105*E_{nominal}} \quad (3.10)$$

3.6.3.1 Resultados

El porcentaje de sobredimensionamiento es una variable que se debe definir para minimizar los costos. En la Tabla 7 se presenta el costo total anual para cada configuración de sobredimensionamiento, tanto para las baterías como para los SC. Se aprecia que el sobredimensionamiento de los SC debe ser cercano a cero, mientras que el sobredimensionamiento óptimo para las baterías se encuentra en el 60%.

SC \ BATERÍA	0%	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%
0%	1435	1490	1545	1602	1659	1716	1774	1832	1889	1946	2004
10%	1387	1444	1503	1564	1623	1683	1744	1806	1868	1929	1990
20%	1370	1428	1488	1547	1608	1669	1731	1793	1855	1917	1980
30%	1363	1421	1481	1541	1602	1663	1725	1787	1849	1912	1975
40%	1360	1418	1478	1538	1599	1660	1722	1784	1847	1910	1972
50%	1358	1416	1476	1536	1597	1659	1721	1783	1845	1908	1971
60%	1357	1415	1475	1536	1597	1659	1720	1782	1845	1907	1970
70%	1357	1415	1475	1536	1597	1659	1720	1783	1845	1908	1971
80%	1358	1416	1476	1536	1597	1659	1721	1783	1845	1908	1971
90%	1359	1417	1476	1537	1598	1660	1722	1784	1846	1909	1972
100%	1360	1418	1477	1538	1599	1661	1723	1785	1847	1910	1973

Tabla 7. Costo total anual para cada porcentaje de sobredimensionamiento, baterías de Ni-MH y SC

Tomando como porcentaje de sobredimensionamiento 10% y 60%, para los SC y las baterías, respectivamente, la tabla de resultados se presenta en el ANEXO 12. Como se puede apreciar, el porcentaje de simulación varía a partir de 20% debido a que, si es inferior, el modelo no converge.

En la Figura 62 se presentan los costos anuales en relación al porcentaje de energía entregado por las baterías. Se puede apreciar claramente que el costo mínimo se encuentra cuando el sistema tiende a ser solamente compuesto por supercapacitores. Para confirmar esta hipótesis se observa en donde se encuentra el valor óptimo para cada configuración de la Tabla 7 y efectivamente el costo mínimo en todas las configuraciones tiende a que el sistema sea compuesto por SC.

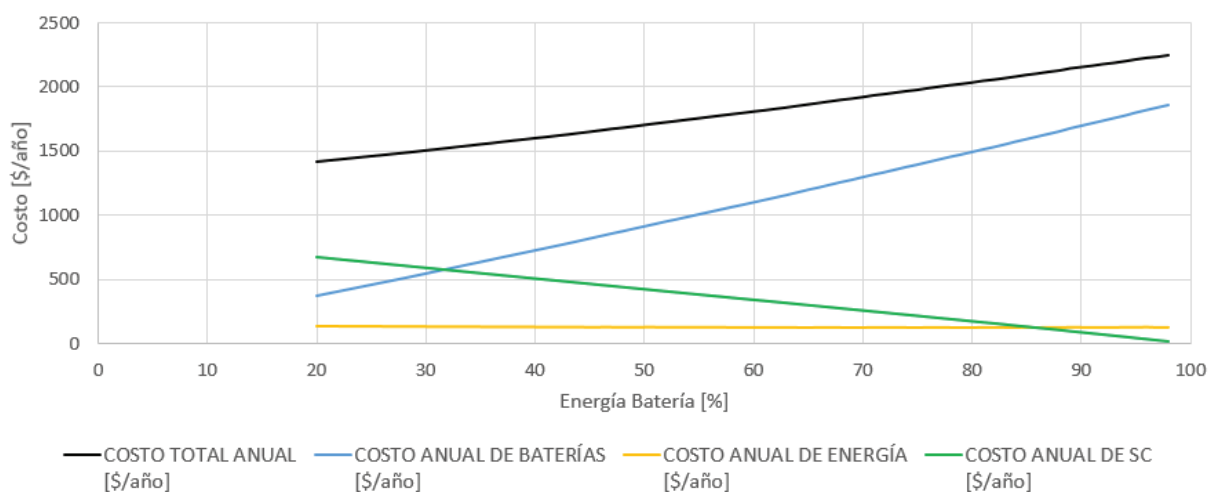


Figura 62. Simulación de costos anuales y costos de energía para el sistema de almacenamiento híbrido con baterías de Ni-MH

3.6.4 BATERÍAS DE LITIO Y SC

En esta sección se simula las baterías de Litio y SC para un viaje de operación de acuerdo a la metodología de la sección 3.6.1.

Para las baterías de Litio es necesario definir la ecuación (3.11) que relaciona la resistencia con la energía nominal, esta ecuación es resultado de una regresión de la Figura 44.

$$Resistencia = 0,02315 * e^{-0,0006368*Enominal} + 0,004669 * e^{-0,0000915*Enominal} \quad (3.11)$$

3.6.4.1 Resultados

El porcentaje de sobredimensionamiento es una variable que se debe definir para minimizar los costos. En la Tabla 8 se presenta el costo total anual mínimo para cada configuración de sobredimensionamiento, tanto para las baterías como para los SC. Se aprecia que el sobredimensionamiento de los SC debe ser cercano a cero, mientras que el sobredimensionamiento óptimo para las baterías tiende al infinito. Este particular también se apreció en las anteriores simulaciones con baterías de litio, para resolver este inconveniente se debe incluir la restricción de la pérdida de capacidad de 4% anual.

SC \ BATERÍA	0%	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%
0%	514	515	517	518	520	521	523	526	528	529	531
10%	515	517	518	520	521	523	525	528	530	531	533
20%	514	516	517	519	521	522	524	527	529	530	532
30%	512	513	515	516	518	520	521	525	526	528	529
40%	509	510	512	513	515	516	518	521	523	524	526
50%	505	506	508	509	511	512	514	518	519	521	522
60%	501	502	504	506	507	509	510	514	515	517	518
70%	497	499	500	502	503	505	506	510	511	513	514
80%	493	495	496	498	499	501	502	506	507	509	510
90%	489	491	493	494	496	497	499	502	504	505	507
100%	486	487	489	490	492	494	495	499	500	502	503

Tabla 8. Costo total anual para cada porcentaje de sobredimensionamiento, baterías de Litio y SC

El punto óptimo (teórico) se encuentra con un porcentaje de sobredimensionamiento de 10% y 100%, para los SC y las baterías, respectivamente, la tabla de resultados se presenta en el ANEXO 13. El porcentaje de simulación varía a partir de 20% debido a que si es inferior el modelo no converge.

En la Figura 63 se presentan los costos anuales en relación al porcentaje de energía entregado por las baterías. Se puede apreciar claramente que el costo mínimo se encuentra cuando el sistema tiende a ser solamente compuesto por baterías. Para confirmar esta hipótesis se observa en donde se encuentra el valor óptimo para cada configuración de la Tabla 8 y efectivamente el costo mínimo en todas las configuraciones tiende a que el sistema sea compuesto netamente de baterías, sin embargo, el punto mínimo del ANEXO 13 no es viable ya que el tiempo de vida útil de las baterías es demasiado grande.

Finalmente, no se encuentra un punto técnica y económicamente viable para esta configuración debido a que los resultados determinan que el sistema de almacenamiento debe ser solamente de baterías.

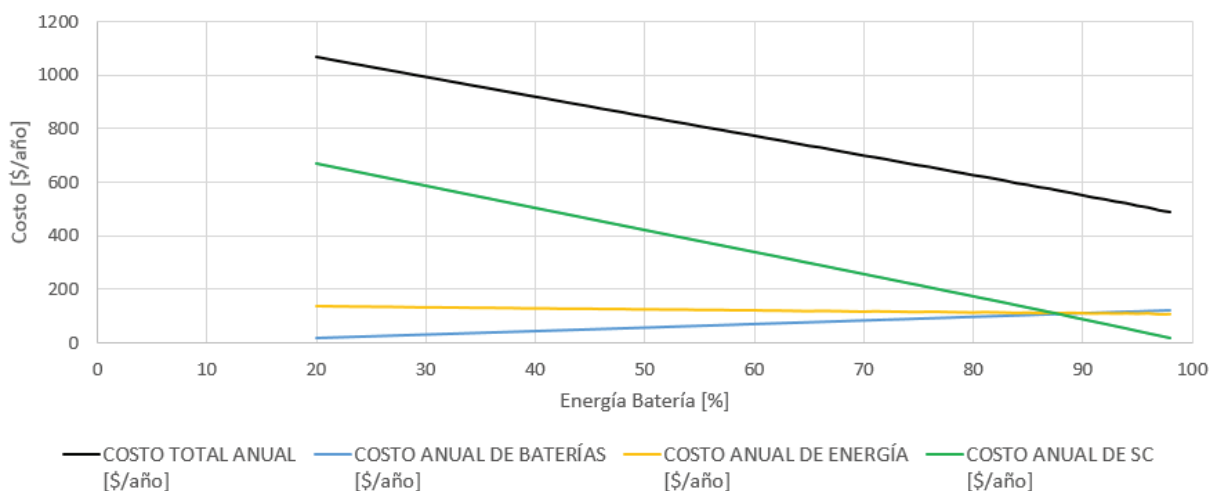


Figura 63. Simulación de costos anuales y costos de energía para el sistema de almacenamiento híbrido con baterías de Litio

CAPÍTULO 4. RESULTADOS

En este capítulo se escoge la tecnología idónea de acumulación para esta aplicación y se determinan las condiciones óptimas para la operación de lanchas taxis en Puerto Ayora. Se analiza la viabilidad económica de colocar paneles fotovoltaicos y se compara aspectos de costos y gases de efecto invernadero entre los sistemas de propulsión con gasolina y eléctricos.

4.1 COMPARACIÓN DE LOS DIFERENTES SISTEMAS DE ALMACENAMIENTO PROPUESTOS

A manera de resumen, en el capítulo 3 se simuló el sistema de almacenamiento con: i) baterías (plomo gel, Ni-MH y litio) para un día de operación, ii) baterías para un viaje de operación, iii) SC para un viaje de operación y iv) sistema híbrido (baterías y supercapacitores) para un viaje de operación.

En las baterías, la variable independiente de la simulación fue la profundidad de descarga, consiguiendo variar el tiempo de vida útil de las mismas. En los supercapacitores la variable independiente fue la capacitancia, esto con el objetivo de variar la eficiencia de carga.

El punto óptimo de consumo de energía no es el punto óptimo de costos. Para escoger el punto recomendado de funcionamiento se prioriza minimizar los costos, debido a que la inversión en el sistema de almacenamiento es superior a los costos anuales de energía.

En la Tabla 9 se presentan las características de los sistemas de almacenamiento en el punto óptimo de operación para cada configuración simulada en el capítulo 3. Esta tabla permite comparar estos puntos de operación para escoger el sistema más idóneo. De esta tabla se puede concluir lo siguiente:

- En ningún caso es económicamente viable utilizar baterías de Ni-MH debido a su alto costo total anual.
- Un sistema **híbrido** de almacenamiento no es viable ya que las simulaciones establecen que el punto óptimo de dimensionamiento tiende a utilizar solamente una tecnología. Esto se debe al incremento de costos por los controladores de potencia.
- Las baterías de litio, en su punto óptimo de dimensionamiento, presentan un tiempo de vida relativamente largo, es por esta razón que los costos anuales se reducen considerablemente. Teniendo presente que las baterías de litio son sensibles a las condiciones de operación y que el tiempo de vida es una variable sensible, se descartan las baterías de litio.
- Comparando las baterías de plomo gel para un viaje y para un día de operación, relacionando la capacidad nominal con el tiempo de vida, se concluye que es mejor cambiar las baterías cada 8 meses ya que a lo largo del tiempo representa menos desperdicios para el medio ambiente, además de que esta opción representa menos peso transportado en la embarcación y el riesgo de daño de las baterías es menor.
- Los supercapacitores presentan un alto costo inicial, lo cual se vuelve inviable para un inversionista privado como lo son los dueños actuales de las lanchas taxis.

En este punto la decisión depende de la persona o entidad que haga la inversión, sin embargo la opción óptima y eficiente, principalmente por su bajo costo anual y su baja inversión inicial, son las **“baterías de plomo gel para un viaje”**. Esta tecnología se usará para continuar el desarrollo del presente trabajo.

DESCRIPCIÓN		DOD [%]	CAP [F]	ENERGÍA [kWh]	PESO [kg]	COSTO INICIAL [\$]	TIEMPO DE VIDA [Años]	COSTO ANUAL DE BAT - SC [\$/año]	ENERGÍA ANUAL CONSUMIDA [kWh/año]	COSTO TOTAL ANUAL [\$/año]		
UN DÍA	BATERÍAS	Plomo Gel	28	-	16,5	367	4627	7,13	649	1723	787	
		Ni-MH	28	-	17	321	12745	5,65	2257	1702	2394	
		Litio	29	-	15	116	25177	12,6	1998	1580	2129	
UN VIAJE	BATERÍAS	Plomo Gel	14	-	1,4	31	391	0,66	595	1530	717	
		Ni-MH	15	-	1,5	28	1098	0,49	2235	1649	2367	
		Litio	14	-	1,3	10	2171	17	128	1381	238	
	SC	SC	-	1767	0,56	141	25446	26	975	2025	1377	
	HÍBRIDO	Plomo Gel - SC	Solo baterías									
		Ni-MH - SC	Solo supercapacitores									
Litio - SC		Solo baterías										

Tabla 9. Comparación del punto óptimo de dimensionamiento para las diferentes configuraciones de sistemas de almacenamiento

4.2 SIMULACIÓN DEL SISTEMA DE ALMACENAMIENTO ÓPTIMO

El sistema de almacenamiento óptimo con baterías de plomo gel tiene una energía nominal de 1,4 kWh, 48V y 29 Ah, sin embargo es necesario encontrar comercialmente las baterías que más se acerquen a este valor.

Se seleccionan 4 baterías en serie, de la marca ULTRACELL, modelo UCG35-12, las cuales tienen las características mostradas en la Tabla 10.

DESCRIPCIÓN	VALOR	UNIDAD
Energía nominal	0,42	kWh
Voltaje nominal	12	V
Capacidad nominal	35	Ah
Peso	11,2	kg
Resistencia interna	0,01	mΩ

Tabla 10. Características de las baterías ULTRACELL UCG35-12

El sistema de baterías compuesto por las 4 baterías en serie tendría las características mostradas en la Tabla 11.

DESCRIPCIÓN	VALOR	UNIDAD
Energía nominal	1,68	kWh
Voltaje nominal	48	V
Capacidad nominal	35	Ah
Peso	44,8	kg
Resistencia interna	0,04	mΩ
Costo en el Ecuador	471	\$

Tabla 11. Características del sistema de almacenamiento con baterías de plomo gel

Para simular este sistema de almacenamiento se utiliza la velocidad característica de un viaje de operación (Figura 35), para una distancia de 0,73 km (media aritmética) y para una distancia de 1,6 km (percentil 90). Se simula estas dos condiciones para conocer la respuesta del sistema a un viaje típico y para asegurar que se cumpla las necesidades de almacenamiento, respectivamente.

Simulación para la distancia media

Esta simulación se realiza para un peso medio de 1600 kg más el peso de las baterías.

La curva de potencia y corriente demandada de las baterías se presenta en la Figura 64. Se destaca la gran potencia que se demanda durante cortos instantes de tiempo de las baterías, sin embargo, la potencia media es mucho menor.

En la Tabla 12 se presentan las condiciones a las que trabajará el sistema de almacenamiento.

La energía utilizada en un viaje es 0,18 kWh, energía que debe ser cargada en 26 minutos, es decir a 48V y 8,7 A. Este valor es razonable ya que es 0,25 C-rate. Las pérdidas en la resistencia en el proceso de carga son de 0,003 kWh, un valor insignificante. La energía anual estimada, que se consume de la red eléctrica, es

1380 kWh/año, que equivale a **\$127**. El costo de la electricidad es subsidiada y se asume en \$0,092 [36].

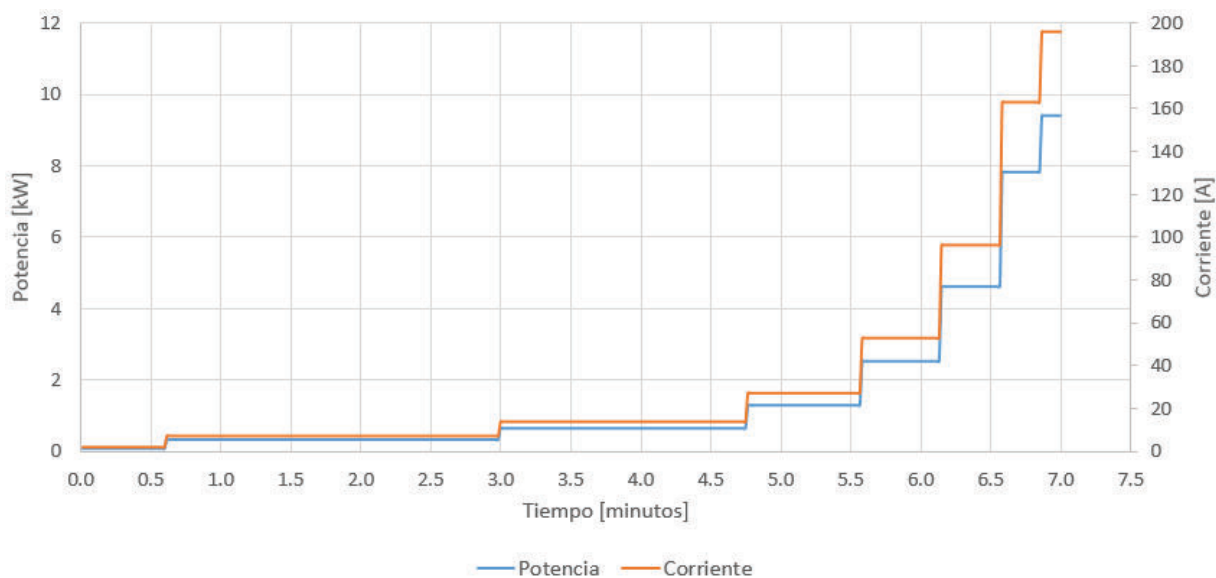


Figura 64. Simulación de la potencia y la corriente del sistema de baterías de plomo gel para un viaje de distancia media

DESCRIPCIÓN	VALOR	UNIDAD
DOD	18,1	%
# ciclos	4080	ciclos
Tiempo de vida	0,53	años
Costo anual de baterías	889	\$

Tabla 12. Resultados de la simulación del sistema de baterías de plomo gel para un viaje de distancia media

Simulación para la distancia percentil 90

Únicamente en ciertas ocasiones la embarcación recorre un viaje de distancia percentil 90, sin embargo el sistema de almacenamiento debe abastecer estas necesidades. La curva de potencia y corriente de descarga es similar a la de la Figura 64, se diferencia solamente en que el tiempo de recorrido es mayor.

La energía demandada en uno de estos recorridos es 0,31 kWh, lo que significa una DOD de 33%. Para cargar esta energía es necesario una corriente de 15 A, es decir un C-rate de 0,43.

4.3 VIABILIDAD DE PANELES FOTOVOLTAICOS

En esta sección se evalúa la viabilidad económica de colocar paneles fotovoltaicos (FV) en el techo de las lanchas para reducir el consumo de electricidad de la red pública. Para esto es necesario conocer ciertas variables las cuales se detallan a continuación:

- El área del techo de las lanchas es de 1,9 x 5 m, es decir $9,5 \text{ m}^2$ [14]. Esta superficie es limitante para la implementación de paneles FV.
- La radiación solar de referencia se tomó de la página de la NASA, la radiación promedio diaria es de $6 \text{ kWh/m}^2/\text{día}$ [38]. Este valor es estimado puesto que no proviene de torres meteorológicas del lugar.
- La eficiencia del sistema FV se estima en 10%, combinando la eficiencia de los paneles y de los sistemas electrónicos [22].

En $9,5 \text{ m}^2$ se puede colocar 6 paneles FV de 190 Wp, de 24 V, $1,277 \text{ m}^2$. Se tiene en total una capacidad instalada de 1,14 kW a 48V, $7,66 \text{ m}^2$. El costo de adquisición de paneles FV y el regulador de carga se estima en \$2100 [22].

Los paneles FV podrían generar 4,5 kWh/día. La energía diaria media consumida por la embarcación se estimó en 4,2 kWh/día en el ANEXO 7, es decir, que en un día promedio la embarcación podría funcionar sin necesidad de conectarse a la red pública para la carga. Cabe destacar que la radiación solar no es constante en el día y por lo tanto en horas de baja radiación la embarcación necesitaría un punto de recarga.

Comparando los costos de la energía comprada a la red pública y los costos del sistema FV, el proyecto no es rentable para los dueños de los taxis ya que se tiene un Valor Actual Neto (VAN) negativo de \$-317 y una Tasa Interna de Retorno (TIR) de 1,47%.

4.4 ANÁLISIS DE COSTOS DE LA PROPULSIÓN ELÉCTRICA Y A GASOLINA

4.4.1 COSTOS DE LA PROPULSIÓN ELÉCTRICA

En la Tabla 13 se presenta los costos de adquisición del sistema de propulsión eléctrico para la instalación en la embarcación [14].

ITEM	CANT	DESCRIPCIÓN	COSTO UNITARIO	COSTO TOTAL
1	1	Motor eléctrico de imanes permanentes para embarcaciones, 48V, 8 kW, con controlador electrónico.	\$ 8 300,00	\$ 8 300,00
2	4	Batería de plomo gel, 12V, 35 Ah.	\$ 117,75	\$ 471,00
3	1	Regulador de carga de baterías de plomo, 48V, 12A.	\$ 250,00	\$ 250,00
4	1	Varios	\$ 500,00	\$ 500,00
TOTAL				\$ 9 021,00

Tabla 13. Costos de adquisición del sistema de propulsión eléctrico

Los costos anuales en que se incurre por adquisición y operación con sistema de propulsión eléctrico se detallan en la Tabla 14. El costo anual del motor eléctrico se calcula suponiendo 20 años de vida útil, el costo anual del sistema de almacenamiento incluye las baterías y el regulador de carga, el costo anual de mantenimiento se calcula teniendo como referencia los costos de mantenimiento del Catamarán Solar del INER. Estos costos incluyen ½ litro de aceite para el eje del motor y dos sellos [14].

ITEM	DESCRIPCIÓN	COSTO UNITARIO
1	Costo anual del motor eléctrico	\$ 415,00
2	Costo anual del sistema de almacenamiento	\$ 901,50
3	Costo anual de la energía	\$ 110,40
4	Costo anual de mantenimiento	\$ 100,00
	TOTAL	\$ 1 526,90

Tabla 14. Costos anuales por adquisición y mantenimiento con sistema de propulsión eléctrico

4.4.2 COSTOS DE LA PROPULSIÓN A GASOLINA

En la Tabla 15 se presenta los costos de adquisición del sistema de propulsión a gasolina para la instalación en la embarcación.

ITEM	CANT	DESCRIPCIÓN	COSTO UNITARIO	COSTO TOTAL
1	1	Motor fuera de borda, Yamaha, 50 HP.	\$ 5 500,00	\$ 6 000,00
2	1	Varios	\$ 500,00	\$ 500,00
		TOTAL		\$ 6 500,00

Tabla 15. Costos de adquisición del sistema de propulsión a gasolina

Los costos anuales en que se incurre por adquisición y operación con sistema de propulsión a gasolina se detallan en la Tabla 16.

El costo anual del motor a gasolina se calcula suponiendo que presenta una duración de 20 años, sin embargo se añade el costo anual por reparación del motor.

El costo del combustible y de mantenimiento se obtiene de encuestas realizadas a los armadores por parte del INER, sección 2.2. El consumo diario de combustible tiene un valor medio de \$8 diarios [14].

ITEM	DESCRIPCIÓN	COSTO UNITARIO
1	Costo anual del motor a gasolina	\$ 800,00
2	Costo anual del combustible	\$ 2 920,00
3	Costo anual de mantenimiento	\$ 486,00
TOTAL		\$ 4 206,00

Tabla 16. Costos anuales por adquisición y mantenimiento con sistema de propulsión a gasolina

Los costos iniciales de adquisición en la propulsión eléctrica son 39% superiores a la propulsión a gasolina. Por el contrario, en los costos anuales totales, la propulsión eléctrica es 63% más económica que la propulsión a gasolina.

En los costos de adquisición en el sistema de propulsión eléctrico, los valores más significativos son el motor eléctrico y las baterías. En el sistema a gasolina es el mantenimiento y el combustible.

Tomando como proyecto el sustituir la propulsión actual de gasolina por la propulsión eléctrica, y con un tiempo de vida útil de 10 años, el VAN es \$19895 con una TIR de 106%. El periodo de recuperación es de 1 año.

Se concluye que este proyecto es **rentable** para los dueños de las lanchas taxis.

En la Tabla 17 se compara el consumo energético de la propulsión con motor de combustión interna (MCI) y motor eléctrico. Se observa que la eficiencia es superior en el sistema eléctrico y por ende los costos variables de energía son inferiores. Cabe destacar que éste análisis es realizado con la energía en el lugar, no se contemplan las pérdidas por transporte.

MCI	ELÉCTRICO
3.76 km/galón	4.06 km/kWh
2.55 km/dolar	44 km/dolar
0.11 km/kWh	4.06 km/kWh

Tabla 17. Comparación de consumos energéticos y económicos de la propulsión con MCI y motor eléctrico.

4.5 ANÁLISIS DE GASES DE EFECTO INVERNADERO DE LA PROPULSIÓN ELÉCTRICA Y A GASOLINA

Para calcular las emisiones de gases de efecto invernadero es necesario cuantificar la cantidad de combustible que gasta el sistema de propulsión con gasolina y eléctrico, en la Tabla 18 se presentan estos resultados.

La gasolina extra utilizada en la propulsión con motor de combustión interna (MCI) se calcula en función de los costos de combustible detallados en la sección 4.4.2 y el costo de la gasolina extra que es \$1,48.

El combustible utilizado en la generación de electricidad en Santa Cruz es el Diésel 2. La cantidad destinada para la propulsión eléctrica se calcula en función del porcentaje de generación térmica de Santa Cruz. Según datos del ARCONEL, en el 2015 el 84,5% de la energía eléctrica se generó con MCI y el 15,5% restante con energía renovable. El rendimiento medio de los generadores térmicos de Santa Cruz se estima en 13,46 kWh/galón [39].

DESCRIPCIÓN	VALOR	UNIDAD
Combustible utilizado en embarcaciones con propulsión a gasolina	1726	Galones/año
Combustible utilizado en embarcaciones con propulsión eléctrica, Diésel 2.	87	Galones/año

Tabla 18. Combustible anual consumido por propulsión eléctrica y a gasolina

El cálculo de la cantidad de dióxido de carbono (CO_2) emitido a la atmósfera se realiza mediante estequiometría, cuyo principio se fundamenta en la relación cuantitativa entre reactivos consumidos y productos formados en una reacción química. Utilizando las fórmulas aproximadas de la gasolina y el diésel proporcionadas por EP-PETROECUADOR, se plantea la reacción química de combustión completa para cada hidrocarburo y se balancea dicha ecuación de acuerdo a la ley de conservación de la masa para determinar qué cantidad de CO_2 se produce por cada kilogramo de combustible consumido. Es así que se estima en

promedio 15,5 toneladas/año de CO_2 emitidas por la propulsión con MCI y 1,1 toneladas/año de CO_2 emitidas por la propulsión eléctrica, es decir, se reduce alrededor de 15 veces las emisiones de gases de efecto invernadero. Se destaca que estas emisiones son para una embarcación, en total trabajan 24 embarcaciones que prestan el servicio de taxi.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La optimización se realizó teniendo como objetivo reducir los costos anuales (adquisición, operación y mantenimiento) y no el consumo de energía eléctrica, esto debido a que las simulaciones determinan que el costo en energía es inferior al costo anual del sistema de propulsión y el sistema de almacenamiento.

Las simulaciones del sistema de almacenamiento híbrido dan como resultados que los puntos óptimos de dimensionamiento se encuentran en los extremos, es decir, cuando el sistema tiende a ser compuesto netamente de baterías o netamente de supercapacitores. Esto permite concluir que la implementación de un sistema híbrido no es económicamente factible.

En esta aplicación, la relación de capacidad disponible-temperatura no fue una variable influyente, esto debido a que la temperatura de operación no es elevada, 28°C.

Las variables más influyentes en la optimización con baterías fueron: la relación del número de ciclos de vida en función de la profundidad de descarga y, la relación de la capacidad disponible en función del índice de descarga C-rate. Esto se debe a la relación exponencial de estos parámetros.

Los resultados de todas las simulaciones con baterías de Ni-MH indican que no son viables para esta aplicación por su alto costo de adquisición en comparación a otras tecnologías, además de otros parámetros como el efecto memoria.

En las simulaciones con baterías de litio, el punto óptimo tiende a localizarse a bajo porcentaje de profundidad de descarga, esto es debido a que a baja DOD el número de ciclos de vida alcanza poco más de un millón de ciclos. Sin embargo, este valor no es viable en la presente aplicación puesto que las hojas técnicas hacen referencia a que su capacidad decrece al orden de 4% anual.

Aunque la simulación con baterías de litio para un viaje de operación da como resultado el punto más óptimo comparado con otras tecnologías, técnicamente no fue viable debido a que no se puede extraer la corriente necesaria en los picos de demanda. Además, las baterías de litio presentan un alto riesgo de inversión debido a que el punto óptimo se encuentra cuando su tiempo de vida supera los 10 años y podrían sufrir algún daño por su sensibilidad en ciertas condiciones de operación.

Las baterías de plomo gel fueron la tecnología óptima para esta aplicación por su bajo costo de adquisición, además de que se reduce el riesgo de inversión puesto que su renovación es constante, aproximadamente cada 7 meses.

La tecnología de supercapacitores es técnicamente viable en estas aplicaciones, de hecho, si los SC en verdad operan cerca de un millón de ciclos y si el costo específico disminuye, esta tecnología sería más óptima que las baterías. Cabe mencionar que el costo de los SC es 27 veces mayor que el costo de las baterías de litio y, al ser una tecnología emergente, se espera que el costo decrezca considerablemente en los próximos años.

En esta aplicación, la propulsión eléctrica es hasta 63% más económica que la propulsión a gasolina, sin embargo, el capital inicial de la propulsión eléctrica es más elevado. Es importante aclarar que estos análisis son realizados con un precio del combustible subsidiado, si el precio fuera el real, la tecnología eléctrica tendría aún más ventajas económicas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] C. B. Ojeda, *INTRODUCCIÓN A LAS PLANTAS DE PROPULSIÓN NAVAL*, Segunda ed. .
- [2] J. O. Puig, *Teora del Buque. Flotabilidad y Estabilidad*. Barcelona: Edicions UPC SL, 2009.
- [3] J. Carlton, *Marine Propellers and Propulsion*. Global Head of MarineTechnology and Investigation, Lloyd's Register, 2007.
- [4] H. O. Kristensen and M. Lützen, "Prediction of Resistance and Propulsion Power of Ships," *Tech. Univ. Denmark*, vol. 2010–56, no. 04, 2012.
- [5] C. Stephen, *MAQUINAS ELECTRICAS*, Edición: 3. México: McGraw-Hill Interamericana de España S.L.
- [6] D. T. Hall, *Practical Marine Electrical Knowledge*, 3rd Revise. Livingston: Witherby Seamanship International Ltd, 2014.
- [7] W. Theodore, *Maquinas Electricas Y Sistemas De Potencia*. México etc.: Pearson Universidad, 2007.
- [8] J. Choi, J. Kim, J. S. Park, B. Gu, I. Jung, S. Member, and C. Won, "Experimental Evaluation of IPM Motor for Electric Vehicle Application," 2012.
- [9] J. An and A. Binder, "Design of Interior Permanent Magnet Synchronous Machine for Two-Drive-Transmission," 2015.
- [10] "Motores eléctricos para buques - Todos los fabricantes del nautismo y del marítimo - Vídeos." .
- [11] "TEMA." [Online]. Available: <http://www.tema.hr/>. [Accessed: 23-Sep-2015].
- [12] "Fuerabordas eléctricos - Torqueado." .
- [13] "Kräutler Elektromaschinen Empresa suministradora de motores eléctricos en Austria. - Inicio." .
- [14] "Instituto Nacional de Eficiencia Energética y Energías Renovables | Ecuador." .
- [15] C. J. M. Newell and C. S. S. Young, "BEYOND ELECTRIC SHIP Ministry of Defence," *Technol. Rev.*, 2000.
- [16] J. M. Prousalidis, N. D. Hatziaargyriou, B. C. Papadias, E. Energy, and N. Architecture, "On Studying Ship Electric Propulsion Motor Driving Schemes," *Int. Conf. Power Syst. Transients*, 2001.
- [17] "IEEE - 2012 Electrical Systems for Aircraft, Railway and Ship Propulsion (ESARS)."
- [18] A. F. Zobaa, *Energy Storage Technologies* .
- [19] Z. Zhou, M. Benbouzid, J. Frédéric Charpentier, F. Scuiller, and T. Tang, "A review of energy storage technologies for marine current energy systems," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 18, pp. 390–400, 2013.

- [20] N. Kularatna, "Energy storage devices for electronic systems," *Energy Storage Devices Electron. Syst.*, 2015.
- [21] "ULTRACELL - VRLA batteries, battery manufacturers, VRLA battery, UL Batteries, Rechargeable Batteries, Acid Batteries..." [Online]. Available: <http://www.ultracell.es/productos>. [Accessed: 23-Dec-2015].
- [22] "PROVIENTO - Baterias Solares." [Online]. Available: <http://www.proviento.com.ec/baterias.html>. [Accessed: 23-Dec-2015].
- [23] "Downloads | Nilar." .
- [24] N. Picciano, "Battery Aging and Characterization of Nickel Metal Hydride and Lead Acid Batteries," p. 148, 2007.
- [25] "Battery search | Saft." [Online]. Available: <http://www.saftbatteries.com/solutions/products/battery-search>. [Accessed: 29-Dec-2015].
- [26] "Energy Storage and Power Delivery for Wind Turbine Pitch Control." .
- [27] S. Trieste, S. Hmam, J.-C. Olivier, S. Bourguet, and L. Loron, "Techno-economic optimization of a supercapacitor-based energy storage unit chain: Application on the first quick charge plug-in ferry," *Appl. Energy*, 2015.
- [28] "CAP-XX Power to the IoT." [Online]. Available: <http://www.cap-xx.com/>. [Accessed: 06-Jan-2016].
- [29] UNCTAD, "El Transporte Marítimo," 2012, p. 210.
- [30] IEA, "Key World Energy Statistics," 2015.
- [31] IEA, "Railway Handbook 2015," 2015.
- [32] MICSE, "Balance Energético Nacional de Ecuador." 2015.
- [33] INER, "Desarrollo de un modelo de movilidad de transporte marítimo sostenible reemplazando motores de combustión interna por motores eléctricos." 2014.
- [34] E. C. and D. O. Guyot-Téphany J, C Grenier, "Mobility patterns and use of space in Galapagos," *Galapagos Rep.*, no. 2011–2012, pp. 52–58, 2013.
- [35] C. Z. Erazo, *Galapagos Report*. 2012.
- [36] ARCONEL, "Pliego Tarifario para las Empresas Eléctricas." 2016.
- [37] Maxwell, "48V MODULES PRODUCT SPECIFICATIONS," pp. 1–6.
- [38] "NASA Surface meteorology and Solar Energy - Available Tables." [Online]. Available: https://eosweb.larc.nasa.gov/cgi-bin/sse/grid.cgi?&num=090090&lat=-0.701&submit=Submit&hgt=100&veg=17&sitelev=&email=&p=grid_id&p=mx_horizon&p=ret_tlt0&step=2&lon=-90.22. [Accessed: 11-Mar-2016].
- [39] ELEGALAPAGOS, "INFORME DE LA PRESIDENCIA EJECUTIVA A LA JUNTA GENERAL DE ACCIONISTAS POR EL EJERCICIO ECONÓMICO CORRESPONDIENTE AL PERIODO 1 DE ENERO – 31 DE DICIEMBRE DE 2012," pp. 1–24, 2013.

[40] R. A. Huggins, *Energy Storage*. 2010.

ANEXOS

ANEXO 1. Terminología de baterías y supercapacitores

Capacidad

Se define como la integral de la corriente eléctrica en un tiempo determinado. Se mide en mAh o Ah.

Capacidad estándar

Es la capacidad total que la batería puede acumular y entregar bajo condiciones estándar hasta el punto final de voltaje de descarga (EODV). Se entiende como condiciones estándar a que la batería es cargada y descargada a una temperatura específica y a un índice C-rate determinado.

Capacidad actual

Es la capacidad bajo ciertas condiciones específicas de funcionamiento.

Capacidad disponible

Es una fracción de la capacidad actual la cual puede ser entregada hasta el EODV.

Capacidad nominal

Es la capacidad mínima que tiene una batería en su fabricación bajo condiciones estándar de funcionamiento.

Capacidad retenida

Es la capacidad que tiene una batería luego de que se ha realizado una carga completa y se ha almacenado la misma por un determinado tiempo.

C-rate

Es el valor en A o mA igual a la capacidad nominal. Este concepto facilita el estudio de la carga y descarga de baterías debido a que las baterías en un amplio rango de capacidades responden de igual manera a C-rate iguales. En la Figura 65 se

presenta una gráfica que muestra la capacidad entregada en función de la velocidad de descarga. Se puede observar que a índices menores de C la capacidad de descarga es mayor, y viceversa.

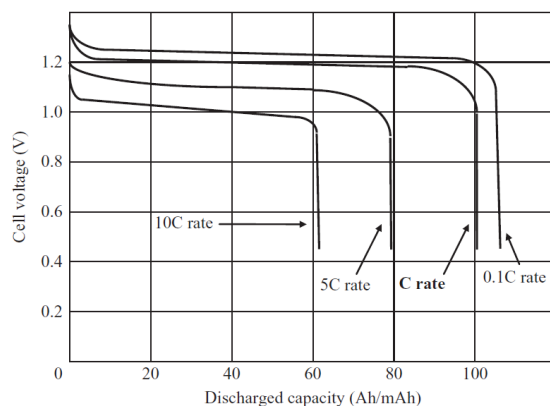


Figura 65. Capacidad vs velocidad de descargar para una batería típica¹⁴

Densidad de energía

Es la energía dividida para el volumen o peso de una batería.

Densidad de potencia

Es la cantidad de potencia que una batería puede suministrar por unidad de volumen en un estado específico de carga (SOC).

Ciclo de vida

Es la medida de una batería para realizar descargar profundas y recargas de acuerdo a las recomendaciones del fabricante. El ciclo de vida depende de varios factores, entre los que se encuentra la corriente de descarga y la profundidad de descarga de cada ciclo. Este factor es muy importante en el desarrollo y optimización de baterías.

¹⁴ Figura obtenida de [20].

Tasa de auto descarga

Es la medida de cuánto tiempo una batería puede almacenar energía y entregarla luego de un tiempo.

Aceptación de carga

Es la capacidad de una batería para aceptar carga. Se puede calcular con la relación $\frac{C_{load}}{C_{charge}}$. Este parámetro es afectado por la temperatura y el estado de la carga.

Profundidad de descarga (DOD)

Es la capacidad entregada por la batería dividida para la capacidad actual.

Curva de descarga de baterías

En la Figura 66 se presenta curvas típicas de descarga para varias tecnologías de baterías.

Una batería completamente cargada presenta un voltaje superior al nominal, este voltaje nominal es normalmente plano hasta que la batería se descarga al 20% de su capacidad nominal. Inferior al 20% el voltaje cae drásticamente. En la Figura 66 se puede observar el voltaje de circuito abierto y la rodilla de la curva de descarga donde el voltaje cae drásticamente.

Estado de carga (SOC)

Es la relación entre la energía almacenada y la energía nominal que puede almacenar la batería.

Estado de salud (SOH)

Es la habilidad de una batería para almacenar energía y retenerla por periodos extendidos, relativo a su capacidad nominal. Se estima que la capacidad de almacenamiento va disminuyendo con el uso de la batería.

Se define como el “**final de la vida útil**” de una batería cuando la capacidad de la batería ha caído 20% de su capacidad nominal.

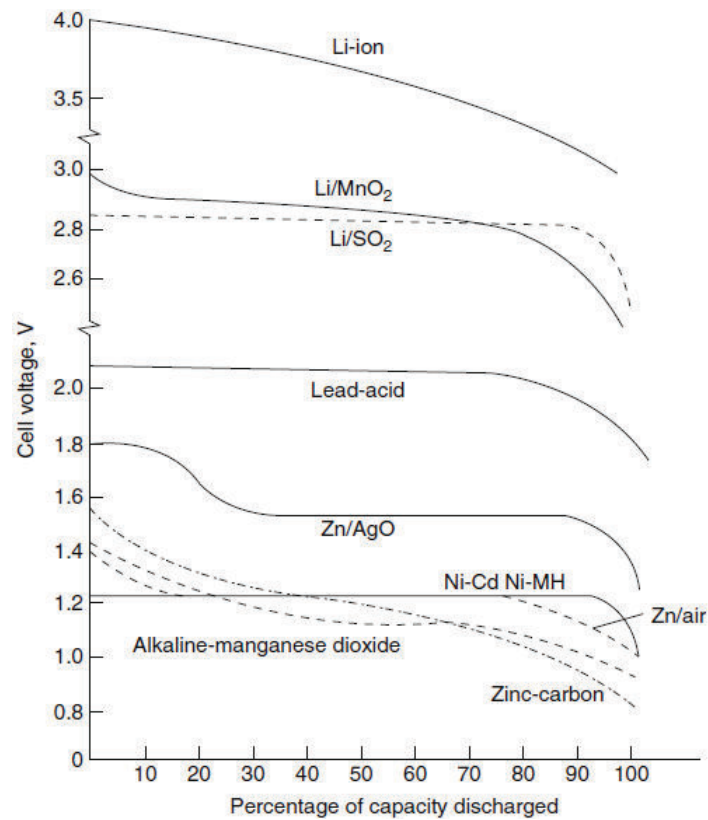


Figura 66. Curva de descarga típica de una batería recargable¹⁵

¹⁵ Figura obtenida de [40].

ANEXO 2. Características de baterías de plomo gel, Ni-MH y litio

Baterías de plomo gel

La información que se detalla a continuación acerca de las características de baterías de plomo gel son tomadas de una batería de la marca ULTRACELL [21] de ciclo profundo y de larga duración, aplicable al almacenamiento en energías renovables y a tracción eléctrica.

DESCRIPCIÓN	VALOR	UNIDAD
Voltaje nominal	12	V
Capacidad nominal (20hr)	275	AH
Maxima corriente de descarga (5s)	2500	A
Energía específica	45	Wh/kg
Resistencia interna	2,5	mΩ
Costo en el Ecuador	0,28	\$/Wh
Efecto memoria	No	

Tabla 19. Características técnicas de una batería de plomo gel [21]

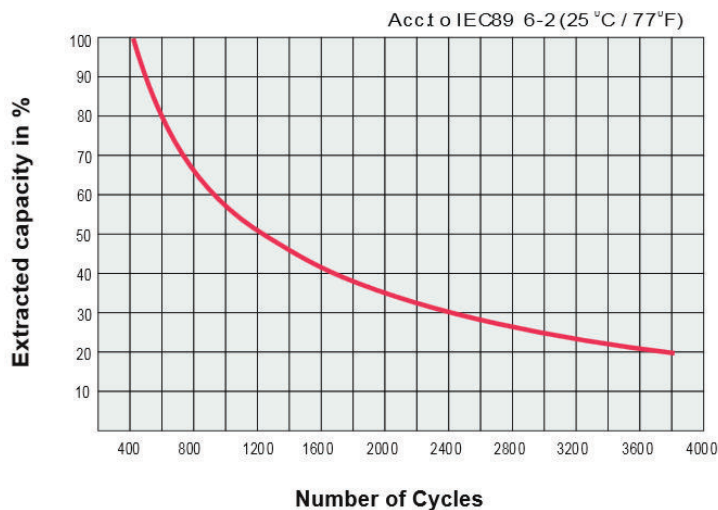


Figura 67. Ciclo de vida de una batería de plomo gel en función de la profundidad de descarga [21]

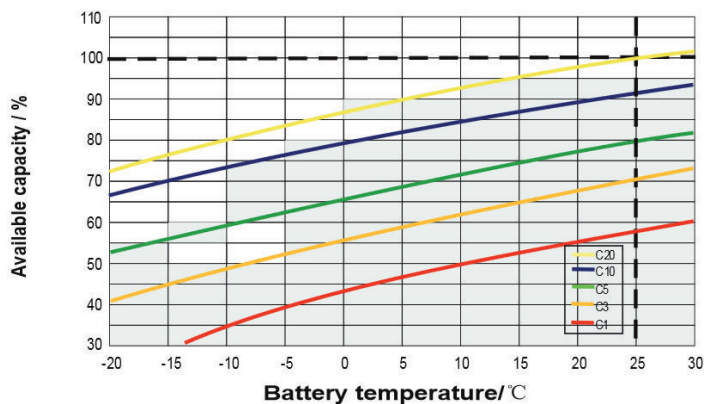


Figura 68. Efectos de la temperatura en la capacidad de una batería de plomo ácido [21]

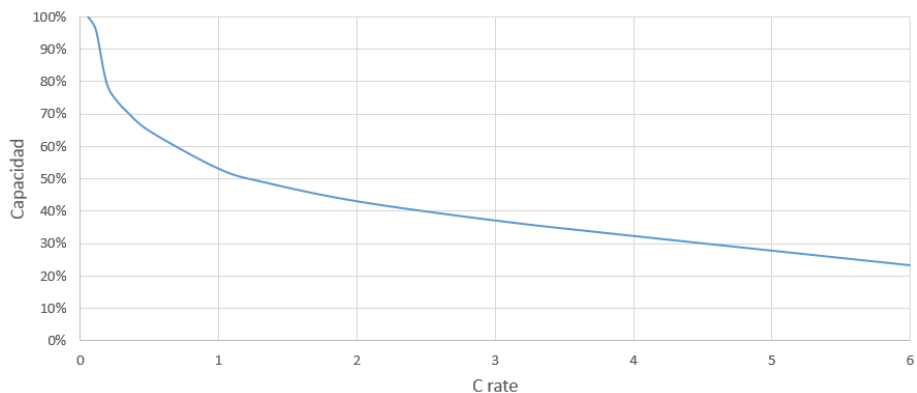


Figura 69. Efecto del C-rate en la capacidad de una batería de plomo gel [21]

Baterías de Ni-MH

La información que se detalla a continuación acerca de las características de baterías de Ni-MH son tomadas de una batería de la empresa NILAR [23] desarrollada específicamente para aplicaciones de vehículos eléctricos (EV), HEV, telecomunicaciones y Smart Grids.

DESCRIPCIÓN	VALOR	UNIDAD
Voltaje nominal	12	V
Capacidad nominal (20hr)	10	AH
Maxima corriente de descarga	30	A
Energía específica	53	Wh/kg
Resistencia interna	2,5	mΩ/Cell
Costo en el Ecuador	0,75	\$/Wh
Efecto memoria	Si	

Tabla 20. Características técnicas de una batería de Ni-MH [23]

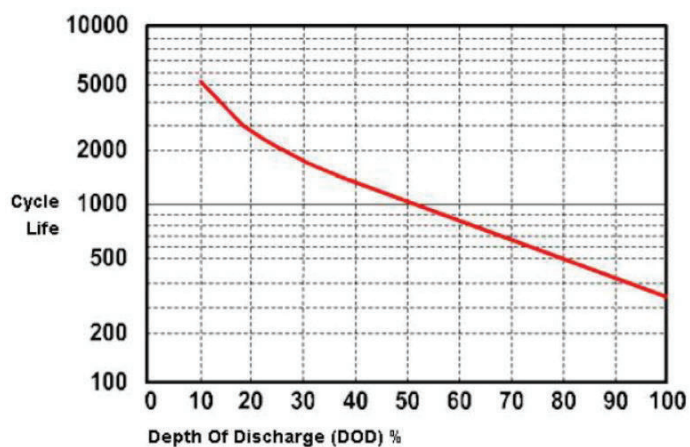


Figura 70. Ciclo de vida de una batería de Ni-MH en función de la profundidad de descarga [24]

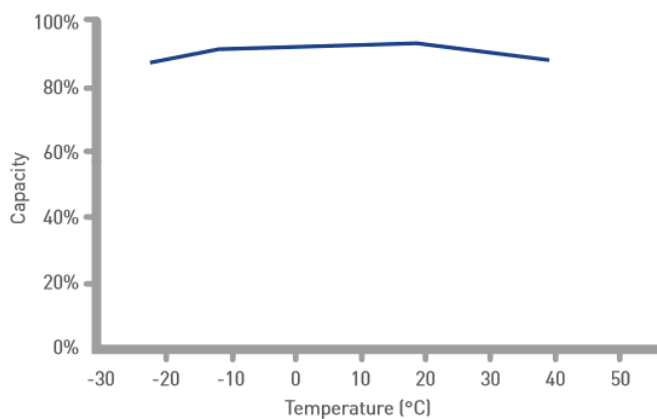


Figura 71. Efectos de la temperatura en la capacidad de una batería de Ni-MH [23]

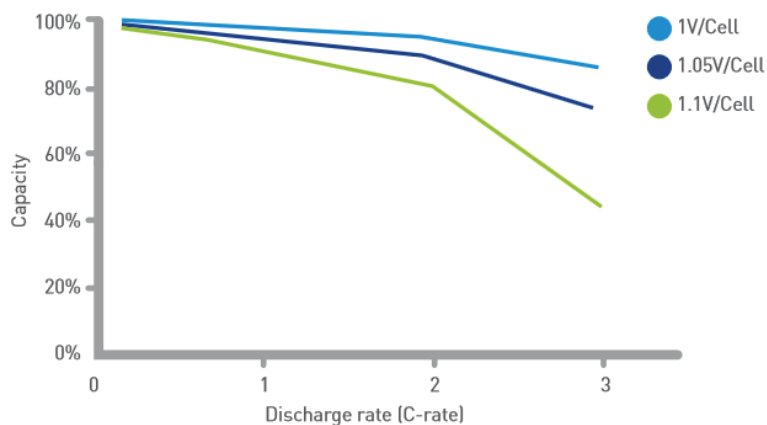


Figura 72. Capacidad de una batería de Ni-MH en función de la corriente de descarga [23]

Baterías de Litio

Dentro de las baterías a base de litio se encuentran las de Litio-Ion, Litio-polímero, Litio-metal y Litio-hierro fosfato. La información que se detalla a continuación acerca de las características de baterías de Litio son tomadas de la empresa SAFT [25], destinadas a las telecomunicaciones, industria, tracción, sector marítimo y sector militar.

DESCRIPCIÓN	VALOR	UNIDAD
Voltaje nominal	48	V
Capacidad nominal (20hr)	74	AH
Maxima corriente de descarga	44	A
Energía específica	130	Wh/kg
Costo en el Ecuador	1,67	\$/Wh
Efecto memoria	No	

Tabla 21. Características técnicas de una batería de Litio [25]

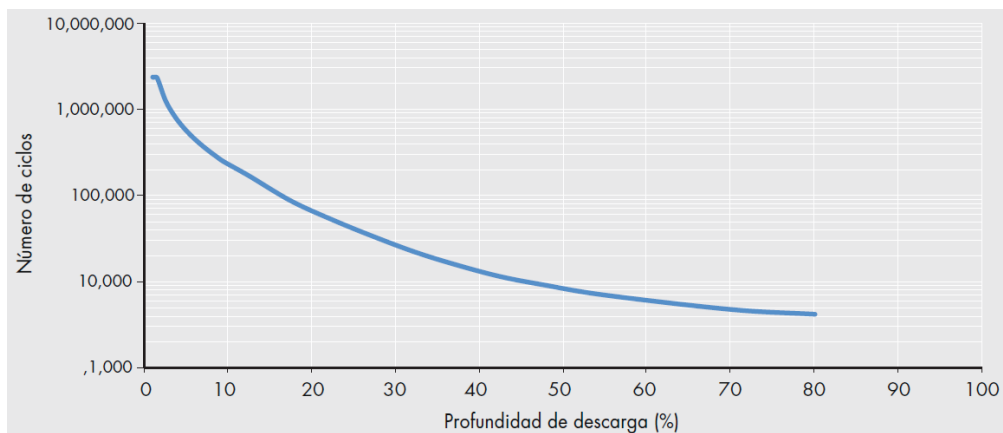


Figura 73. Ciclo de vida de una batería de Litio en función de la profundidad de descarga [25]

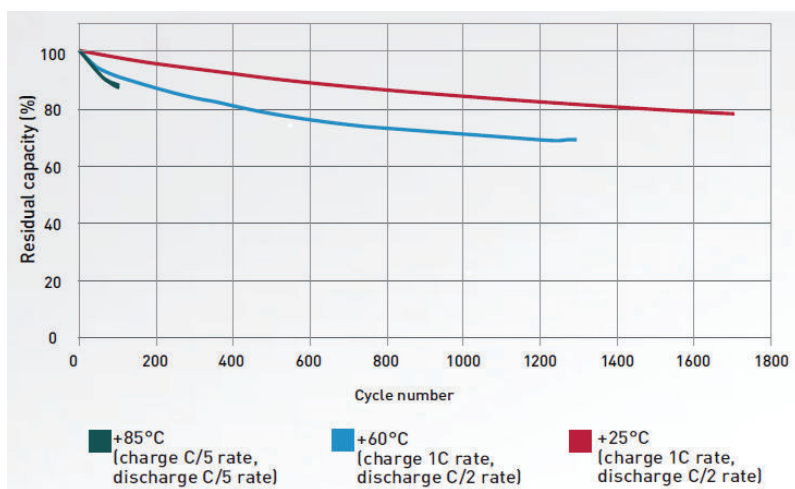


Figura 74. Efectos de la temperatura en la capacidad de una batería de Litio [25]

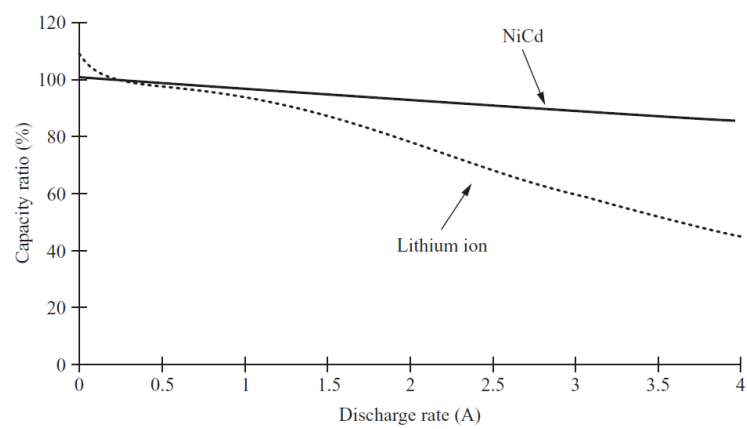


Figura 75. Capacidad de una batería de Litio en función de la corriente de descarga¹⁶

¹⁶ Figura obtenida de [20].

ANEXO 3. Características de supercapacitores

La información que se detalla a continuación acerca de las características de SC son tomadas de un supercapacitor de la marca MAXWELL [26] de alto voltaje, aplicable al almacenamiento de energía para tracción eléctrica.

DESCRIPCIÓN	VALOR	UNIDAD
Capacitancia nominal	5,8	F
Voltaje nominal	160	V
ESR inicial máximo	240	mΩ
Máxima energía acumulada	21	Wh
Peso	5,2	kg
Energía específica	4	Wh/kg
Costo en el Ecuador	45	\$/Wh

Tabla 22. Características técnicas de un supercapacitor

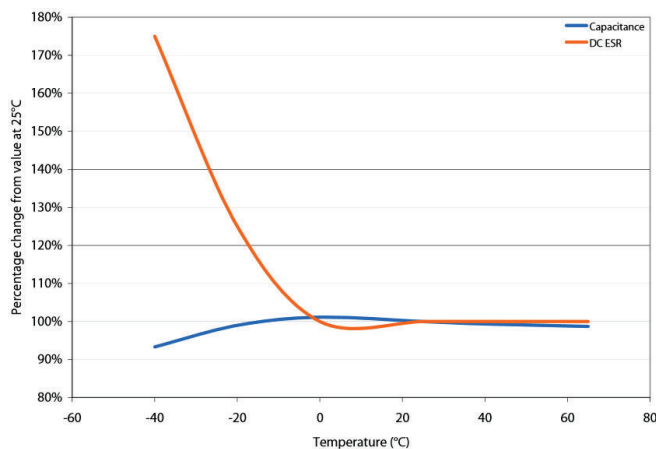


Figura 76. Capacitancia y ESR en función de la temperatura de un supercapacitor [26]

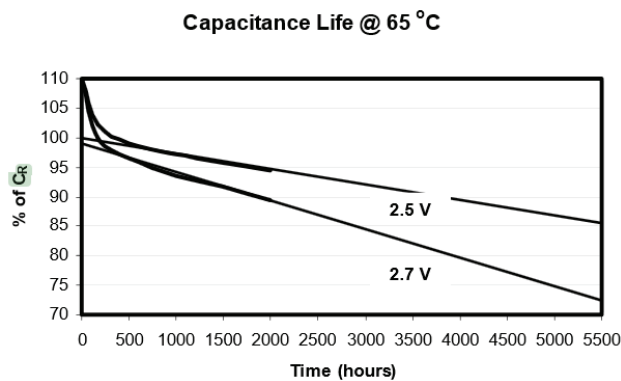


Figura 77. Capacitancia en función del tiempo de uso y del voltaje de un supercapacitor [26]

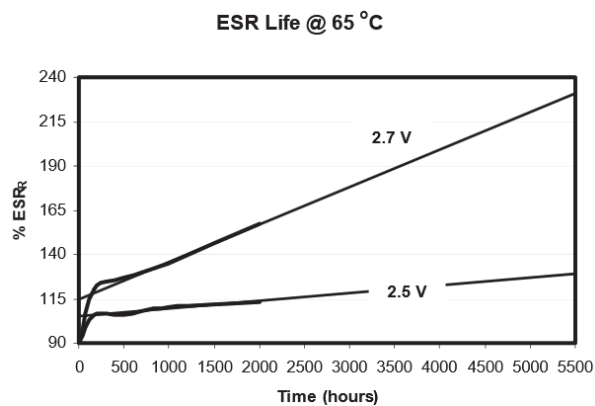


Figura 78. ESR en función del tiempo de uso y del voltaje de un supercapacitor [26]

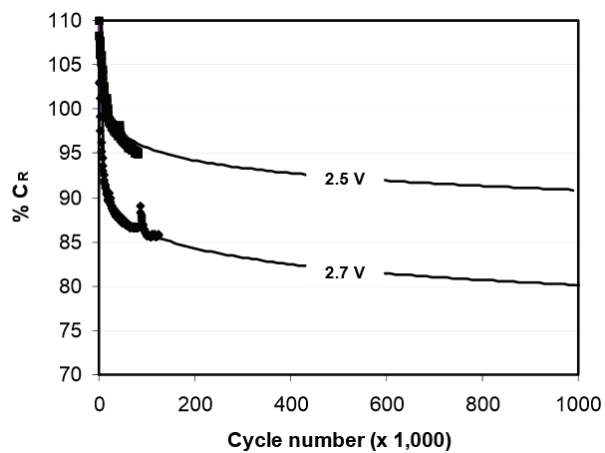


Figura 79. Capacidad de un supercapacitor en función del número de ciclos y del voltaje de operación [26]

ANEXO 4. Tabla de resultados para la simulación con baterías de plomo para un día de operación

DOD [%]	PESO BATERÍAS [kg]	ENERGÍA NOMINAL [kWh]	ENERGÍA DISPONIBLE [kWh]	ENERGÍA PERCENTIL 90 [kWh/día]	VIABLE	C-rate DESCARGA	C-rate MAX DESCARGA	COSTO BATERÍAS [\$]	TIEMPO DE VIDA BATERÍAS [años]	COSTO ANUAL DE BATERÍAS [\$/año]	ENERGÍA ANUAL CONSUMIDA [kWh/año]	COSTO ANUAL DE ENERGÍA [\$/año]	COSTO TOTAL ANUAL [\$/año]
100	96	4,30	3,01	7,58	NO	0,36	2,98	1204	1,06	1138	1602	128	1266
99	97	4,35	3,05	7,59	NO	0,35	2,95	1217	1,08	1126	1602	128	1254
98	98	4,39	3,10	7,59	NO	0,35	2,92	1230	1,10	1113	1602	128	1242
97	99	4,44	3,14	7,59	NO	0,35	2,89	1243	1,13	1102	1603	128	1230
96	100	4,49	3,18	7,59	NO	0,34	2,86	1256	1,15	1090	1603	128	1218
95	101	4,53	3,23	7,59	NO	0,34	2,83	1270	1,18	1079	1604	128	1207
94	102	4,58	3,27	7,60	NO	0,34	2,80	1284	1,20	1067	1604	128	1196
93	103	4,64	3,32	7,60	NO	0,33	2,77	1298	1,23	1056	1605	128	1185
92	104	4,69	3,37	7,60	NO	0,33	2,74	1312	1,26	1046	1605	128	1174
91	105	4,74	3,42	7,60	NO	0,33	2,72	1327	1,28	1035	1606	128	1163
90	107	4,79	3,47	7,60	NO	0,32	2,69	1342	1,31	1025	1606	129	1153
89	108	4,85	3,52	7,61	NO	0,32	2,66	1358	1,34	1014	1607	129	1143
88	109	4,91	3,57	7,61	NO	0,32	2,63	1374	1,37	1004	1608	129	1133
87	110	4,96	3,62	7,61	NO	0,31	2,60	1390	1,40	995	1608	129	1123
86	112	5,02	3,68	7,61	NO	0,31	2,57	1407	1,43	985	1609	129	1114
85	113	5,09	3,74	7,62	NO	0,30	2,54	1424	1,46	975	1609	129	1104
84	114	5,15	3,80	7,62	NO	0,30	2,51	1441	1,49	966	1610	129	1095
83	116	5,21	3,86	7,62	NO	0,30	2,48	1459	1,52	957	1611	129	1086
82	117	5,28	3,92	7,63	NO	0,29	2,46	1478	1,56	948	1611	129	1077
81	119	5,35	3,98	7,63	NO	0,29	2,43	1497	1,59	939	1612	129	1068
80	120	5,41	4,05	7,63	NO	0,29	2,40	1516	1,63	931	1613	129	1060
79	122	5,49	4,12	7,63	NO	0,28	2,37	1536	1,67	922	1613	129	1051

DOD [%]	PESO BATERIAS [kg]	ENERGÍA NOMINAL [kWh]	ENERGÍA DISPONIBLE [kWh]	ENERGÍA PERCENTIL 90 [kWh/día]	VIABLE	C-rate DESCARGA	C-rate MAX DESCARGA	COSTO BATERIAS [\$]	TIEMPO DE VIDA BATERIAS [años]	COSTO ANUAL DE BATERIAS [\$/año]	ENERGÍA ANUAL CONSUMIDA [kWh/año]	COSTO ANUAL DE ENERGÍA [\$/año]	COSTO TOTAL ANUAL [\$/año]
77	125	5,63	4,26	7,64	NO	0,28	2,31	1577	1,74	906	1615	129	1035
76	127	5,71	4,34	7,64	NO	0,27	2,28	1599	1,78	898	1615	129	1027
75	129	5,79	4,41	7,65	NO	0,27	2,25	1621	1,82	890	1616	129	1019
74	130	5,87	4,49	7,65	NO	0,26	2,22	1643	1,86	882	1617	129	1012
73	132	5,95	4,57	7,65	NO	0,26	2,20	1667	1,91	875	1618	129	1004
72	134	6,04	4,66	7,66	NO	0,26	2,17	1691	1,95	867	1619	130	997
71	136	6,13	4,74	7,66	NO	0,25	2,14	1716	2,00	860	1620	130	989
70	138	6,22	4,83	7,67	NO	0,25	2,11	1741	2,04	853	1621	130	982
69	140	6,31	4,92	7,67	NO	0,25	2,08	1767	2,09	846	1621	130	975
68	142	6,41	5,02	7,67	NO	0,24	2,05	1794	2,14	839	1622	130	969
67	145	6,51	5,12	7,68	NO	0,24	2,02	1822	2,19	832	1623	130	962
66	147	6,61	5,22	7,68	NO	0,24	1,99	1851	2,24	825	1624	130	955
65	149	6,72	5,33	7,69	NO	0,23	1,96	1881	2,30	819	1625	130	949
64	152	6,83	5,44	7,69	NO	0,23	1,94	1911	2,35	812	1627	130	942
63	154	6,94	5,55	7,70	NO	0,23	1,91	1943	2,41	806	1628	130	936
62	157	7,06	5,67	7,70	NO	0,22	1,88	1976	2,47	800	1629	130	930
61	160	7,18	5,79	7,71	NO	0,22	1,85	2010	2,53	794	1630	130	924
60	162	7,30	5,92	7,71	NO	0,21	1,82	2045	2,60	788	1631	131	918
59	165	7,43	6,05	7,72	NO	0,21	1,79	2081	2,66	782	1633	131	912
58	168	7,57	6,19	7,72	NO	0,21	1,76	2119	2,73	776	1634	131	907
57	171	7,71	6,33	7,73	NO	0,20	1,73	2158	2,80	770	1635	131	901
56	174	7,85	6,48	7,74	NO	0,20	1,70	2198	2,88	765	1637	131	895
55	178	8,00	6,63	7,74	NO	0,20	1,68	2240	2,95	759	1638	131	890
54	181	8,16	6,79	7,75	NO	0,19	1,65	2284	3,03	754	1640	131	885
53	185	8,32	6,96	7,76	NO	0,19	1,62	2329	3,11	748	1641	131	879
52	189	8,49	7,13	7,76	NO	0,19	1,59	2376	3,20	743	1643	131	874

DOD [%]	PESO BATERIAS [kg]	ENERGÍA NOMINAL [kWh]	ENERGÍA DISPONIBLE [kWh]	ENERGÍA PERCENTIL 90 [kWh/día]	VIABLE	C-rate DESCARGA	C-rate MAX DESCARGA	COSTO BATERIAS [\$]	TIEMPO DE VIDA BATERIAS [años]	COSTO ANUAL DE BATERIAS [\$ /año]	ENERGÍA ANUAL CONSUMIDA [kWh/año]	COSTO ANUAL DE ENERGÍA [\$ /año]	COSTO TOTAL ANUAL [\$ /año]
51	193	8,66	7,32	7,77	NO	0,18	1,56	2426	3,29	738	1645	132	869
50	197	8,85	7,51	7,78	NO	0,18	1,53	2477	3,38	732	1647	132	864
49	201	9,04	7,71	7,79	NO	0,18	1,50	2530	3,48	727	1649	132	859
48	205	9,24	7,91	7,80	SI	0,17	1,47	2586	3,58	722	1650	132	854
47	210	9,44	8,13	7,80	SI	0,17	1,44	2644	3,69	718	1653	132	850
46	215	9,66	8,36	7,81	SI	0,16	1,42	2705	3,80	713	1655	132	845
45	220	9,89	8,60	7,82	SI	0,16	1,39	2769	3,91	708	1657	133	841
44	225	10,13	8,86	7,83	SI	0,16	1,36	2836	4,03	703	1659	133	836
43	231	10,38	9,12	7,84	SI	0,15	1,33	2907	4,16	699	1662	133	832
42	237	10,64	9,40	7,86	SI	0,15	1,30	2981	4,29	694	1664	133	827
41	243	10,92	9,70	7,87	SI	0,15	1,27	3058	4,43	690	1667	133	823
40	249	11,21	10,01	7,88	SI	0,14	1,24	3140	4,58	686	1670	134	819
39	256	11,52	10,34	7,89	SI	0,14	1,21	3227	4,73	682	1673	134	815
38	263	11,85	10,69	7,91	SI	0,14	1,18	3318	4,90	678	1676	134	812
37	271	12,19	11,06	7,92	SI	0,13	1,16	3415	5,07	674	1680	134	808
36	279	12,56	11,46	7,94	SI	0,13	1,13	3517	5,25	670	1683	135	805
35	288	12,95	11,88	7,95	SI	0,12	1,10	3626	5,44	667	1687	135	802
34	297	13,36	12,32	7,97	SI	0,12	1,07	3741	5,64	663	1691	135	799
33	307	13,80	12,80	7,99	SI	0,12	1,04	3865	5,85	660	1696	136	796
32	317	14,27	13,31	8,01	SI	0,11	1,01	3996	6,08	657	1700	136	793
31	328	14,78	13,86	8,03	SI	0,11	0,98	4137	6,32	655	1705	136	791
30	340	15,32	14,45	8,05	SI	0,11	0,95	4289	6,57	653	1711	137	789
29	353	15,90	15,09	8,08	SI	0,10	0,92	4451	6,84	651	1716	137	788
28	367	16,53	15,77	8,11	SI	0,10	0,90	4627	7,13	649	1723	138	787
27	382	17,20	16,52	8,13	SI	0,10	0,87	4817	7,43	648	1729	138	787
26	399	17,94	17,33	8,17	SI	0,09	0,84	5023	7,75	648	1737	139	787

DOD [%]	PESO BATERIAS [kg]	ENERGÍA NOMINAL [kWh]	ENERGÍA DISPONIBLE [kWh]	ENERGÍA PERCENTIL 90 [kWh/día]	VIABLE	C-rate DESCARGA	C-rate MAX DESCARGA	COSTO BATERIAS [\$]	TIEMPO DE VIDA BATERIAS [años]	COSTO ANUAL DE BATERIAS [\$/año]	ENERGÍA ANUAL CONSUMIDA [kWh/año]	COSTO ANUAL DE ENERGÍA [\$/año]	COSTO TOTAL ANUAL [\$/año]
25	417	18,76	18,23	8,21	SI	0,09	0,81	5254	8,10	649	1746	140	789
24	437	19,65	19,21	8,25	SI	0,09	0,78	5501	8,46	650	1755	140	791
23	Inf	Inf	Inf	Inf	SI	0,00	0,00	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf
22	Inf	Inf	Inf	Inf	SI	0,00	0,00	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf
21	Inf	Inf	Inf	Inf	SI	0,00	0,00	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf
20	Inf	Inf	Inf	Inf	SI	0,00	0,00	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf
19	Inf	Inf	Inf	Inf	SI	0,00	0,00	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf
18	Inf	Inf	Inf	Inf	SI	0,00	0,00	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf
17	Inf	Inf	Inf	Inf	SI	0,00	0,00	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf
16	Inf	Inf	Inf	Inf	SI	0,00	0,00	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf
15	Inf	Inf	Inf	Inf	SI	0,00	0,00	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf
14	Inf	Inf	Inf	Inf	SI	0,00	0,00	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf
13	Inf	Inf	Inf	Inf	SI	0,00	0,00	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf
12	Inf	Inf	Inf	Inf	SI	0,00	0,00	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf
11	Inf	Inf	Inf	Inf	SI	0,00	0,00	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf
10	Inf	Inf	Inf	Inf	SI	0,00	0,00	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf
9	Inf	Inf	Inf	Inf	SI	0,00	0,00	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf
8	Inf	Inf	Inf	Inf	SI	0,00	0,00	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf
7	Inf	Inf	Inf	Inf	SI	0,00	0,00	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf
6	Inf	Inf	Inf	Inf	SI	0,00	0,00	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf
5	Inf	Inf	Inf	Inf	SI	0,00	0,00	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf
4	Inf	Inf	Inf	Inf	SI	0,00	0,00	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf
3	Inf	Inf	Inf	Inf	SI	0,00	0,00	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf
2	Inf	Inf	Inf	Inf	SI	0,00	0,00	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf
1	Inf	Inf	Inf	Inf	SI	0,00	0,00	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf

ANEXO 5. Tabla de resultados para la simulación con baterías de Ni-MH para un día de operación

DOD [%]	PESO BATERÍAS [kg]	ENERGÍA NOMINAL [kWh]	ENERGÍA DISPONIBLE [kWh]	ENERGÍA PERCENTIL 90 [kWh/día]	VIABLE	C-rate DESCARGA	C-rate MAX DESCARGA	COSTO BATERÍAS [\$]	TIEMPO DE VIDA BATERÍAS [años]	COSTO ANUAL DE BATERÍAS [\$/año]	ENERGÍA ANUAL CONSUMIDA [kWh/año]	COSTO ANUAL DE ENERGÍA [\$/año]	COSTO TOTAL ANUAL [\$/año]
100	84	4,46	4,27	7,56	NO	0,34	2,85	3347	0,96	3489	1596	128	3616
99	85	4,51	4,31	7,56	NO	0,34	2,82	3382	0,98	3453	1597	128	3581
98	86	4,56	4,36	7,56	NO	0,34	2,79	3417	1,00	3419	1597	128	3547
97	87	4,60	4,41	7,57	NO	0,33	2,77	3453	1,02	3385	1598	128	3513
96	88	4,65	4,46	7,57	NO	0,33	2,74	3490	1,04	3352	1598	128	3480
95	89	4,70	4,50	7,57	NO	0,33	2,71	3528	1,06	3319	1598	128	3447
94	90	4,76	4,55	7,57	NO	0,32	2,68	3566	1,08	3288	1599	128	3415
93	91	4,81	4,61	7,57	NO	0,32	2,65	3606	1,11	3256	1599	128	3384
92	92	4,86	4,66	7,58	NO	0,32	2,63	3646	1,13	3226	1600	128	3354
91	93	4,92	4,71	7,58	NO	0,31	2,60	3687	1,15	3196	1600	128	3324
90	94	4,97	4,77	7,58	NO	0,31	2,57	3729	1,18	3166	1601	128	3294
89	95	5,03	4,82	7,58	NO	0,31	2,54	3772	1,20	3138	1601	128	3266
88	96	5,09	4,88	7,58	NO	0,30	2,52	3816	1,23	3109	1602	128	3238
87	97	5,15	4,94	7,59	NO	0,30	2,49	3861	1,25	3082	1602	128	3210
86	98	5,21	5,00	7,59	NO	0,30	2,46	3908	1,28	3055	1603	128	3183
85	99	5,27	5,06	7,59	NO	0,29	2,43	3955	1,31	3029	1603	128	3157
84	101	5,34	5,13	7,59	NO	0,29	2,40	4003	1,33	3003	1604	128	3131
83	102	5,40	5,19	7,60	NO	0,29	2,38	4053	1,36	2977	1604	128	3106
82	103	5,47	5,26	7,60	NO	0,28	2,35	4104	1,39	2953	1605	128	3081
81	105	5,54	5,33	7,60	NO	0,28	2,32	4156	1,42	2928	1606	128	3057
80	106	5,61	5,40	7,60	NO	0,28	2,29	4209	1,45	2905	1606	128	3033
79	107	5,69	5,47	7,61	NO	0,27	2,27	4264	1,48	2882	1607	129	3010

DOD [%]	PESO BATERÍAS [kg]	ENERGÍA NOMINAL [kWh]	ENERGÍA DISPONIBLE [kWh]	ENERGÍA PERCENTIL 90 [kWh/día]	VIABLE	C-rate DESCARGA	C-rate MAX DESCARGA	COSTO BATERÍAS [\$]	TIEMPO DE VIDA BATERÍAS [años]	COSTO ANUAL DE BATERÍAS [\$/año]	ENERGÍA ANUAL CONSUMIDA [kWh/año]	COSTO ANUAL DE ENERGÍA [\$/año]	COSTO TOTAL ANUAL [\$/año]
77	110	5,84	5,62	7,61	NO	0,26	2,21	4379	1,54	2837	1608	129	2966
76	112	5,92	5,69	7,61	NO	0,26	2,18	4438	1,58	2816	1609	129	2944
75	113	6,00	5,77	7,62	NO	0,26	2,16	4499	1,61	2795	1609	129	2923
74	115	6,08	5,86	7,62	NO	0,25	2,13	4562	1,64	2774	1610	129	2903
73	116	6,17	5,94	7,62	NO	0,25	2,10	4627	1,68	2754	1611	129	2883
72	118	6,26	6,03	7,63	NO	0,25	2,07	4693	1,72	2734	1612	129	2863
71	120	6,35	6,12	7,63	NO	0,24	2,04	4761	1,75	2715	1612	129	2844
70	122	6,44	6,21	7,63	NO	0,24	2,02	4832	1,79	2697	1613	129	2826
69	123	6,54	6,30	7,64	NO	0,24	1,99	4904	1,83	2679	1614	129	2808
68	125	6,64	6,40	7,64	NO	0,23	1,96	4979	1,87	2661	1615	129	2790
67	127	6,74	6,50	7,64	NO	0,23	1,93	5056	1,91	2644	1616	129	2773
66	129	6,85	6,61	7,65	NO	0,23	1,91	5135	1,96	2627	1617	129	2756
65	131	6,96	6,71	7,65	NO	0,22	1,88	5217	2,00	2610	1617	129	2740
64	133	7,07	6,82	7,66	NO	0,22	1,85	5302	2,04	2595	1618	129	2724
63	136	7,19	6,94	7,66	NO	0,22	1,82	5390	2,09	2579	1619	130	2709
62	138	7,31	7,06	7,67	NO	0,21	1,79	5480	2,14	2564	1620	130	2694
61	140	7,43	7,18	7,67	NO	0,21	1,77	5573	2,19	2549	1621	130	2679
60	143	7,56	7,30	7,67	NO	0,21	1,74	5670	2,24	2535	1623	130	2665
59	145	7,69	7,44	7,68	NO	0,20	1,71	5770	2,29	2521	1624	130	2651
58	148	7,83	7,57	7,68	NO	0,20	1,68	5874	2,34	2507	1625	130	2637
57	150	7,98	7,71	7,69	SI	0,20	1,66	5981	2,40	2494	1626	130	2624
56	153	8,12	7,86	7,69	SI	0,19	1,63	6093	2,46	2481	1627	130	2612
55	156	8,28	8,01	7,70	SI	0,19	1,60	6209	2,51	2469	1629	130	2599
54	159	8,44	8,17	7,71	SI	0,19	1,57	6329	2,58	2457	1630	130	2587
53	162	8,60	8,33	7,71	SI	0,18	1,54	6454	2,64	2445	1631	131	2576
52	166	8,78	8,50	7,72	SI	0,18	1,52	6584	2,71	2434	1633	131	2564

DOD [%]	PESO BATERÍAS [kg]	ENERGÍA NOMINAL [kWh]	ENERGÍA DISPONIBLE [kWh]	ENERGÍA PERCENTIL 90 [kWh/día]	VIABLE	C-rate DESCARGA	C-rate MAX DESCARGA	COSTO BATERÍAS [\$]	TIEMPO DE VIDA BATERÍAS [años]	COSTO ANUAL DE BATERÍAS [\$/año]	ENERGÍA ANUAL CONSUMIDA [kWh/año]	COSTO ANUAL DE ENERGÍA [\$/año]	COSTO TOTAL ANUAL [\$/año]
51	169	8,96	8,68	7,73	SI	0,18	1,49	6719	2,77	2422	1634	131	2553
50	173	9,15	8,86	7,73	SI	0,17	1,46	6860	2,84	2412	1636	131	2542
49	176	9,34	9,05	7,74	SI	0,17	1,43	7007	2,92	2401	1638	131	2532
48	180	9,55	9,25	7,75	SI	0,16	1,41	7161	3,00	2391	1639	131	2522
47	184	9,76	9,46	7,75	SI	0,16	1,38	7321	3,07	2381	1641	131	2512
46	188	9,99	9,68	7,76	SI	0,16	1,35	7489	3,16	2371	1643	131	2503
45	193	10,22	9,91	7,77	SI	0,15	1,32	7664	3,25	2362	1645	132	2493
44	197	10,46	10,15	7,78	SI	0,15	1,30	7849	3,34	2353	1647	132	2484
43	202	10,72	10,40	7,79	SI	0,15	1,27	8042	3,43	2344	1649	132	2476
42	207	10,99	10,67	7,80	SI	0,14	1,24	8244	3,53	2335	1651	132	2467
41	213	11,28	10,95	7,81	SI	0,14	1,21	8458	3,63	2327	1654	132	2459
40	218	11,58	11,24	7,82	SI	0,14	1,18	8682	3,74	2319	1656	133	2451
39	224	11,89	11,55	7,83	SI	0,13	1,16	8919	3,86	2311	1659	133	2444
38	231	12,23	11,88	7,84	SI	0,13	1,13	9170	3,98	2304	1662	133	2437
37	237	12,58	12,22	7,86	SI	0,13	1,10	9434	4,11	2297	1665	133	2430
36	244	12,95	12,59	7,87	SI	0,12	1,07	9715	4,24	2290	1668	133	2424
35	252	13,35	12,98	7,89	SI	0,12	1,05	10012	4,38	2284	1671	134	2418
34	260	13,77	13,39	7,90	SI	0,12	1,02	10329	4,53	2278	1675	134	2412
33	268	14,22	13,83	7,92	SI	0,11	0,99	10666	4,69	2273	1679	134	2407
32	277	14,70	14,30	7,93	SI	0,11	0,96	11025	4,86	2268	1683	135	2403
31	287	15,21	14,80	7,95	SI	0,11	0,93	11410	5,04	2264	1687	135	2399
30	297	15,76	15,34	7,97	SI	0,10	0,91	11823	5,23	2261	1692	135	2396
29	309	16,36	15,92	7,99	SI	0,10	0,88	12267	5,43	2259	1697	136	2394
28	321	16,99	16,55	8,02	SI	0,10	0,85	12745	5,65	2257	1702	136	2394
27	334	17,68	17,22	8,04	SI	0,09	0,82	13262	5,87	2257	1708	137	2394
26	348	18,43	17,95	8,07	SI	0,09	0,80	13822	6,12	2259	1714	137	2396

DOD [%]	PESO BATERIAS [kg]	ENERGÍA NOMINAL [kWh]	ENERGÍA DISPONIBLE [kWh]	ENERGÍA PERCENTIL 90 [kWh/día]	VIABLE	C-rate DESCARGA	C-rate MAX DESCARGA	COSTO BATERIAS [\$]	TIEMPO DE VIDA BATERIAS [años]	COSTO ANUAL DE BATERIAS [\$/año]	ENERGÍA ANUAL CONSUMIDA [kWh/año]	COSTO ANUAL DE ENERGÍA [\$/año]	COSTO TOTAL ANUAL [\$/año]
25	363	19,24	18,75	8,10	SI	0,09	0,77	14432	6,38	2262	1721	138	2400
24	380	20,13	19,62	8,13	SI	0,08	0,74	15099	6,66	2267	1728	138	2405
23	398	21,11	20,58	8,16	SI	0,08	0,71	15829	6,96	2275	1736	139	2414
22	419	22,20	21,65	8,21	SI	0,08	0,68	16654	7,28	2288	1747	140	2427
21	Inf	Inf	Inf	Inf	SI	0,00	0,00	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf
20	Inf	Inf	Inf	Inf	SI	0,00	0,00	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf
19	Inf	Inf	Inf	Inf	SI	0,00	0,00	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf
18	Inf	Inf	Inf	Inf	SI	0,00	0,00	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf
17	Inf	Inf	Inf	Inf	SI	0,00	0,00	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf
16	Inf	Inf	Inf	Inf	SI	0,00	0,00	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf
15	Inf	Inf	Inf	Inf	SI	0,00	0,00	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf
14	Inf	Inf	Inf	Inf	SI	0,00	0,00	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf
13	Inf	Inf	Inf	Inf	SI	0,00	0,00	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf
12	Inf	Inf	Inf	Inf	SI	0,00	0,00	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf
11	Inf	Inf	Inf	Inf	SI	0,00	0,00	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf
10	Inf	Inf	Inf	Inf	SI	0,00	0,00	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf
9	Inf	Inf	Inf	Inf	SI	0,00	0,00	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf
8	Inf	Inf	Inf	Inf	SI	0,00	0,00	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf
7	Inf	Inf	Inf	Inf	SI	0,00	0,00	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf
6	Inf	Inf	Inf	Inf	SI	0,00	0,00	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf
5	Inf	Inf	Inf	Inf	SI	0,00	0,00	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf
4	Inf	Inf	Inf	Inf	SI	0,00	0,00	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf
3	Inf	Inf	Inf	Inf	SI	0,00	0,00	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf
2	Inf	Inf	Inf	Inf	SI	0,00	0,00	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf
1	Inf	Inf	Inf	Inf	SI	0,00	0,00	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf

ANEXO 6. Tabla de resultados para la simulación con baterías de litio para un día de operación

DOD [%]	PESO BATERÍAS [kg]	ENERGÍA NOMINAL [kWh]	ENERGÍA DISPONIBLE [kWh]	ENERGÍA PERCENTIL 90 [kWh/día]	VIABLE	C-rate DESCARGA	C-rate MAX DESCARGA	COSTO BATERÍAS [\$]	TIEMPO DE VIDA BATERÍAS [años]	COSTO ANUAL DE BATERÍAS [\$ /año]	ENERGÍA ANUAL CONSUMIDA [kWh/año]	COSTO ANUAL DE ENERGÍA [\$ /año]	COSTO TOTAL ANUAL [\$ /año]
100	33	4,28	4,24	7,46	NO	0,35	2,88	7142	4,17	1713	1545	124	1837
99	33	4,32	4,28	7,46	NO	0,35	2,85	7215	4,32	1671	1545	124	1794
98	34	4,36	4,33	7,46	NO	0,35	2,83	7289	4,47	1629	1546	124	1753
97	34	4,41	4,37	7,46	NO	0,34	2,80	7365	4,63	1589	1546	124	1713
96	34	4,46	4,42	7,46	NO	0,34	2,77	7442	4,80	1550	1546	124	1674
95	35	4,50	4,47	7,46	NO	0,34	2,74	7521	4,97	1513	1546	124	1636
94	35	4,55	4,52	7,46	NO	0,33	2,71	7602	5,15	1476	1546	124	1600
93	35	4,60	4,57	7,47	NO	0,33	2,68	7684	5,34	1440	1546	124	1564
92	36	4,65	4,62	7,47	NO	0,33	2,66	7769	5,53	1406	1547	124	1529
91	36	4,70	4,67	7,47	NO	0,32	2,63	7855	5,73	1372	1547	124	1496
90	37	4,76	4,73	7,47	NO	0,32	2,60	7943	5,93	1339	1547	124	1463
89	37	4,81	4,78	7,47	NO	0,32	2,57	8033	6,14	1308	1547	124	1431
88	37	4,87	4,84	7,47	NO	0,31	2,54	8125	6,36	1277	1547	124	1401
87	38	4,92	4,90	7,47	NO	0,31	2,51	8221	6,59	1247	1548	124	1371
86	38	4,98	4,96	7,47	NO	0,30	2,48	8317	6,83	1218	1548	124	1342
85	39	5,04	5,02	7,47	NO	0,30	2,46	8416	7,07	1190	1548	124	1314
84	39	5,10	5,08	7,47	NO	0,30	2,43	8517	7,33	1162	1548	124	1286
83	40	5,16	5,15	7,47	NO	0,29	2,40	8621	7,59	1136	1548	124	1259
82	40	5,23	5,21	7,48	NO	0,29	2,37	8727	7,86	1110	1548	124	1234
81	41	5,29	5,28	7,48	NO	0,29	2,34	8836	8,15	1085	1549	124	1209
80	41	5,36	5,35	7,48	NO	0,28	2,31	8948	8,44	1060	1549	124	1184
79	42	5,43	5,42	7,48	NO	0,28	2,28	9062	8,74	1036	1549	124	1160

DOD [%]	PESO BATERÍAS [kg]	ENERGÍA NOMINAL [kWh]	ENERGÍA DISPONIBLE [kWh]	ENERGÍA PERCENTIL 90 [kWh/día]	VIABLE	C-rate DESCARGA	C-rate MAX DESCARGA	COSTO BATERÍAS [\$]	TIEMPO DE VIDA BATERÍAS [años]	COSTO ANUAL DE BATERÍAS [\$/año]	ENERGÍA ANUAL CONSUMIDA [kWh/año]	COSTO ANUAL DE ENERGÍA [\$/año]	COSTO TOTAL ANUAL [\$/año]
77	43	5,57	5,56	7,48	NO	0,27	2,23	9301	9,38	991	1550	124	1115
76	43	5,64	5,64	7,48	NO	0,27	2,20	9424	9,72	969	1550	124	1093
75	44	5,72	5,72	7,48	NO	0,27	2,17	9552	10,07	948	1550	124	1072
74	45	5,80	5,80	7,48	NO	0,26	2,14	9682	10,44	928	1550	124	1052
73	45	5,88	5,88	7,49	NO	0,26	2,11	9816	10,81	908	1551	124	1032
72	46	5,96	5,97	7,49	NO	0,26	2,09	9954	11,20	889	1551	124	1013
71	47	6,05	6,05	7,49	NO	0,25	2,06	10096	11,61	870	1551	124	994
70	47	6,13	6,14	7,49	NO	0,25	2,03	10242	12,03	852	1551	124	976
69	48	6,22	6,24	7,49	NO	0,24	2,00	10393	12,46	834	1552	124	958
68	49	6,32	6,33	7,49	NO	0,24	1,97	10548	12,92	817	1552	124	941
67	49	6,41	6,43	7,49	NO	0,24	1,94	10707	13,39	800	1552	124	924
66	50	6,51	6,53	7,49	NO	0,23	1,91	10872	13,87	784	1553	124	908
65	51	6,61	6,64	7,50	NO	0,23	1,89	11041	14,38	768	1553	124	892
64	52	6,72	6,74	7,50	NO	0,23	1,86	11216	14,91	752	1553	124	877
63	52	6,82	6,85	7,50	NO	0,22	1,83	11397	15,45	738	1554	124	862
62	53	6,94	6,97	7,50	NO	0,22	1,80	11583	16,02	723	1554	124	847
61	54	7,05	7,09	7,50	NO	0,22	1,77	11776	16,61	709	1554	124	833
60	55	7,17	7,21	7,50	NO	0,21	1,74	11975	17,23	695	1555	124	819
59	56	7,29	7,34	7,51	NO	0,21	1,71	12181	17,87	682	1555	124	806
58	57	7,42	7,47	7,51	NO	0,21	1,69	12394	18,54	669	1555	124	793
57	58	7,55	7,60	7,51	SI	0,20	1,66	12615	19,24	656	1556	124	780
56	59	7,69	7,75	7,51	SI	0,20	1,63	12844	19,96	643	1556	125	768
55	60	7,83	7,89	7,51	SI	0,19	1,60	13081	20,73	631	1557	125	756
54	61	7,98	8,04	7,52	SI	0,19	1,57	13328	21,52	619	1557	125	744
53	63	8,13	8,20	7,52	SI	0,19	1,54	13583	22,36	608	1558	125	732
52	64	8,29	8,36	7,52	SI	0,18	1,51	13849	23,23	596	1558	125	721

DOD [%]	PESO BATERÍAS [kg]	ENERGÍA NOMINAL [kWh]	ENERGÍA DISPONIBLE [kWh]	ENERGÍA PERCENTIL 90 [kWh/día]	VIABLE	C-rate DESCARGA	C-rate MAX DESCARGA	COSTO BATERÍAS [\$]	TIEMPO DE VIDA BATERÍAS [años]	COSTO ANUAL DE BATERÍAS [\$/año]	ENERGÍA ANUAL CONSUMIDA [kWh/año]	COSTO ANUAL DE ENERGÍA [\$/año]	COSTO TOTAL ANUAL [\$/año]
51	65	8,46	8,53	7,52	SI	0,18	1,49	14125	24,15	585	1559	125	710
50	66	8,63	8,71	7,53	SI	0,18	1,46	14413	25,12	574	1559	125	698
49	68	8,81	8,90	7,53	SI	0,17	1,43	14712	26,14	563	1560	125	688
48	69	9,00	9,09	7,53	SI	0,17	1,40	15025	27,22	552	1560	125	677
47	71	9,19	9,29	7,53	SI	0,17	1,37	15351	28,37	541	1561	125	666
46	72	9,40	9,50	7,54	SI	0,16	1,34	15691	29,58	530	1562	125	655
45	74	9,61	9,72	7,54	SI	0,16	1,32	16046	30,88	520	1562	125	645
44	76	9,83	9,95	7,54	SI	0,16	1,29	16419	32,26	509	1563	125	634
43	77	10,06	10,19	7,55	SI	0,15	1,26	16808	33,74	498	1564	125	623
42	79	10,31	10,44	7,55	SI	0,15	1,23	17217	35,33	487	1565	125	613
41	81	10,57	10,70	7,56	SI	0,15	1,20	17646	37,04	476	1565	125	602
40	83	10,84	10,98	7,56	SI	0,14	1,17	18097	38,89	465	1566	125	591
39	86	11,12	11,27	7,56	SI	0,14	1,14	18572	40,91	454	1567	125	579
38	88	11,42	11,58	7,57	SI	0,13	1,12	19072	43,10	442	1568	125	568
37	90	11,74	11,90	7,57	SI	0,13	1,09	19601	45,51	431	1569	126	556
36	93	12,07	12,25	7,58	SI	0,13	1,06	20159	48,15	419	1570	126	544
35	96	12,42	12,61	7,58	SI	0,12	1,03	20749	51,06	406	1571	126	532
34	98	12,80	13,00	7,59	SI	0,12	1,00	21376	54,29	394	1573	126	520
33	102	13,20	13,41	7,59	SI	0,12	0,97	22041	57,89	381	1574	126	507
32	105	13,62	13,84	7,60	SI	0,11	0,94	22750	61,91	367	1575	126	494
31	108	14,07	14,31	7,61	SI	0,11	0,92	23505	66,41	354	1577	126	480
30	112	14,56	14,80	7,61	SI	0,11	0,89	24312	71,48	340	1578	126	466
29	116	15,08	15,33	7,62	SI	0,10	0,86	25177	77,21	326	1580	126	452
28	120	15,63	15,91	7,63	SI	0,10	0,83	26105	83,71	312	1582	127	438
27	125	16,23	16,52	7,64	SI	0,10	0,80	27105	91,10	298	1584	127	424
26	130	16,88	17,18	7,65	SI	0,09	0,77	28184	99,53	283	1586	127	410

DOD [%]	PESO BATERIAS [kg]	ENERGÍA NOMINAL [kWh]	ENERGÍA DISPONIBLE [kWh]	ENERGÍA PERCENTIL 90 [kWh/día]	VIABLE	C-rate DESCARGA	C-rate MAX DESCARGA	COSTO BATERIAS [\$]	TIEMPO DE VIDA BATERIAS [años]	COSTO ANUAL DE BATERIAS [\$/año]	ENERGÍA ANUAL CONSUMIDA [kWh/año]	COSTO ANUAL DE ENERGÍA [\$/año]	COSTO TOTAL ANUAL [\$/año]
25	135	17,58	17,90	7,66	SI	0,09	0,74	29352	109,18	269	1588	127	396
24	141	18,34	18,68	7,67	SI	0,08	0,72	30622	120,25	255	1590	127	382
23	147	19,17	19,54	7,68	SI	0,08	0,69	32006	132,99	241	1593	127	368
22	154	20,07	20,47	7,70	SI	0,08	0,66	33521	147,69	227	1596	128	355
21	162	21,07	21,49	7,71	SI	0,07	0,63	35187	164,66	214	1599	128	342
20	171	22,17	22,62	7,73	SI	0,07	0,60	37028	184,32	201	1602	128	329
19	180	23,40	23,88	7,75	SI	0,07	0,57	39071	207,12	189	1606	129	317
18	190	24,76	25,29	7,77	SI	0,06	0,55	41353	233,61	177	1611	129	306
17	202	26,30	26,86	7,79	SI	0,06	0,52	43918	264,43	166	1615	129	295
16	216	28,04	28,65	7,82	SI	0,06	0,49	46822	300,33	156	1621	130	286
15	231	30,02	30,69	7,85	SI	0,05	0,46	50137	342,20	147	1627	130	277
14	249	32,31	33,04	7,88	SI	0,05	0,43	53957	391,09	138	1634	131	269
13	269	34,97	35,78	7,92	SI	0,05	0,40	58406	448,22	130	1643	131	262
12	293	38,12	39,01	7,96	SI	0,04	0,37	63655	515,04	124	1653	132	256
11	322	41,88	42,87	8,02	SI	0,04	0,35	69940	593,25	118	1665	133	251
10	357	46,47	47,58	8,09	SI	0,04	0,32	77599	684,86	113	1679	134	248
9	401	52,18	53,45	8,17	SI	0,03	0,29	87140	792,22	110	1697	136	246
8	Inf	Inf	Inf	Inf	SI	0,00	0,00	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf
7	Inf	Inf	Inf	Inf	SI	0,00	0,00	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf
6	Inf	Inf	Inf	Inf	SI	0,00	0,00	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf
5	Inf	Inf	Inf	Inf	SI	0,00	0,00	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf
4	Inf	Inf	Inf	Inf	SI	0,00	0,00	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf
3	Inf	Inf	Inf	Inf	SI	0,00	0,00	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf
2	Inf	Inf	Inf	Inf	SI	0,00	0,00	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf
1	Inf	Inf	Inf	Inf	SI	0,00	0,00	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf

ANEXO 7. Tabla de resultados para la simulación con baterías de plomo para un viaje de operación

DOD [%]	PESO BATERÍAS [kg]	ENERGÍA NOMINAL [kWh]	ENERGÍA DISPONIBLE [kWh]	ENERGÍA PERCENTIL 90 [kWh/viaje]	VIABLE	C-rate DESCARGA	C-rate CARGA	COSTO BATERÍAS [\$]	TIEMPO DE VIDA BATERÍAS [años]	COSTO ANUAL DE BATERÍAS [\$/año]	ENERGÍA ANUAL CONSUMIDA [kWh/año]	COSTO ANUAL DE ENERGÍA [\$/año]	COSTO TOTAL ANUAL [\$año]
100	4,3	0,19	0,035	0,371	NO	7,7	2,4	54	0,050	1076	1515	121,18	1197
99	4,3	0,20	0,035	0,371	NO	7,6	2,3	55	0,051	1064	1515	121,18	1185
98	4,4	0,20	0,036	0,371	NO	7,6	2,3	55	0,053	1053	1515	121,18	1174
97	4,4	0,20	0,037	0,371	NO	7,5	2,3	56	0,054	1041	1515	121,18	1162
96	4,5	0,20	0,038	0,371	NO	7,4	2,3	57	0,055	1030	1515	121,18	1151
95	4,5	0,20	0,039	0,371	NO	7,3	2,2	57	0,056	1019	1515	121,19	1140
94	4,6	0,21	0,040	0,371	NO	7,3	2,2	58	0,057	1008	1515	121,19	1129
93	4,6	0,21	0,041	0,371	NO	7,2	2,2	58	0,059	997	1515	121,19	1118
92	4,7	0,21	0,041	0,371	NO	7,1	2,2	59	0,060	987	1515	121,19	1108
91	4,7	0,21	0,042	0,371	NO	7,0	2,1	60	0,061	976	1515	121,19	1098
90	4,8	0,22	0,043	0,371	NO	6,9	2,1	60	0,062	966	1515	121,20	1087
89	4,8	0,22	0,045	0,371	NO	6,9	2,1	61	0,064	956	1515	121,20	1078
88	4,9	0,22	0,046	0,371	NO	6,8	2,1	62	0,065	947	1515	121,20	1068
87	4,9	0,22	0,047	0,371	NO	6,7	2,0	62	0,067	937	1515	121,20	1058
86	5,0	0,23	0,048	0,371	NO	6,6	2,0	63	0,068	928	1515	121,21	1049
85	5,1	0,23	0,049	0,371	NO	6,6	2,0	64	0,070	918	1515	121,21	1040
84	5,1	0,23	0,050	0,371	NO	6,5	2,0	65	0,071	909	1515	121,21	1030
83	5,2	0,23	0,051	0,371	NO	6,4	2,0	65	0,073	900	1515	121,21	1022
82	5,3	0,24	0,053	0,371	NO	6,3	1,9	66	0,074	892	1515	121,22	1013
81	5,3	0,24	0,054	0,371	NO	6,3	1,9	67	0,076	883	1515	121,22	1004
80	5,4	0,24	0,055	0,371	NO	6,2	1,9	68	0,078	875	1515	121,22	996
79	5,5	0,25	0,057	0,371	NO	6,1	1,9	69	0,079	866	1515	121,23	987

DOD [%]	PESO BATERÍAS [kg]	ENERGÍA NOMINAL [kWh]	ENERGÍA DISPONIBLE [kWh]	ENERGÍA PERCENTIL 90 [kWh/viaje]	VIABLE	C-rate DESCARGA	C-rate CARGA	COSTO BATERÍAS [€]	TIEMPO DE VIDA BATERÍAS [años]	COSTO ANUAL DE BATERÍAS [€/año]	ENERGÍA ANUAL CONSUMIDA [kWh/año]	COSTO ANUAL DE ENERGÍA [€/año]	COSTO TOTAL ANUAL [€/año]
78	5,5	0,25	0,058	0,371	NO	6,0	1,8	70	0,081	858	1515	121,23	979
77	5,6	0,25	0,060	0,371	NO	5,9	1,8	70	0,083	850	1515	121,23	971
76	5,7	0,26	0,061	0,371	NO	5,9	1,8	71	0,085	842	1515	121,24	963
75	5,7	0,26	0,063	0,371	NO	5,8	1,8	72	0,087	834	1515	121,24	956
74	5,8	0,26	0,065	0,371	NO	5,7	1,7	73	0,089	827	1516	121,24	948
73	5,9	0,27	0,066	0,372	NO	5,6	1,7	74	0,091	819	1516	121,25	941
72	6,0	0,27	0,068	0,372	NO	5,6	1,7	75	0,093	812	1516	121,25	933
71	6,1	0,27	0,070	0,372	NO	5,5	1,7	76	0,095	805	1516	121,25	926
70	6,2	0,28	0,072	0,372	NO	5,4	1,6	78	0,097	798	1516	121,26	919
69	6,2	0,28	0,074	0,372	NO	5,3	1,6	79	0,100	791	1516	121,26	912
68	6,3	0,29	0,076	0,372	NO	5,2	1,6	80	0,102	784	1516	121,27	905
67	6,4	0,29	0,078	0,372	NO	5,2	1,6	81	0,104	777	1516	121,27	898
66	6,5	0,29	0,080	0,372	NO	5,1	1,6	82	0,107	770	1516	121,27	891
65	6,6	0,30	0,082	0,372	NO	5,0	1,5	84	0,109	764	1516	121,28	885
64	6,7	0,30	0,085	0,372	NO	4,9	1,5	85	0,112	757	1516	121,28	878
63	6,8	0,31	0,087	0,372	NO	4,9	1,5	86	0,115	751	1516	121,29	872
62	7,0	0,31	0,090	0,372	NO	4,8	1,5	88	0,118	744	1516	121,29	866
61	7,1	0,32	0,092	0,372	NO	4,7	1,4	89	0,121	738	1516	121,30	860
60	7,2	0,32	0,095	0,372	NO	4,6	1,4	91	0,124	732	1516	121,30	853
59	7,3	0,33	0,098	0,372	NO	4,6	1,4	92	0,127	726	1516	121,31	847
58	7,4	0,33	0,101	0,372	NO	4,5	1,4	94	0,130	720	1516	121,31	841
57	7,6	0,34	0,104	0,372	NO	4,4	1,3	95	0,133	714	1517	121,32	836
56	7,7	0,35	0,107	0,372	NO	4,3	1,3	97	0,137	708	1517	121,33	830
55	7,8	0,35	0,110	0,372	NO	4,2	1,3	99	0,141	703	1517	121,33	824
54	8,0	0,36	0,114	0,372	NO	4,2	1,3	101	0,144	697	1517	121,34	818
53	8,1	0,37	0,118	0,372	NO	4,1	1,2	102	0,148	691	1517	121,35	813

DOD [%]	PESO BATERÍAS [kg]	ENERGÍA NOMINAL [kWh]	ENERGÍA DISPONIBLE [kWh]	ENERGÍA PERCENTIL 90 [kWh/viaje]	VIABLE	C-rate DESCARGA	C-rate CARGA	COSTO BATERÍAS [€]	TIEMPO DE VIDA BATERÍAS [años]	COSTO ANUAL DE BATERÍAS [€/año]	ENERGÍA ANUAL CONSUMIDA [kWh/año]	COSTO ANUAL DE ENERGÍA [€/año]	COSTO TOTAL ANUAL [€/año]
52	8,3	0,37	0,121	0,372	NO	4,0	1,2	104	0,152	686	1517	121,35	807
51	8,5	0,38	0,125	0,372	NO	3,9	1,2	107	0,157	680	1517	121,36	802
50	8,6	0,39	0,129	0,372	NO	3,9	1,2	109	0,161	675	1517	121,37	796
49	8,8	0,40	0,134	0,372	NO	3,8	1,2	111	0,166	669	1517	121,37	791
48	9,0	0,40	0,138	0,372	NO	3,7	1,1	113	0,170	664	1517	121,38	786
47	9,2	0,41	0,143	0,372	NO	3,6	1,1	116	0,175	659	1517	121,39	780
46	9,4	0,42	0,148	0,372	NO	3,5	1,1	118	0,181	654	1518	121,40	775
45	9,6	0,43	0,153	0,372	NO	3,5	1,1	121	0,186	648	1518	121,41	770
44	9,8	0,44	0,159	0,372	NO	3,4	1,0	124	0,192	643	1518	121,42	765
43	10,0	0,45	0,164	0,372	NO	3,3	1,0	126	0,198	638	1518	121,43	760
42	10,3	0,46	0,170	0,372	NO	3,2	1,0	129	0,204	633	1518	121,44	755
41	10,5	0,47	0,177	0,372	NO	3,2	1,0	133	0,211	628	1518	121,45	750
40	10,8	0,49	0,184	0,372	NO	3,1	0,9	136	0,218	623	1518	121,46	745
39	11,1	0,50	0,191	0,372	NO	3,0	0,9	139	0,225	619	1518	121,48	740
38	11,4	0,51	0,198	0,372	NO	2,9	0,9	143	0,233	614	1519	121,49	735
37	11,7	0,53	0,206	0,372	NO	2,9	0,9	147	0,241	609	1519	121,50	731
36	12,0	0,54	0,214	0,372	NO	2,8	0,8	151	0,250	605	1519	121,52	726
35	12,3	0,56	0,223	0,372	NO	2,7	0,8	155	0,259	600	1519	121,53	722
34	12,7	0,57	0,233	0,372	NO	2,6	0,8	160	0,269	596	1519	121,55	717
33	13,1	0,59	0,243	0,372	NO	2,5	0,8	165	0,279	592	1520	121,56	713
32	13,5	0,61	0,254	0,372	NO	2,5	0,8	170	0,290	588	1520	121,58	709
31	13,9	0,63	0,265	0,372	NO	2,4	0,7	176	0,301	584	1520	121,60	705
30	14,4	0,65	0,278	0,372	NO	2,3	0,7	181	0,313	580	1520	121,62	702
29	14,9	0,67	0,291	0,372	NO	2,2	0,7	188	0,326	576	1521	121,64	698
28	15,4	0,69	0,305	0,372	NO	2,2	0,7	195	0,339	573	1521	121,67	695
27	16,0	0,72	0,321	0,372	NO	2,1	0,6	202	0,354	570	1521	121,69	692

DOD [%]	PESO BATERÍAS [kg]	ENERGÍA NOMINAL [kWh]	ENERGÍA DISPONIBLE [kWh]	ENERGÍA PERCENTIL 90 [kWh/viaje]	VIABLE	C-rate DESCARGA	C-rate CARGA	COSTO BATERÍAS [\$]	TIEMPO DE VIDA BATERÍAS [años]	COSTO ANUAL DE BATERÍAS [\$/año]	ENERGÍA ANUAL CONSUMIDA [kWh/año]	COSTO ANUAL DE ENERGÍA [\$/año]	COSTO TOTAL ANUAL [\$/año]
26	16,6	0,75	0,337	0,373	NO	2,0	0,6	210	0,369	568	1522	121,72	689
25	17,3	0,78	0,355	0,373	NO	1,9	0,6	218	0,385	566	1522	121,75	687
24	18,0	0,81	0,375	0,373	SI	1,9	0,6	227	0,403	564	1522	121,78	686
23	18,8	0,85	0,396	0,373	SI	1,8	0,5	237	0,421	563	1523	121,82	684
22	19,7	0,89	0,420	0,373	SI	1,7	0,5	248	0,441	562	1523	121,86	684
21	20,6	0,93	0,446	0,373	SI	1,6	0,5	260	0,462	562	1524	121,90	684
20	21,7	0,97	0,474	0,373	SI	1,5	0,5	273	0,485	563	1524	121,94	685
19	22,8	1,03	0,506	0,373	SI	1,5	0,4	287	0,509	565	1525	121,99	687
18	24,1	1,08	0,541	0,373	SI	1,4	0,4	304	0,535	567	1526	122,05	690
17	25,5	1,15	0,581	0,373	SI	1,3	0,4	322	0,563	572	1526	122,11	694
16	27,1	1,22	0,627	0,374	SI	1,2	0,4	342	0,592	577	1527	122,18	700
15	29,0	1,30	0,679	0,374	SI	1,2	0,4	365	0,624	585	1528	122,28	707
14	31,1	1,40	0,739	0,374	SI	1,1	0,3	391	0,658	595	1530	122,37	717
13	33,5	1,51	0,809	0,374	SI	1,0	0,3	422	0,694	608	1531	122,48	730
12	36,3	1,63	0,893	0,374	SI	0,9	0,3	457	0,733	624	1533	122,61	746
11	39,6	1,78	0,995	0,375	SI	0,8	0,3	500	0,775	644	1534	122,76	767
10	43,7	1,97	1,120	0,375	SI	0,8	0,2	550	0,820	671	1537	122,94	794
9	48,6	2,19	1,278	0,376	SI	0,7	0,2	613	0,869	705	1539	123,16	828
8	54,8	2,47	1,485	0,376	SI	0,6	0,2	691	0,921	750	1543	123,44	873
7	62,8	2,83	1,763	0,377	SI	0,5	0,2	792	0,977	810	1547	123,80	934
6	73,6	3,31	2,157	0,378	SI	0,5	0,1	927	1,037	894	1554	124,28	1018
5	88,8	4,00	2,746	0,380	SI	0,4	0,1	1119	1,102	1015	1562	124,97	1140
4	111,9	5,04	3,699	0,382	SI	0,3	0,1	1410	1,172	1203	1575	126,02	1329
3	151,4	6,81	5,431	0,386	SI	0,2	0,1	1907	1,247	1529	1598	127,82	1657
2	233,8	10,52	9,283	0,394	SI	0,2	0,0	2946	1,329	2217	1645	131,60	2349
1	516,0	23,22	23,187	0,421	SI	0,1	0,0	6502	1,416	4592	1815	145,24	4737

ANEXO 8. Tabla de resultados para la simulación con baterías de Ni-MH para un viaje de operación

DOD [%]	PESO BATERÍAS [kg]	ENERGÍA NOMINAL [kWh]	ENERGÍA DISPONIBLE [kWh]	ENERGÍA PERCENTIL 90 [kWh/viaje]	VIABLE	C-rate DESCARGA	C-rate CARGA	COSTO BATERÍAS [\$]	TIEMPO DE VIDA BATERÍAS [años]	COSTO ANUAL DE BATERÍAS [\$/año]	ENERGÍA ANUAL CONSUMIDA [kWh/año]	COSTO ANUAL DE ENERGÍA [\$/año]	COSTO TOTAL ANUAL [\$/año]
100	4,1	0,22	-0,033	0,371	NO	6,9	2,3	163	0,046	3568	1633	130,62	3699
99	4,1	0,22	-0,030	0,371	NO	6,8	2,2	165	0,047	3531	1633	130,62	3662
98	4,2	0,22	-0,026	0,371	NO	6,7	2,2	166	0,048	3495	1633	130,63	3626
97	4,2	0,22	-0,022	0,371	NO	6,7	2,2	168	0,049	3460	1633	130,63	3590
96	4,3	0,23	-0,019	0,371	NO	6,6	2,2	170	0,050	3425	1633	130,63	3556
95	4,3	0,23	-0,015	0,371	NO	6,5	2,1	172	0,051	3391	1633	130,63	3522
94	4,4	0,23	-0,011	0,371	NO	6,5	2,1	173	0,052	3358	1633	130,64	3488
93	4,4	0,23	-0,007	0,371	NO	6,4	2,1	175	0,053	3325	1633	130,64	3455
92	4,5	0,24	-0,003	0,371	NO	6,3	2,1	177	0,054	3293	1633	130,64	3423
91	4,5	0,24	0,001	0,371	NO	6,3	2,1	179	0,055	3261	1633	130,64	3392
90	4,6	0,24	0,005	0,371	NO	6,2	2,0	181	0,056	3230	1633	130,65	3361
89	4,6	0,24	0,010	0,371	NO	6,1	2,0	183	0,057	3200	1633	130,65	3331
88	4,7	0,25	0,014	0,371	NO	6,1	2,0	185	0,058	3171	1633	130,65	3301
87	4,7	0,25	0,018	0,371	NO	6,0	2,0	187	0,060	3142	1633	130,65	3272
86	4,8	0,25	0,022	0,371	NO	5,9	1,9	190	0,061	3113	1633	130,66	3244
85	4,8	0,26	0,027	0,371	NO	5,8	1,9	192	0,062	3085	1633	130,66	3216
84	4,9	0,26	0,031	0,371	NO	5,8	1,9	194	0,063	3058	1633	130,66	3189
83	4,9	0,26	0,036	0,371	NO	5,7	1,9	196	0,065	3031	1633	130,67	3162
82	5,0	0,27	0,041	0,371	NO	5,6	1,9	199	0,066	3005	1633	130,67	3136
81	5,1	0,27	0,045	0,371	NO	5,6	1,8	201	0,068	2979	1633	130,67	3110
80	5,1	0,27	0,050	0,371	NO	5,5	1,8	204	0,069	2954	1633	130,68	3085
79	5,2	0,28	0,055	0,371	NO	5,4	1,8	206	0,070	2930	1634	130,68	3060

DOD [%]	PESO BATERÍAS [kg]	ENERGÍA NOMINAL [kWh]	ENERGÍA DISPONIBLE [kWh]	ENERGÍA PERCENTIL 90 [kWh/viaje]	VIABLE	C-rate DESCARGA	C-rate CARGA	COSTO BATERÍAS [\$]	TIEMPO DE VIDA BATERÍAS [años]	COSTO ANUAL DE BATERÍAS [\$/año]	ENERGÍA ANUAL CONSUMIDA [kWh/año]	COSTO ANUAL DE ENERGÍA [\$/año]	COSTO TOTAL ANUAL [\$/año]
77	5,3	0,28	0,065	0,371	NO	5,3	1,7	212	0,073	2882	1634	130,69	3013
76	5,4	0,29	0,070	0,371	NO	5,2	1,7	215	0,075	2859	1634	130,69	2990
75	5,5	0,29	0,075	0,371	NO	5,2	1,7	217	0,077	2837	1634	130,70	2967
74	5,5	0,29	0,081	0,371	NO	5,1	1,7	220	0,078	2815	1634	130,70	2945
73	5,6	0,30	0,086	0,371	NO	5,0	1,7	223	0,080	2793	1634	130,70	2924
72	5,7	0,30	0,092	0,371	NO	5,0	1,6	227	0,082	2772	1634	130,71	2903
71	5,8	0,31	0,098	0,371	NO	4,9	1,6	230	0,084	2752	1634	130,71	2882
70	5,9	0,31	0,103	0,372	NO	4,8	1,6	233	0,085	2732	1634	130,72	2862
69	5,9	0,32	0,109	0,372	NO	4,7	1,6	236	0,087	2712	1634	130,72	2843
68	6,0	0,32	0,115	0,372	NO	4,7	1,5	240	0,089	2693	1634	130,73	2823
67	6,1	0,32	0,122	0,372	NO	4,6	1,5	244	0,091	2674	1634	130,73	2805
66	6,2	0,33	0,128	0,372	NO	4,5	1,5	247	0,093	2656	1634	130,74	2786
65	6,3	0,33	0,134	0,372	NO	4,5	1,5	251	0,095	2638	1634	130,74	2768
64	6,4	0,34	0,141	0,372	NO	4,4	1,4	255	0,097	2620	1634	130,75	2751
63	6,5	0,35	0,148	0,372	NO	4,3	1,4	259	0,100	2603	1634	130,75	2734
62	6,6	0,35	0,155	0,372	NO	4,3	1,4	263	0,102	2586	1635	130,76	2717
61	6,7	0,36	0,162	0,372	NO	4,2	1,4	268	0,104	2570	1635	130,77	2701
60	6,8	0,36	0,169	0,372	NO	4,1	1,4	272	0,107	2554	1635	130,77	2685
59	7,0	0,37	0,177	0,372	NO	4,1	1,3	277	0,109	2538	1635	130,78	2669
58	7,1	0,38	0,185	0,372	NO	4,0	1,3	281	0,112	2523	1635	130,79	2654
57	7,2	0,38	0,193	0,372	NO	3,9	1,3	286	0,114	2508	1635	130,79	2639
56	7,3	0,39	0,201	0,372	NO	3,9	1,3	292	0,117	2493	1635	130,80	2624
55	7,5	0,40	0,209	0,372	NO	3,8	1,2	297	0,120	2479	1635	130,81	2610
54	7,6	0,40	0,218	0,372	NO	3,7	1,2	302	0,123	2465	1635	130,81	2596
53	7,7	0,41	0,227	0,372	NO	3,6	1,2	308	0,126	2451	1635	130,82	2582
52	7,9	0,42	0,236	0,372	NO	3,6	1,2	314	0,129	2437	1635	130,83	2568

DOD [%]	PESO BATERÍAS [kg]	ENERGÍA NOMINAL [kWh]	ENERGÍA DISPONIBLE [kWh]	ENERGÍA PERCENTIL 90 [kWh/viaje]	VIABLE	C-rate DESCARGA	C-rate CARGA	COSTO BATERÍAS [\$]	TIEMPO DE VIDA BATERÍAS [años]	COSTO ANUAL DE BATERÍAS [\$/año]	ENERGÍA ANUAL CONSUMIDA [kWh/año]	COSTO ANUAL DE ENERGÍA [\$/año]	COSTO TOTAL ANUAL [\$/año]
51	8,1	0,43	0,246	0,372	NO	3,5	1,2	320	0,132	2424	1635	130,84	2555
50	8,2	0,44	0,256	0,372	NO	3,4	1,1	327	0,135	2411	1636	130,85	2542
49	8,4	0,44	0,266	0,372	NO	3,4	1,1	333	0,139	2398	1636	130,86	2529
48	8,6	0,45	0,277	0,372	NO	3,3	1,1	340	0,143	2386	1636	130,87	2517
47	8,7	0,46	0,288	0,372	NO	3,2	1,1	348	0,146	2373	1636	130,88	2504
46	8,9	0,47	0,299	0,372	NO	3,2	1,0	355	0,150	2361	1636	130,89	2492
45	9,1	0,48	0,311	0,372	NO	3,1	1,0	363	0,155	2349	1636	130,90	2480
44	9,3	0,50	0,323	0,372	NO	3,0	1,0	371	0,159	2337	1636	130,91	2468
43	9,6	0,51	0,336	0,372	NO	3,0	1,0	380	0,163	2326	1637	130,92	2457
42	9,8	0,52	0,349	0,372	NO	2,9	0,9	389	0,168	2314	1637	130,93	2445
41	10,0	0,53	0,363	0,372	NO	2,8	0,9	399	0,173	2303	1637	130,95	2434
40	10,3	0,54	0,378	0,372	SI	2,7	0,9	409	0,178	2292	1637	130,96	2423
39	10,5	0,56	0,393	0,372	SI	2,7	0,9	419	0,184	2281	1637	130,98	2412
38	10,8	0,57	0,409	0,372	SI	2,6	0,9	430	0,190	2270	1637	130,99	2401
37	11,1	0,59	0,426	0,372	SI	2,5	0,8	442	0,196	2259	1638	131,01	2390
36	11,4	0,61	0,444	0,372	SI	2,5	0,8	454	0,202	2249	1638	131,02	2380
35	11,8	0,62	0,462	0,372	SI	2,4	0,8	467	0,209	2238	1638	131,04	2369
34	12,1	0,64	0,482	0,372	SI	2,3	0,8	481	0,216	2228	1638	131,06	2359
33	12,5	0,66	0,502	0,372	SI	2,3	0,7	496	0,223	2219	1639	131,08	2350
32	12,9	0,68	0,524	0,372	SI	2,2	0,7	511	0,231	2209	1639	131,10	2340
31	13,3	0,70	0,547	0,372	SI	2,1	0,7	528	0,240	2200	1639	131,13	2331
30	13,7	0,73	0,572	0,372	SI	2,1	0,7	546	0,249	2191	1639	131,15	2322
29	14,2	0,75	0,598	0,372	SI	2,0	0,7	565	0,259	2183	1640	131,18	2314
28	14,7	0,78	0,626	0,372	SI	1,9	0,6	585	0,269	2175	1640	131,20	2307
27	15,3	0,81	0,656	0,372	SI	1,9	0,6	607	0,280	2168	1640	131,23	2300
26	15,9	0,84	0,688	0,372	SI	1,8	0,6	630	0,291	2162	1641	131,27	2294

DOD [%]	PESO BATERÍAS [kg]	ENERGÍA NOMINAL [kWh]	ENERGÍA DISPONIBLE [kWh]	ENERGÍA PERCENTIL 90 [kWh/viaje]	VIABLE	C-rate DESCARGA	C-rate CARGA	COSTO BATERÍAS [\$]	TIEMPO DE VIDA BATERÍAS [años]	COSTO ANUAL DE BATERÍAS [\$/año]	ENERGÍA ANUAL CONSUMIDA [kWh/año]	COSTO ANUAL DE ENERGÍA [\$/año]	COSTO TOTAL ANUAL [\$/año]
25	16,5	0,87	0,723	0,373	SI	1,7	0,6	655	0,304	2157	1641	131,30	2289
24	17,2	0,91	0,761	0,373	SI	1,6	0,5	683	0,317	2154	1642	131,34	2285
23	17,9	0,95	0,801	0,373	SI	1,6	0,5	713	0,331	2151	1642	131,38	2283
22	18,8	0,99	0,845	0,373	SI	1,5	0,5	746	0,347	2151	1643	131,43	2282
21	19,7	1,04	0,894	0,373	SI	1,4	0,5	781	0,363	2152	1643	131,48	2284
20	20,6	1,09	0,947	0,373	SI	1,4	0,5	821	0,381	2156	1644	131,53	2288
19	21,7	1,15	1,005	0,373	SI	1,3	0,4	864	0,400	2163	1645	131,59	2295
18	23,0	1,22	1,070	0,373	SI	1,2	0,4	913	0,420	2174	1646	131,66	2305
17	24,3	1,29	1,142	0,373	SI	1,2	0,4	967	0,442	2189	1647	131,74	2321
16	25,9	1,37	1,224	0,373	SI	1,1	0,4	1028	0,466	2209	1648	131,83	2341
15	27,6	1,46	1,316	0,374	SI	1,0	0,3	1098	0,491	2235	1649	131,93	2367
14	29,6	1,57	1,421	0,374	SI	1,0	0,3	1177	0,519	2270	1650	132,04	2402
13	31,9	1,69	1,542	0,374	SI	0,9	0,3	1269	0,548	2314	1652	132,17	2446
12	34,6	1,83	1,684	0,374	SI	0,8	0,3	1376	0,581	2370	1654	132,32	2503
11	37,8	2,00	1,852	0,375	SI	0,8	0,2	1503	0,615	2443	1656	132,50	2575
10	41,7	2,21	2,053	0,375	SI	0,7	0,2	1656	0,653	2536	1659	132,71	2669
9	46,4	2,46	2,300	0,375	SI	0,6	0,2	1844	0,694	2657	1662	132,98	2790
8	52,3	2,77	2,609	0,376	SI	0,5	0,2	2080	0,738	2817	1666	133,31	2950
7	60,0	3,18	3,008	0,377	SI	0,5	0,2	2385	0,786	3033	1672	133,74	3166
6	70,3	3,73	3,545	0,378	SI	0,4	0,1	2794	0,838	3332	1679	134,32	3467
5	84,9	4,50	4,303	0,379	SI	0,3	0,1	3373	0,895	3769	1689	135,14	3904
4	107,1	5,67	5,457	0,381	SI	0,3	0,1	4256	0,957	4449	1705	136,40	4585
3	145,0	7,69	7,429	0,385	SI	0,2	0,1	5765	1,023	5633	1732	138,57	5771
2	224,8	11,91	11,570	0,393	SI	0,1	0,0	8934	1,096	8150	1790	143,17	8293
1	503,2	26,67	26,026	0,420	SI	0,1	0,0	20002	1,175	17019	2003	160,26	17179

ANEXO 9. Tabla de resultados para la simulación con baterías de litio para un viaje de operación

DOD [%]	PESO BATERÍAS [kg]	ENERGÍA NOMINAL [kWh]	ENERGÍA DISPONIBLE [kWh]	ENERGÍA PERCENTIL 90 [kWh/viaje]	VIABLE	C-rate MEDIO DESCARGA	C-rate MAX DESCARGA	C-rate CARGA	COSTO BATERÍAS [\$]	TIEMPO DE VIDA BATERÍAS [años]	COSTO ANUAL DE BATERÍAS [\$/año]	ENERGÍA ANUAL CONSUMIDA [kWh/año]	COSTO ANUAL DE ENERGÍA [\$/año]	COSTO TOTAL ANUAL [\$/año]
100	1,4	0,18	-0,120	0,371	NO	8,2	66,64	2,3	303	0,199	1527	1378	110,21	1637
99	1,4	0,18	-0,116	0,371	NO	8,1	65,98	2,3	306	0,206	1489	1378	110,21	1599
98	1,4	0,19	-0,113	0,371	NO	8,1	65,31	2,2	309	0,213	1452	1378	110,21	1562
97	1,4	0,19	-0,109	0,371	NO	8,0	64,64	2,2	313	0,221	1416	1378	110,21	1527
96	1,5	0,19	-0,106	0,371	NO	7,9	63,98	2,2	316	0,229	1382	1378	110,21	1492
95	1,5	0,19	-0,102	0,371	NO	7,8	63,31	2,2	319	0,237	1348	1378	110,21	1458
94	1,5	0,19	-0,099	0,371	NO	7,7	62,65	2,1	323	0,245	1315	1378	110,21	1425
93	1,5	0,20	-0,095	0,371	NO	7,7	61,98	2,1	326	0,254	1283	1378	110,21	1393
92	1,5	0,20	-0,091	0,371	NO	7,6	61,31	2,1	330	0,263	1252	1378	110,21	1362
91	1,5	0,20	-0,087	0,371	NO	7,5	60,65	2,1	333	0,273	1222	1378	110,21	1332
90	1,6	0,20	-0,084	0,371	NO	7,4	59,98	2,1	337	0,282	1193	1378	110,21	1303
89	1,6	0,20	-0,080	0,371	NO	7,3	59,32	2,0	341	0,293	1164	1378	110,21	1275
88	1,6	0,21	-0,076	0,371	NO	7,2	58,65	2,0	345	0,303	1137	1378	110,21	1247
87	1,6	0,21	-0,072	0,371	NO	7,2	57,98	2,0	348	0,314	1110	1378	110,21	1220
86	1,6	0,21	-0,068	0,371	NO	7,1	57,32	2,0	353	0,325	1084	1378	110,21	1194
85	1,6	0,21	-0,064	0,371	NO	7,0	56,65	1,9	357	0,337	1059	1378	110,22	1169
84	1,7	0,22	-0,059	0,371	NO	6,9	55,99	1,9	361	0,349	1034	1378	110,22	1145
83	1,7	0,22	-0,055	0,371	NO	6,8	55,32	1,9	365	0,362	1011	1378	110,22	1121
82	1,7	0,22	-0,051	0,371	NO	6,7	54,65	1,9	370	0,374	987	1378	110,22	1098
81	1,7	0,22	-0,047	0,371	NO	6,7	53,99	1,9	374	0,388	965	1378	110,22	1075
80	1,7	0,23	-0,042	0,371	NO	6,6	53,32	1,8	379	0,402	943	1378	110,22	1053
79	1,8	0,23	-0,038	0,371	NO	6,5	52,65	1,8	384	0,416	922	1378	110,22	1032

DOD [%]	PESO BATERÍAS [kg]	ENERGÍA NOMINAL [kWh]	ENERGÍA DISPONIBLE [kWh]	ENERGÍA PERCENTIL 90 [kWh/viaje]	VIABLE	C-rate MEDIO DESCARGA	C-rate MAX DESCARGA	C-rate CARGA	COSTO BATERÍAS [\$]	TIEMPO DE VIDA BATERÍAS [años]	COSTO ANUAL DE BATERÍAS [\$/año]	ENERGÍA ANUAL CONSUMIDA [kWh/año]	COSTO ANUAL DE ENERGÍA [\$/año]	COSTO TOTAL ANUAL [\$/año]
78	1,8	0,23	-0,033	0,371	NO	6,4	51,99	1,8	389	0,431	901	1378	110,22	1011
77	1,8	0,24	-0,028	0,371	NO	6,3	51,32	1,8	394	0,447	881	1378	110,22	991
76	1,8	0,24	-0,024	0,371	NO	6,3	50,66	1,7	399	0,463	862	1378	110,22	972
75	1,9	0,24	-0,019	0,371	NO	6,2	49,99	1,7	404	0,480	843	1378	110,22	953
74	1,9	0,25	-0,014	0,371	NO	6,1	49,32	1,7	410	0,497	825	1378	110,22	935
73	1,9	0,25	-0,009	0,371	NO	6,0	48,66	1,7	415	0,515	807	1378	110,22	917
72	1,9	0,25	-0,004	0,371	NO	5,9	47,99	1,6	421	0,533	789	1378	110,22	900
71	2,0	0,26	0,001	0,371	NO	5,8	47,33	1,6	427	0,553	773	1378	110,23	883
70	2,0	0,26	0,007	0,371	NO	5,8	46,66	1,6	433	0,573	756	1378	110,23	867
69	2,0	0,26	0,012	0,371	NO	5,7	45,99	1,6	439	0,594	740	1378	110,23	851
68	2,1	0,27	0,018	0,371	NO	5,6	45,33	1,6	446	0,615	725	1378	110,23	835
67	2,1	0,27	0,023	0,371	NO	5,5	44,66	1,5	453	0,637	710	1378	110,23	820
66	2,1	0,28	0,029	0,371	NO	5,4	43,99	1,5	459	0,661	695	1378	110,23	806
65	2,1	0,28	0,035	0,371	NO	5,4	43,33	1,5	467	0,685	681	1378	110,23	792
64	2,2	0,28	0,041	0,371	NO	5,3	42,66	1,5	474	0,710	668	1378	110,23	778
63	2,2	0,29	0,047	0,371	NO	5,2	42,00	1,4	481	0,736	654	1378	110,23	764
62	2,3	0,29	0,054	0,371	NO	5,1	41,33	1,4	489	0,763	641	1378	110,23	751
61	2,3	0,30	0,060	0,371	NO	5,0	40,66	1,4	497	0,791	628	1378	110,24	739
60	2,3	0,30	0,067	0,371	NO	4,9	40,00	1,4	505	0,820	616	1378	110,24	726
59	2,4	0,31	0,074	0,371	NO	4,9	39,33	1,3	514	0,851	604	1378	110,24	714
58	2,4	0,31	0,081	0,371	NO	4,8	38,67	1,3	523	0,883	592	1378	110,24	703
57	2,5	0,32	0,088	0,371	NO	4,7	38,00	1,3	532	0,916	581	1378	110,24	691
56	2,5	0,32	0,095	0,371	NO	4,6	37,33	1,3	542	0,951	570	1378	110,24	680
55	2,5	0,33	0,103	0,371	NO	4,5	36,67	1,3	551	0,987	559	1378	110,24	669
54	2,6	0,34	0,111	0,371	NO	4,4	36,00	1,2	562	1,025	548	1378	110,25	658
53	2,6	0,34	0,119	0,371	NO	4,4	35,34	1,2	572	1,065	537	1378	110,25	648

DOD [%]	PESO BATERÍAS [kg]	ENERGÍA NOMINAL [kWh]	ENERGÍA DISPONIBLE [kWh]	ENERGÍA PERCENTIL 90 [kWh/viaje]	VIABLE	C-rate MEDIO DESCARGA	C-rate MAX DESCARGA	C-rate CARGA	COSTO BATERÍAS [\$]	TIEMPO DE VIDA BATERÍAS [años]	COSTO ANUAL DE BATERÍAS [\$/año]	ENERGÍA ANUAL CONSUMIDA [kWh/año]	COSTO ANUAL DE ENERGÍA [\$/año]	COSTO TOTAL ANUAL [\$/año]
52	2,7	0,35	0,127	0,371	NO	4,3	34,67	1,2	583	1,106	527	1378	110,25	637
51	2,7	0,36	0,136	0,371	NO	4,2	34,00	1,2	595	1,150	517	1378	110,25	627
50	2,8	0,36	0,145	0,371	NO	4,1	33,34	1,1	607	1,196	507	1378	110,25	617
49	2,9	0,37	0,154	0,371	NO	4,0	32,67	1,1	619	1,245	497	1378	110,25	607
48	2,9	0,38	0,163	0,371	NO	4,0	32,00	1,1	632	1,296	487	1378	110,26	598
47	3,0	0,39	0,173	0,371	NO	3,9	31,34	1,1	645	1,351	478	1378	110,26	588
46	3,0	0,39	0,183	0,371	NO	3,8	30,67	1,1	659	1,409	468	1378	110,26	578
45	3,1	0,40	0,194	0,371	NO	3,7	30,01	1,0	674	1,470	458	1378	110,26	569
44	3,2	0,41	0,205	0,371	NO	3,6	29,34	1,0	689	1,536	449	1378	110,26	559
43	3,2	0,42	0,216	0,371	NO	3,5	28,67	1,0	705	1,607	439	1378	110,27	549
42	3,3	0,43	0,228	0,371	NO	3,5	28,01	1,0	722	1,682	429	1378	110,27	540
41	3,4	0,44	0,241	0,371	NO	3,4	27,34	0,9	740	1,764	419	1378	110,27	530
40	3,5	0,45	0,254	0,371	NO	3,3	26,68	0,9	758	1,852	409	1378	110,27	520
39	3,6	0,47	0,267	0,371	NO	3,2	26,01	0,9	778	1,948	399	1378	110,28	510
38	3,7	0,48	0,281	0,371	NO	3,1	25,34	0,9	798	2,052	389	1379	110,28	499
37	3,8	0,49	0,296	0,371	NO	3,0	24,68	0,8	820	2,167	378	1379	110,28	489
36	3,9	0,50	0,312	0,371	NO	3,0	24,01	0,8	843	2,293	368	1379	110,29	478
35	4,0	0,52	0,328	0,371	NO	2,9	23,34	0,8	867	2,432	356	1379	110,29	467
34	4,1	0,53	0,345	0,371	NO	2,8	22,68	0,8	892	2,585	345	1379	110,29	455
33	4,2	0,55	0,364	0,371	NO	2,7	22,01	0,8	919	2,757	334	1379	110,30	444
32	4,4	0,57	0,383	0,371	SI	2,6	21,35	0,7	948	2,948	322	1379	110,30	432
31	4,5	0,59	0,403	0,371	SI	2,6	20,68	0,7	979	3,162	310	1379	110,31	420
30	4,7	0,61	0,425	0,371	SI	2,5	20,01	0,7	1012	3,404	297	1379	110,31	407
29	4,8	0,63	0,448	0,371	SI	2,4	19,35	0,7	1046	3,677	285	1379	110,32	395
28	5,0	0,65	0,472	0,371	SI	2,3	18,68	0,6	1084	3,986	272	1379	110,32	382
27	5,2	0,67	0,499	0,371	SI	2,2	18,02	0,6	1124	4,338	259	1379	110,33	369

DOD [%]	PESO BATERÍAS [kg]	ENERGÍA NOMINAL [kWh]	ENERGÍA DISPONIBLE [kWh]	ENERGÍA PERCENTIL 90 [kWh/viaje]	VIABLE	C-rate MEDIO DESCARGA	C-rate MAX DESCARGA	C-rate CARGA	COSTO BATERÍAS [\$]	TIEMPO DE VIDA BATERÍAS [años]	COSTO ANUAL DE BATERÍAS [\$/año]	ENERGÍA ANUAL CONSUMIDA [kWh/año]	COSTO ANUAL DE ENERGÍA [\$/año]	COSTO TOTAL ANUAL [\$/año]
26	5,4	0,70	0,527	0,371	SI	2,1	17,35	0,6	1167	4,739	246	1379	110,33	357
25	5,6	0,73	0,557	0,371	SI	2,1	16,68	0,6	1214	5,199	234	1379	110,34	344
24	5,8	0,76	0,590	0,371	SI	2,0	16,02	0,5	1265	5,726	221	1379	110,35	331
23	6,1	0,79	0,625	0,372	SI	1,9	15,35	0,5	1320	6,333	208	1379	110,36	319
22	6,4	0,83	0,664	0,372	SI	1,8	14,69	0,5	1380	7,033	196	1380	110,37	307
21	6,7	0,87	0,706	0,372	SI	1,7	14,02	0,5	1446	7,841	184	1380	110,38	295
20	7,0	0,91	0,752	0,372	SI	1,6	13,35	0,5	1518	8,777	173	1380	110,39	283
19	7,4	0,96	0,803	0,372	SI	1,6	12,69	0,4	1598	9,863	162	1380	110,40	272
18	7,8	1,01	0,859	0,372	SI	1,5	12,02	0,4	1687	11,124	152	1380	110,41	262
17	8,2	1,07	0,922	0,372	SI	1,4	11,35	0,4	1787	12,592	142	1380	110,43	252
16	8,7	1,14	0,992	0,372	SI	1,3	10,69	0,4	1899	14,301	133	1381	110,44	243
15	9,3	1,21	1,072	0,372	SI	1,2	10,02	0,3	2026	16,295	124	1381	110,46	235
14	10,0	1,30	1,163	0,372	SI	1,2	9,36	0,3	2171	18,623	117	1381	110,48	227
13	10,8	1,40	1,268	0,372	SI	1,1	8,69	0,3	2338	21,344	110	1381	110,51	220
12	11,7	1,52	1,389	0,372	SI	1,0	8,02	0,3	2534	24,526	103	1382	110,54	214
11	12,7	1,66	1,533	0,372	SI	0,9	7,36	0,3	2765	28,250	98	1382	110,57	208
10	14,0	1,82	1,705	0,372	SI	0,8	6,69	0,2	3043	32,612	93	1383	110,61	204
9	15,6	2,03	1,916	0,372	SI	0,7	6,03	0,2	3382	37,725	90	1383	110,66	200
8	17,5	2,28	2,179	0,373	SI	0,7	5,36	0,2	3807	43,720	87	1384	110,72	198
7	20,1	2,61	2,517	0,373	SI	0,6	4,69	0,2	4354	50,752	86	1385	110,80	197
6	23,4	3,04	2,968	0,373	SI	0,5	4,03	0,1	5085	59,006	86	1386	110,91	197
5	28,1	3,66	3,600	0,374	SI	0,4	3,36	0,1	6110	68,696	89	1388	111,06	200
4	35,3	4,58	4,551	0,374	SI	0,3	2,69	0,1	7654	80,076	96	1391	111,29	207
3	47,2	6,13	6,144	0,376	SI	0,2	2,03	0,1	10240	93,445	110	1396	111,68	221
2	71,2	9,26	9,361	0,378	SI	0,2	1,36	0,0	15467	109,155	142	1406	112,45	254
1	145,5	18,92	19,282	0,385	SI	0,1	0,70	0,0	31592	127,618	248	1436	114,84	362

ANEXO 10. Tabla de resultados para la simulación con supercapacitores para un viaje de operación

CAP [F]	ENERGÍA NOMINAL SC [kWh]	PESO SC [kg]	I MAX DES [A]	ENERGÍA LUEGO RES [kWh]	VIABLE	VOLT MIN DESC [V]	ENERGÍA TOTAL CARGA [kWh]	EFICIENCIA CARGA [%]	COSTO SC [\$]	TIEMPO DE VIDA SC [años]	COSTO ANUAL DE SC [\$ /año]	ENERGÍA ANUAL CONSUMIDA [kWh/año]	COSTO ANUAL DE ENERGÍA [\$ /año]	COSTO TOTAL ANUAL [\$ /año]
1367	0,437	109	0	0	NO	0	0	0%	0	0	0	0	0	0
1377	0,441	110	0	0	NO	0	0	0%	0	0	0	0	0	0
1387	0,444	111	0	0	NO	0	0	0%	0	0	0	0	0	0
1397	0,447	112	0	0	NO	0	0	0%	0	0	0	0	0	0
1407	0,450	113	345	0,451	NO	3,6	0	0%	0	0	0	0	0	0
1417	0,453	113	345	0,451	SI	5,3	0,81	56%	20406	26,09	782	2618	209	1232
1427	0,457	114	345	0,451	SI	6,6	0,79	57%	20550	26,09	788	2558	205	1232
1437	0,460	115	345	0,451	SI	7,7	0,77	58%	20694	26,09	793	2509	201	1234
1447	0,463	116	345	0,452	SI	8,6	0,76	59%	20838	26,09	799	2469	198	1236
1457	0,466	117	345	0,452	SI	9,4	0,75	60%	20982	26,09	804	2435	195	1239
1467	0,469	117	345	0,452	SI	10,2	0,74	61%	21126	26,09	810	2404	192	1242
1477	0,473	118	345	0,452	SI	10,8	0,73	61%	21270	26,09	815	2378	190	1245
1487	0,476	119	345	0,452	SI	11,5	0,72	62%	21414	26,09	821	2352	188	1249
1497	0,479	120	345	0,452	SI	12,1	0,72	63%	21558	26,09	826	2330	186	1253
1507	0,482	121	345	0,452	SI	12,6	0,71	63%	21702	26,09	832	2309	185	1256
1517	0,485	121	345	0,452	SI	13,2	0,71	64%	21846	26,09	837	2289	183	1260
1527	0,489	122	345	0,452	SI	13,7	0,70	64%	21990	26,09	843	2272	182	1265
1537	0,492	123	345	0,452	SI	14,1	0,69	65%	22134	26,09	848	2255	180	1269
1547	0,495	124	345	0,452	SI	14,6	0,69	65%	22278	26,09	854	2238	179	1273
1557	0,498	125	345	0,452	SI	15,0	0,69	66%	22422	26,09	859	2223	178	1277
1567	0,501	125	345	0,452	SI	15,4	0,68	66%	22566	26,09	865	2210	177	1282
1577	0,505	126	345	0,452	SI	15,8	0,68	66%	22710	26,09	870	2197	176	1286

CAP [F]	ENERGÍA NOMINAL SC [kWh]	PESO SC [kg]	I MAX DES [A]	ENERGÍA LUEGO RES [kWh]	VIABLE	VOLT MIN DESC [V]	ENERGÍA TOTAL CARGA [kWh]	EFICIENCIA CARGA [%]	COSTO SC [\$]	TIEMPO DE VIDA SC [años]	COSTO ANUAL DE SC [\$/año]	ENERGÍA ANUAL CONSUMIDA [kWh/año]	COSTO ANUAL DE ENERGÍA [\$/año]	COSTO TOTAL ANUAL [\$/año]
1597	0,511	128	345	0,453	SI	16,6	0,67	67%	22998	26,09	881	2172	174	1295
1607	0,514	129	345	0,453	SI	17,0	0,67	68%	23142	26,09	887	2160	173	1300
1617	0,517	129	345	0,453	SI	17,3	0,66	68%	23286	26,09	892	2148	172	1304
1627	0,521	130	345	0,453	SI	17,7	0,66	68%	23430	26,09	898	2138	171	1309
1637	0,524	131	345	0,453	SI	18,0	0,66	69%	23574	26,09	903	2128	170	1314
1647	0,527	132	345	0,453	SI	18,3	0,65	69%	23718	26,09	909	2118	169	1318
1657	0,530	133	345	0,453	SI	18,6	0,65	69%	23862	26,09	914	2109	169	1323
1667	0,533	133	345	0,453	SI	18,9	0,65	70%	24006	26,09	920	2099	168	1328
1677	0,537	134	345	0,453	SI	19,2	0,64	70%	24150	26,09	926	2090	167	1333
1687	0,540	135	345	0,453	SI	19,5	0,64	70%	24294	26,09	931	2083	167	1338
1697	0,543	136	345	0,453	SI	19,8	0,64	71%	24438	26,09	937	2074	166	1342
1707	0,546	137	345	0,453	SI	20,0	0,64	71%	24582	26,09	942	2067	165	1347
1717	0,549	137	345	0,454	SI	20,3	0,63	71%	24726	26,09	948	2059	165	1352
1727	0,553	138	345	0,454	SI	20,6	0,63	71%	24870	26,09	953	2052	164	1357
1737	0,556	139	345	0,454	SI	20,8	0,63	72%	25014	26,09	959	2045	164	1362
1747	0,559	140	345	0,454	SI	21,1	0,63	72%	25158	26,09	964	2037	163	1367
1757	0,562	141	345	0,454	SI	21,3	0,63	72%	25302	26,09	970	2031	162	1372
1767	0,565	141	345	0,454	SI	21,5	0,62	72%	25446	26,09	975	2025	162	1377
1777	0,569	142	345	0,454	SI	21,8	0,62	73%	25590	26,09	981	2019	162	1382
1787	0,572	143	345	0,454	SI	22,0	0,62	73%	25734	26,09	986	2013	161	1387
1797	0,575	144	345	0,454	SI	22,2	0,62	73%	25878	26,09	992	2006	161	1392
1807	0,578	145	345	0,454	SI	22,4	0,62	73%	26022	26,09	997	2002	160	1397
1817	0,581	145	345	0,454	SI	22,6	0,61	74%	26166	26,09	1003	1995	160	1402
1827	0,585	146	345	0,454	SI	22,9	0,61	74%	26310	26,09	1008	1990	159	1408
1837	0,588	147	345	0,454	SI	23,1	0,61	74%	26454	26,09	1014	1985	159	1413
1847	0,591	148	345	0,455	SI	23,3	0,61	74%	26598	26,09	1019	1980	158	1418

CAP [F]	ENERGÍA NOMINAL SC [kWh]	PESO SC [kg]	I MAX DES [A]	ENERGÍA LUEGO RES [kWh]	VIABLE	VOLT MIN DESC [V]	ENERGÍA TOTAL CARGA [kWh]	EFICIENCIA CARGA [%]	COSTO SC [\$]	TIEMPO DE VIDA SC [años]	COSTO ANUAL DE SC [\$ /año]	ENERGÍA ANUAL CONSUMIDA [kWh/año]	COSTO ANUAL DE ENERGÍA [\$ /año]	COSTO TOTAL ANUAL [\$ /año]
1857	0,594	149	345	0,455	SI	23,4	0,61	74%	26742	26,09	1025	1975	158	1423
1867	0,597	149	345	0,455	SI	23,6	0,61	75%	26886	26,09	1030	1970	158	1428
1877	0,601	150	345	0,455	SI	23,8	0,61	75%	27030	26,09	1036	1965	157	1433
1887	0,604	151	345	0,455	SI	24,0	0,60	75%	27174	26,09	1041	1961	157	1438
1897	0,607	152	345	0,455	SI	24,2	0,60	75%	27318	26,09	1047	1955	156	1443
1907	0,610	153	345	0,455	SI	24,4	0,60	75%	27462	26,09	1052	1951	156	1449
1917	0,613	153	345	0,455	SI	24,5	0,60	76%	27606	26,09	1058	1947	156	1454
1927	0,617	154	346	0,455	SI	24,7	0,60	76%	27750	26,09	1064	1943	155	1459
1937	0,620	155	346	0,455	SI	24,9	0,60	76%	27894	26,09	1069	1939	155	1464
1947	0,623	156	346	0,455	SI	25,1	0,60	76%	28038	26,09	1075	1935	155	1469
1957	0,626	157	346	0,455	SI	25,2	0,60	76%	28182	26,09	1080	1932	155	1475
1967	0,629	157	346	0,456	SI	25,4	0,59	76%	28326	26,09	1086	1927	154	1480
1977	0,633	158	346	0,456	SI	25,5	0,59	77%	28470	26,09	1091	1923	154	1485
1987	0,636	159	346	0,456	SI	25,7	0,59	77%	28614	26,09	1097	1920	154	1490
1997	0,639	160	346	0,456	SI	25,8	0,59	77%	28758	26,09	1102	1917	153	1495
2007	0,642	161	346	0,456	SI	26,0	0,59	77%	28902	26,09	1108	1913	153	1501
2017	0,645	161	346	0,456	SI	26,1	0,59	77%	29046	26,09	1113	1910	153	1506
2027	0,649	162	346	0,456	SI	26,3	0,59	77%	29190	26,09	1119	1907	153	1511
2037	0,652	163	346	0,456	SI	26,4	0,59	78%	29334	26,09	1124	1903	152	1516
2047	0,655	164	346	0,456	SI	26,6	0,59	78%	29478	26,09	1130	1900	152	1522
2057	0,658	165	346	0,456	SI	26,7	0,58	78%	29622	26,09	1135	1896	152	1527
2067	0,661	165	346	0,456	SI	26,8	0,58	78%	29766	26,09	1141	1894	152	1532
2077	0,665	166	346	0,457	SI	27,0	0,58	78%	29910	26,09	1146	1890	151	1537
2087	0,668	167	346	0,457	SI	27,1	0,58	78%	30054	26,09	1152	1888	151	1543
2097	0,671	168	346	0,457	SI	27,2	0,58	78%	30198	26,09	1157	1884	151	1548
2107	0,674	169	347	0,457	SI	27,4	0,58	79%	30342	26,09	1163	1881	151	1553

CAP [F]	ENERGÍA NOMINAL SC [kWh]	PESO SC [kg]	I MAX DES [A]	ENERGÍA LUEGO RES [kWh]	VIABLE	VOLT MIN DESC [V]	ENERGÍA TOTAL CARGA [kWh]	EFICIENCIA CARGA [%]	COSTO SC [\$]	TIEMPO DE VIDA SC [años]	COSTO ANUAL DE SC [\$/año]	ENERGÍA ANUAL CONSUMIDA [kWh/año]	COSTO ANUAL DE ENERGÍA [\$/año]	COSTO TOTAL ANUAL [\$/año]
2117	0,677	169	347	0,457	SI	27,5	0,58	79%	30486	26,09	1168	1879	150	1559
2127	0,681	170	347	0,457	SI	27,6	0,58	79%	30630	26,09	1174	1876	150	1564
2137	0,684	171	347	0,457	SI	27,8	0,58	79%	30774	26,09	1179	1873	150	1569
2147	0,687	172	347	0,457	SI	27,9	0,58	79%	30918	26,09	1185	1870	150	1575
2157	0,690	173	347	0,457	SI	28,0	0,58	79%	31062	26,09	1190	1868	149	1580
2167	0,693	173	347	0,457	SI	28,1	0,57	79%	31206	26,09	1196	1866	149	1585
2177	0,697	174	347	0,457	SI	28,2	0,57	79%	31350	26,09	1201	1863	149	1591
2187	0,700	175	347	0,457	SI	28,4	0,57	80%	31494	26,09	1207	1861	149	1596
2197	0,703	176	347	0,458	SI	28,5	0,57	80%	31638	26,09	1213	1858	149	1601
2207	0,706	177	347	0,458	SI	28,6	0,57	80%	31782	26,09	1218	1856	149	1607
2217	0,709	177	347	0,458	SI	28,7	0,57	80%	31926	26,09	1224	1854	148	1612
2227	0,713	178	347	0,458	SI	28,8	0,57	80%	32070	26,09	1229	1851	148	1617
2237	0,716	179	347	0,458	SI	28,9	0,57	80%	32214	26,09	1235	1849	148	1622
2247	0,719	180	347	0,458	SI	29,0	0,57	80%	32358	26,09	1240	1847	148	1628
2257	0,722	181	348	0,458	SI	29,1	0,57	80%	32502	26,09	1246	1845	148	1633
2267	0,725	181	348	0,458	SI	29,2	0,57	80%	32646	26,09	1251	1842	147	1639
2277	0,729	182	348	0,458	SI	29,3	0,57	81%	32790	26,09	1257	1841	147	1644
2287	0,732	183	348	0,458	SI	29,4	0,57	81%	32934	26,09	1262	1839	147	1649
2297	0,735	184	348	0,458	SI	29,5	0,57	81%	33078	26,09	1268	1836	147	1655
2307	0,738	185	348	0,458	SI	29,6	0,57	81%	33222	26,09	1273	1835	147	1660
2317	0,741	185	348	0,459	SI	29,7	0,56	81%	33366	26,09	1279	1833	147	1665
2327	0,745	186	348	0,459	SI	29,8	0,56	81%	33510	26,09	1284	1831	147	1671
2337	0,748	187	348	0,459	SI	29,9	0,56	81%	33654	26,09	1290	1829	146	1676
2347	0,751	188	348	0,459	SI	30,0	0,56	81%	33798	26,09	1295	1827	146	1681
2357	0,754	189	348	0,459	SI	30,1	0,56	81%	33942	26,09	1301	1826	146	1687
2367	0,757	189	348	0,459	SI	30,2	0,56	81%	34086	26,09	1306	1824	146	1692

CAP [F]	ENERGÍA NOMINAL SC [kWh]	PESO SC [kg]	I MAX DES [A]	ENERGÍA LUEGO RES [kWh]	VIABLE	VOLT MIN DESC [V]	ENERGÍA TOTAL CARGA [kWh]	EFICIENCIA CARGA [%]	COSTO SC [\$]	TIEMPO DE VIDA SC [años]	COSTO ANUAL DE SC [\$ /año]	ENERGÍA ANUAL CONSUMIDA [kWh/año]	COSTO ANUAL DE ENERGÍA [\$ /año]	COSTO TOTAL ANUAL [\$ /año]
2377	0,761	190	349	0,459	SI	30,3	0,56	82%	34230	26,09	1312	1822	146	1698
2387	0,764	191	349	0,459	SI	30,4	0,56	82%	34374	26,09	1317	1821	146	1703
2397	0,767	192	349	0,459	SI	30,5	0,56	82%	34518	26,09	1323	1819	146	1708
2407	0,770	193	349	0,459	SI	30,6	0,56	82%	34662	26,09	1328	1817	145	1714
2417	0,773	193	349	0,459	SI	30,7	0,56	82%	34806	26,09	1334	1815	145	1719
2427	0,777	194	349	0,460	SI	30,7	0,56	82%	34950	26,09	1339	1813	145	1724
2437	0,780	195	349	0,460	SI	30,8	0,56	82%	35094	26,09	1345	1812	145	1730
2447	0,783	196	349	0,460	SI	30,9	0,56	82%	35238	26,09	1350	1810	145	1735
2457	0,786	197	349	0,460	SI	31,0	0,56	82%	35382	26,09	1356	1808	145	1741
2467	0,789	197	349	0,460	SI	31,1	0,56	82%	35526	26,09	1362	1807	145	1746
2477	0,793	198	349	0,460	SI	31,2	0,56	82%	35670	26,09	1367	1806	144	1752
2487	0,796	199	349	0,460	SI	31,3	0,56	83%	35814	26,09	1373	1804	144	1757
2497	0,799	200	350	0,460	SI	31,3	0,56	83%	35958	26,09	1378	1803	144	1762
2507	0,802	201	350	0,460	SI	31,4	0,56	83%	36102	26,09	1384	1802	144	1768
2517	0,805	201	350	0,460	SI	31,5	0,55	83%	36246	26,09	1389	1800	144	1773
2527	0,809	202	350	0,460	SI	31,6	0,55	83%	36390	26,09	1395	1799	144	1779
2537	0,812	203	350	0,460	SI	31,6	0,55	83%	36534	26,09	1400	1798	144	1784
2547	0,815	204	350	0,461	SI	31,7	0,55	83%	36678	26,09	1406	1796	144	1789
2557	0,818	205	350	0,461	SI	31,8	0,55	83%	36822	26,09	1411	1795	144	1795
2567	0,821	205	350	0,461	SI	31,9	0,55	83%	36966	26,09	1417	1793	143	1800
2577	0,825	206	350	0,461	SI	31,9	0,55	83%	37110	26,09	1422	1792	143	1806
2587	0,828	207	350	0,461	SI	32,0	0,55	83%	37254	26,09	1428	1790	143	1811
2597	0,831	208	350	0,461	SI	32,1	0,55	83%	37398	26,09	1433	1789	143	1816
2607	0,834	209	351	0,461	SI	32,2	0,55	83%	37542	26,09	1439	1788	143	1822
2617	0,837	209	351	0,461	SI	32,2	0,55	84%	37686	26,09	1444	1787	143	1827
2627	0,841	210	351	0,461	SI	32,3	0,55	84%	37830	26,09	1450	1785	143	1833

CAP [F]	ENERGÍA NOMINAL SC [kWh]	PESO SC [kg]	I MAX DES [A]	ENERGÍA LUEGO RES [kWh/h]	VIABLE	VOLT MIN DESC [V]	ENERGÍA TOTAL CARGA [kWh]	EFICIENCIA CARGA [%]	COSTO SC [\$]	TIEMPO DE VIDA SC [años]	COSTO ANUAL DE SC [\$ /año]	ENERGÍA ANUAL CONSUMIDA [kWh/año]	COSTO ANUAL DE ENERGÍA [\$ /año]	COSTO TOTAL ANUAL [\$ /año]
2637	0,844	211	351	0,461	SI	32,4	0,55	84%	37974	26,09	1455	1785	143	1838
2647	0,847	212	351	0,461	SI	32,4	0,55	84%	38118	26,09	1461	1782	143	1843
2657	0,850	213	351	0,462	SI	32,5	0,55	84%	38262	26,09	1466	1782	143	1849
2667	0,853	213	351	0,462	SI	32,6	0,55	84%	38406	26,09	1472	1781	142	1854
2677	0,857	214	351	0,462	SI	32,6	0,55	84%	38550	26,09	1477	1780	142	1860
2687	0,860	215	351	0,462	SI	32,7	0,55	84%	38694	26,09	1483	1779	142	1865
2697	0,863	216	351	0,462	SI	32,8	0,55	84%	38838	26,09	1488	1778	142	1871
2707	0,866	217	351	0,462	SI	32,8	0,55	84%	38982	26,09	1494	1777	142	1876
2717	0,869	217	352	0,462	SI	32,9	0,55	84%	39126	26,09	1499	1776	142	1882
2727	0,873	218	352	0,462	SI	33,0	0,55	84%	39270	26,09	1505	1775	142	1887

ANEXO 11. Tabla de resultados para la simulación con baterías de plomo y SC para un viaje de operación

% Ebat [%]	ENERGÍA NOMINAL BATERÍA [kWh]	ENERGÍA NOMINAL SC [kWh]	PESO BAT + SC [kg]	PESO BATERÍAS [kg]	COSTO BATERÍAS [\$]	DOD BATERÍAS [%]	TIEMPO DE VIDA BATERÍAS [años]	COSTO ANUAL DE BATERÍAS [\$/año]	COSTO SC [\$]	TIEMPO DE VIDA SC [años]	COSTO ANUAL DE SC [\$/año]	ENERGÍA ANUAL CONSUMIDA BATERÍA [kWh/año]	ENERGÍA ANUAL CONSUMIDA SC [kWh/año]	COSTO ANUAL DE ENERGÍA [\$/año]	COSTO TOTAL ANUAL [\$/año]
1	0,57	0,48	133	13	160	0,3	1,48	108	21672	26,1	831	14	1783	144	1323
2	0,31	0,48	126	7	87	1,1	1,40	62	21431	26,1	821	27	1764	143	1266
3	0,23	0,47	123	5	65	2,3	1,31	50	21205	26,1	813	41	1744	143	1246
4	0,20	0,47	121	5	57	3,5	1,21	47	20983	26,1	804	55	1725	142	1234
5	0,19	0,46	120	4	54	4,6	1,13	48	20762	26,1	796	68	1708	142	1225
6	0,19	0,46	118	4	53	5,7	1,06	50	20541	26,1	787	82	1689	142	1219
7	0,19	0,45	117	4	52	6,6	1,00	52	20321	26,1	779	95	1670	141	1212
8	0,20	0,45	116	4	55	7,2	0,97	57	20102	26,1	770	109	1652	141	1208
9	0,21	0,44	115	5	59	7,6	0,94	62	19883	26,1	762	123	1634	141	1205
10	0,22	0,44	114	5	62	8,0	0,92	67	19664	26,1	754	137	1615	140	1201
11	0,23	0,43	113	5	65	8,4	0,90	72	19446	26,1	745	151	1597	140	1197
12	0,24	0,43	112	5	68	8,7	0,88	77	19227	26,1	737	165	1578	139	1194
13	0,25	0,42	111	6	71	9,0	0,87	82	19008	26,1	728	178	1560	139	1190
14	0,27	0,42	110	6	74	9,4	0,85	87	18790	26,1	720	192	1541	139	1186
15	0,28	0,41	109	6	77	9,7	0,84	92	18572	26,1	712	206	1523	138	1182
16	0,29	0,41	108	6	80	9,9	0,82	97	18354	26,1	703	220	1505	138	1178
17	0,30	0,40	107	7	83	10,2	0,81	102	18136	26,1	695	234	1485	138	1175
18	0,30	0,40	106	7	85	10,5	0,80	107	17919	26,1	687	247	1469	137	1171
19	0,32	0,39	105	7	89	10,6	0,79	112	17701	26,1	678	262	1449	137	1167
20	0,33	0,39	104	7	93	10,7	0,79	118	17483	26,1	670	276	1431	137	1164
21	0,34	0,38	104	8	96	10,8	0,78	123	17265	26,1	662	290	1411	136	1161
22	0,36	0,38	103	8	100	11,0	0,78	129	17048	26,1	653	304	1396	136	1158

% Ebat [%]	ENERGÍA NOMINAL BATERÍA [kWh]	ENERGÍA NOMINAL SC [kWh]	PESO BAT + SC [kg]	PESO BATERÍAS [kg]	COSTO BATERÍAS [\$]	DOD BATERÍAS [%]	TIEMPO DE VIDA BATERÍAS [años]	COSTO ANUAL DE BATERÍAS [\$/año]	COSTO SC [\$]	TIEMPO DE VIDA SC [años]	COSTO ANUAL DE SC [\$/año]	ENERGÍA ANUAL CONSUMIDA BATERÍA [kWh/año]	ENERGÍA ANUAL CONSUMIDA SC [kWh/año]	COSTO ANUAL DE ENERGÍA [\$/año]	COSTO TOTAL ANUAL [\$/año]
23	0,37	0,37	102	8	103	11,1	0,77	134	16830	26,1	645	318	1376	136	1155
24	0,38	0,37	101	8	107	11,2	0,77	139	16613	26,1	637	333	1357	135	1151
25	0,39	0,36	100	9	110	11,3	0,76	145	16397	26,1	628	347	1338	135	1148
26	0,41	0,36	99	9	114	11,4	0,76	150	16180	26,1	620	361	1322	135	1145
27	0,42	0,35	98	9	117	11,5	0,75	155	15964	26,1	612	375	1303	134	1141
28	0,43	0,35	97	10	120	11,6	0,75	161	15748	26,1	604	389	1284	134	1138
29	0,44	0,35	96	10	124	11,7	0,75	166	15531	26,1	595	404	1264	133	1135
30	0,46	0,34	95	10	128	11,7	0,74	172	15314	26,1	587	419	1249	133	1132
31	0,47	0,34	94	10	132	11,8	0,74	177	15096	26,1	579	434	1226	133	1129
32	0,48	0,33	93	11	136	11,8	0,74	183	14880	26,1	570	449	1211	133	1126
33	0,50	0,33	93	11	139	11,9	0,74	189	14663	26,1	562	464	1188	132	1123
34	0,51	0,32	92	11	143	11,9	0,74	194	14447	26,1	554	479	1173	132	1120
35	0,52	0,32	91	12	146	12,0	0,73	200	14231	26,1	545	494	1158	132	1117
36	0,54	0,31	90	12	150	12,1	0,73	205	14015	26,1	537	509	1134	131	1114
37	0,55	0,31	89	12	154	12,1	0,73	211	13799	26,1	529	523	1119	131	1111
38	0,56	0,30	88	12	157	12,2	0,73	216	13584	26,1	521	538	1097	131	1108
39	0,57	0,30	87	13	161	12,2	0,72	222	13369	26,1	512	553	1081	131	1105
40	0,59	0,29	86	13	164	12,3	0,72	227	13154	26,1	504	568	1067	131	1102
41	0,60	0,29	85	13	168	12,3	0,72	233	12940	26,1	496	583	1043	130	1099
42	0,61	0,28	84	14	172	12,3	0,72	238	12726	26,1	488	598	1028	130	1096
43	0,63	0,28	83	14	176	12,4	0,72	244	12510	26,1	479	614	1006	130	1093
44	0,64	0,27	83	14	179	12,4	0,72	250	12296	26,1	471	629	993	130	1091
45	0,65	0,27	82	15	183	12,5	0,72	256	12079	26,1	463	646	965	129	1087
46	0,67	0,26	81	15	187	12,5	0,71	262	11862	26,1	455	662	951	129	1085
47	0,68	0,26	80	15	191	12,5	0,71	267	11645	26,1	446	678	938	129	1083

% Ebat [%]	ENERGÍA NOMINAL BATERÍA [kWh]	ENERGÍA NOMINAL SC [kWh]	PESO BAT + SC [kg]	PESO BATERÍAS [kg]	COSTO BATERÍAS [\$]	DOD BATERÍAS [%]	TIEMPO DE VIDA BATERÍAS [años]	COSTO ANUAL DE BATERÍAS [\$/año]	COSTO SC [\$]	TIEMPO DE VIDA SC [años]	COSTO ANUAL DE SC [\$/año]	ENERGÍA ANUAL CONSUMIDA BATERÍA [kWh/año]	ENERGÍA ANUAL CONSUMIDA SC [kWh/año]	COSTO ANUAL DE ENERGÍA [\$/año]	COSTO TOTAL ANUAL [\$/año]
48	0,70	0,25	79	15	195	12,5	0,71	273	11429	26,1	438	695	909	128	1080
49	0,71	0,25	78	16	198	12,6	0,71	279	11216	26,1	430	710	896	128	1077
50	0,72	0,24	77	16	202	12,6	0,71	285	11000	26,1	422	726	883	129	1075
51	0,73	0,24	76	16	206	12,6	0,71	290	10784	26,1	413	742	854	128	1071
52	0,75	0,23	75	17	210	12,7	0,71	296	10568	26,1	405	759	841	128	1069
53	0,76	0,23	74	17	213	12,7	0,71	302	10352	26,1	397	775	828	128	1067
54	0,77	0,23	74	17	217	12,7	0,70	308	10141	26,1	389	790	799	127	1063
55	0,79	0,22	73	17	220	12,8	0,70	313	9926	26,1	380	806	786	127	1061
56	0,80	0,22	72	18	224	12,8	0,70	319	9711	26,1	372	822	773	128	1059
57	0,81	0,21	71	18	228	12,8	0,70	325	9497	26,1	364	839	744	127	1056
58	0,83	0,21	70	18	232	12,8	0,70	331	9283	26,1	356	855	731	127	1053
59	0,84	0,20	69	19	236	12,8	0,70	336	9069	26,1	348	871	718	127	1051
60	0,85	0,20	68	19	239	12,9	0,70	342	8860	26,1	340	886	705	127	1049
61	0,87	0,19	67	19	243	12,9	0,70	348	8648	26,1	331	902	677	126	1045
62	0,88	0,19	66	20	246	12,9	0,70	353	8437	26,1	323	918	663	126	1043
63	0,89	0,18	66	20	250	13,0	0,70	359	8223	26,1	315	935	640	126	1040
64	0,91	0,18	65	20	254	13,0	0,70	366	8003	26,1	307	954	616	126	1038
65	0,92	0,17	64	21	259	13,0	0,70	372	7782	26,1	298	972	593	125	1035
66	0,93	0,17	63	21	262	13,0	0,69	377	7573	26,1	290	988	595	127	1034
67	0,95	0,16	62	21	266	13,0	0,69	384	7353	26,1	282	1007	572	126	1032
68	0,96	0,16	61	21	270	13,0	0,69	390	7132	26,1	273	1026	549	126	1029
69	0,98	0,15	60	22	273	13,1	0,69	395	6924	26,1	265	1042	525	125	1026
70	0,99	0,15	59	22	277	13,1	0,69	402	6703	26,1	257	1060	502	125	1024
71	1,01	0,14	58	22	282	13,1	0,69	408	6482	26,1	248	1079	504	127	1023
72	1,02	0,14	57	23	285	13,2	0,69	413	6274	26,1	240	1095	481	126	1020

% Ebat [%]	ENERGÍA NOMINAL BATERÍA [kWh]	ENERGÍA NOMINAL SC [kWh]	PESO BAT + SC [kg]	PESO BATERÍAS [kg]	COSTO BATERÍAS [\$]	DOD BATERÍAS [%]	TIEMPO DE VIDA BATERÍAS [años]	COSTO ANUAL DE BATERÍAS [\$/año]	COSTO SC [\$]	TIEMPO DE VIDA SC [años]	COSTO ANUAL DE SC [\$/año]	ENERGÍA ANUAL CONSUMIDA BATERÍA [kWh/año]	ENERGÍA ANUAL CONSUMIDA SC [kWh/año]	COSTO ANUAL DE ENERGÍA [\$/año]	COSTO TOTAL ANUAL [\$/año]
73	1,03	0,13	57	23	289	13,2	0,69	420	6053	26,1	232	1113	458	126	1017
74	1,05	0,13	56	23	293	13,2	0,69	426	5831	26,1	223	1132	434	125	1015
75	1,06	0,12	55	23	296	13,2	0,69	431	5624	26,1	216	1147	411	125	1012
76	1,07	0,12	54	24	300	13,2	0,69	438	5402	26,1	207	1166	413	126	1011
77	1,09	0,12	53	24	304	13,2	0,69	444	5180	26,1	199	1184	390	126	1008
78	1,10	0,11	52	24	309	13,2	0,69	450	4958	26,1	190	1203	367	126	1006
79	1,11	0,11	51	25	312	13,3	0,68	455	4750	26,1	182	1218	344	125	1003
80	1,13	0,10	50	25	316	13,3	0,68	462	4528	26,1	174	1237	321	125	1000
81	1,14	0,10	49	25	320	13,3	0,68	468	4306	26,1	165	1255	323	126	999
82	1,15	0,09	48	26	323	13,3	0,68	473	4098	26,1	157	1271	300	126	996
83	1,17	0,09	47	26	327	13,3	0,68	479	3876	26,1	149	1289	277	125	993
84	1,18	0,08	47	26	332	13,3	0,68	486	3643	26,1	140	1310	244	124	990
85	1,20	0,08	46	27	335	13,4	0,68	492	3422	26,1	131	1329	246	126	989
86	1,21	0,07	45	27	339	13,4	0,68	498	3201	26,1	123	1347	213	125	986
87	1,22	0,07	44	27	342	13,4	0,68	504	2979	26,1	114	1366	214	126	985
88	1,24	0,06	43	27	346	13,4	0,68	510	2756	26,1	106	1384	181	125	981
89	1,26	0,06	42	28	351	13,4	0,68	518	2508	26,1	96	1408	183	127	981
90	1,27	0,05	41	28	355	13,4	0,68	524	2283	26,1	87	1427	150	126	977
91	1,28	0,05	40	28	359	13,5	0,68	530	2058	26,1	79	1445	118	125	974
92	1,29	0,04	39	29	362	13,5	0,68	536	1832	26,1	70	1463	119	127	973
93	1,31	0,04	38	29	366	13,5	0,68	542	1605	26,1	62	1482	87	125	969
94	1,32	0,03	37	29	370	13,5	0,67	548	1377	26,1	53	1500	88	127	968
95	1,34	0,03	36	30	375	13,5	0,68	555	1129	26,1	43	1524	57	126	965
96	1,35	0,02	35	30	378	13,5	0,67	561	901	26,1	35	1542	56	128	964
97	1,36	0,01	34	30	382	13,6	0,67	567	673	26,1	26	1560	0	125	958

% Ebat [%]	ENERGÍA NOMINAL BATERÍA [kWh]	ENERGÍA NOMINAL SC [kWh]	PESO BAT + SC [kg]	PESO BATERÍAS [kg]	COSTO BATERÍAS [\$]	DOD BATERÍAS [%]	TIEMPO DE VIDA BATERÍAS [años]	COSTO ANUAL DE BATERÍAS [\$/año]	COSTO SC [\$]	TIEMPO DE VIDA SC [años]	COSTO ANUAL DE SC [\$año]	ENERGÍA ANUAL CONSUMIDA BATERÍA [kWh/año]	ENERGÍA ANUAL CONSUMIDA SC [kWh/año]	COSTO ANUAL DE ENERGÍA [\$año]	COSTO TOTAL ANUAL [\$/año]
98	1,38	0,01	33	31	386	13,6	0,67	573	445	26,1	17	1579	0	126	956

ANEXO 12. Tabla de resultados para la simulación con baterías de Ni-MH y SC para un viaje de operación

% Ebat [%]	ENERGÍA NOMINAL BATERÍA [kWh]	ENERGÍA NOMINAL SC [kWh]	PESO BAT + SC [kg]	PESO BATERÍAS [kg]	COSTO BATERÍAS [\$/]	DOD BATERÍAS [%]	TIEMPO DE VIDA BATERÍAS [años]	COSTO ANUAL DE BATERÍAS [\$/año]	COSTO SC [\$/]	TIEMPO DE VIDA SC [años]	COSTO ANUAL DE SC [\$/año]	ENERGÍA ANUAL CONSUMIDA BATERÍA [kWh/año]	ENERGÍA ANUAL CONSUMIDA SC [kWh/año]	COSTO ANUAL DE ENERGÍA [\$/año]	COSTO TOTAL ANUAL [\$/año]
20	0,26	0,39	102	5	194	0,1	0,53	369	17472	26,1	670	278	1428	136	1415
21	0,27	0,38	101	5	201	0,1	0,52	387	17254	26,1	661	292	1412	136	1424
22	0,28	0,38	100	5	207	0,1	0,51	404	17036	26,1	653	306	1393	136	1433
23	0,28	0,37	99	5	213	0,1	0,51	421	16819	26,1	645	321	1374	136	1441
24	0,29	0,37	98	6	220	0,1	0,50	438	16602	26,1	636	335	1359	135	1450
25	0,30	0,36	97	6	226	0,1	0,50	456	16385	26,1	628	349	1340	135	1459
26	0,31	0,36	96	6	232	0,2	0,49	473	16168	26,1	620	364	1320	135	1467
27	0,32	0,35	95	6	238	0,2	0,49	490	15952	26,1	611	378	1301	134	1476
28	0,32	0,35	94	6	244	0,2	0,48	507	15736	26,1	603	392	1285	134	1484
29	0,33	0,34	93	6	251	0,2	0,48	525	15519	26,1	595	407	1262	134	1493
30	0,34	0,34	91	6	258	0,2	0,47	543	15302	26,1	586	422	1246	133	1503
31	0,35	0,34	90	7	265	0,2	0,47	561	15085	26,1	578	438	1223	133	1512
32	0,36	0,33	89	7	272	0,2	0,47	580	14868	26,1	570	453	1208	133	1522
33	0,37	0,33	88	7	279	0,2	0,47	598	14651	26,1	562	468	1193	133	1532
34	0,38	0,32	87	7	286	0,2	0,46	616	14435	26,1	553	483	1169	132	1541
35	0,39	0,32	86	7	293	0,2	0,46	634	14219	26,1	545	498	1155	132	1551
36	0,40	0,31	85	8	299	0,2	0,46	652	14003	26,1	537	514	1131	132	1560
37	0,41	0,31	84	8	307	0,2	0,46	670	13786	26,1	528	529	1116	132	1570
38	0,42	0,30	83	8	314	0,2	0,46	688	13571	26,1	520	544	1102	132	1580
39	0,43	0,30	82	8	320	0,2	0,45	706	13356	26,1	512	559	1079	131	1589
40	0,44	0,29	81	8	327	0,2	0,45	724	13141	26,1	504	574	1064	131	1599
41	0,44	0,29	80	8	334	0,2	0,45	742	12927	26,1	495	589	1040	130	1608

% Ebat [%]	ENERGÍA NOMINAL BATERÍA [kWh]	ENERGÍA NOMINAL SC [kWh]	PESO BAT + SC [kg]	PESO BATERÍAS [kg]	COSTO BATERÍAS [\$]	DOD BATERÍAS [%]	TIEMPO DE VIDA BATERÍAS [años]	COSTO ANUAL DE BATERÍAS [\$/año]	COSTO SC [\$]	TIEMPO DE VIDA SC [años]	COSTO ANUAL DE SC [\$/año]	ENERGÍA ANUAL CONSUMIDA BATERÍA [kWh/año]	ENERGÍA ANUAL CONSUMIDA SC [kWh/año]	COSTO ANUAL DE ENERGÍA [\$/año]	COSTO TOTAL ANUAL [\$/año]
42	0,45	0,28	79	9	340	0,2	0,45	760	12713	26,1	487	604	1025	130	1618
43	0,46	0,28	78	9	347	0,2	0,45	778	12499	26,1	479	620	1004	130	1627
44	0,47	0,27	77	9	354	0,2	0,44	798	12282	26,1	471	637	990	130	1639
45	0,48	0,27	76	9	362	0,2	0,44	817	12065	26,1	462	654	961	129	1649
46	0,49	0,26	75	9	370	0,2	0,44	836	11849	26,1	454	670	948	130	1660
47	0,50	0,26	74	9	377	0,2	0,44	855	11632	26,1	446	687	935	130	1671
48	0,51	0,25	73	10	383	0,2	0,44	874	11419	26,1	438	703	907	129	1680
49	0,52	0,25	72	10	391	0,2	0,44	893	11202	26,1	429	720	893	129	1691
50	0,53	0,24	71	10	398	0,2	0,44	912	10986	26,1	421	736	880	129	1702
51	0,54	0,24	70	10	406	0,2	0,44	931	10771	26,1	413	753	867	130	1713
52	0,55	0,23	69	10	413	0,2	0,43	950	10555	26,1	405	770	838	129	1723
53	0,56	0,23	68	11	419	0,2	0,43	968	10343	26,1	396	785	825	129	1733
54	0,57	0,23	67	11	426	0,2	0,43	987	10128	26,1	388	801	812	129	1744
55	0,58	0,22	66	11	434	0,2	0,43	1006	9913	26,1	380	818	784	128	1754
56	0,59	0,22	65	11	441	0,2	0,43	1025	9698	26,1	372	835	770	128	1765
57	0,60	0,21	64	11	448	0,2	0,43	1044	9484	26,1	363	851	757	129	1776
58	0,61	0,21	63	11	455	0,2	0,43	1063	9270	26,1	355	867	729	128	1786
59	0,61	0,20	62	12	461	0,2	0,43	1081	9061	26,1	347	883	716	128	1796
60	0,62	0,20	61	12	468	0,2	0,43	1099	8848	26,1	339	899	703	128	1807
61	0,63	0,19	60	12	475	0,2	0,42	1118	8636	26,1	331	915	674	127	1816
62	0,64	0,19	59	12	482	0,2	0,42	1137	8425	26,1	323	932	662	127	1827
63	0,65	0,18	58	12	489	0,2	0,42	1156	8211	26,1	315	949	638	127	1838
64	0,66	0,18	57	13	498	0,2	0,42	1177	7991	26,1	306	969	615	127	1850
65	0,67	0,17	56	13	506	0,2	0,42	1198	7771	26,1	298	988	592	126	1862
66	0,68	0,17	55	13	511	0,2	0,42	1216	7563	26,1	290	1004	594	128	1874

% Ebat [%]	ENERGÍA NOMINAL BATERÍA [kWh]	ENERGÍA NOMINAL SC [kWh]	PESO BAT + SC [kg]	PESO BATERÍAS [kg]	COSTO BATERÍAS [\$]	DOD BATERÍAS [%]	TIEMPO DE VIDA BATERÍAS [años]	COSTO ANUAL DE BATERÍAS [\$/año]	COSTO SC [\$]	TIEMPO DE VIDA SC [años]	COSTO ANUAL DE SC [\$/año]	ENERGÍA ANUAL CONSUMIDA BATERÍA [kWh/año]	ENERGÍA ANUAL CONSUMIDA SC [kWh/año]	COSTO ANUAL DE ENERGÍA [\$/año]	COSTO TOTAL ANUAL [\$/año]
67	0,69	0,16	54	13	520	0,2	0,42	1237	7342	26,1	281	1023	570	127	1886
68	0,70	0,16	53	13	528	0,2	0,42	1258	7122	26,1	273	1043	547	127	1898
69	0,71	0,15	52	13	533	0,2	0,42	1276	6914	26,1	265	1059	524	127	1908
70	0,72	0,15	51	14	542	0,2	0,42	1297	6693	26,1	257	1078	501	126	1919
71	0,73	0,14	50	14	550	0,2	0,42	1317	6473	26,1	248	1097	503	128	1933
72	0,74	0,14	49	14	555	0,2	0,42	1335	6265	26,1	240	1113	479	127	1943
73	0,75	0,13	48	14	563	0,2	0,42	1356	6044	26,1	232	1132	456	127	1954
74	0,76	0,13	47	14	571	0,2	0,42	1376	5823	26,1	223	1151	434	127	1966
75	0,77	0,12	46	15	577	0,2	0,41	1394	5615	26,1	215	1167	411	126	1976
76	0,78	0,12	45	15	585	0,2	0,41	1415	5394	26,1	207	1185	412	128	1989
77	0,79	0,11	44	15	593	0,2	0,41	1435	5172	26,1	198	1204	390	128	2001
78	0,80	0,11	43	15	601	0,2	0,41	1455	4951	26,1	190	1223	367	127	2012
79	0,81	0,11	42	15	606	0,2	0,41	1473	4743	26,1	182	1239	344	127	2022
80	0,82	0,10	41	15	614	0,2	0,41	1494	4522	26,1	173	1257	321	126	2033
81	0,83	0,10	40	16	622	0,2	0,41	1514	4300	26,1	165	1276	323	128	2046
82	0,84	0,09	39	16	627	0,2	0,41	1532	4093	26,1	157	1291	300	127	2056
83	0,85	0,09	37	16	635	0,2	0,41	1552	3871	26,1	148	1310	277	127	2067
84	0,86	0,08	36	16	644	0,2	0,41	1574	3638	26,1	139	1332	244	126	2080
85	0,87	0,08	35	16	651	0,2	0,41	1594	3417	26,1	131	1351	246	128	2093
86	0,88	0,07	34	17	658	0,2	0,41	1614	3196	26,1	123	1369	213	127	2103
87	0,89	0,07	33	17	665	0,2	0,41	1634	2975	26,1	114	1388	214	128	2116
88	0,90	0,06	32	17	671	0,2	0,41	1654	2753	26,1	105	1407	181	127	2127
89	0,91	0,06	31	17	682	0,2	0,41	1678	2504	26,1	96	1432	183	129	2144
90	0,92	0,05	30	17	689	0,2	0,41	1698	2280	26,1	87	1451	150	128	2154
91	0,93	0,05	29	17	695	0,2	0,40	1718	2055	26,1	79	1469	118	127	2164

% Ebat [%]	ENERGÍA NOMINAL BATERÍA [kWh]	ENERGÍA NOMINAL SC [kWh]	PESO BAT + SC [kg]	PESO BATERÍAS [kg]	COSTO BATERÍAS [\$]	DOD BATERÍAS [%]	TIEMPO DE VIDA BATERÍAS [años]	COSTO ANUAL DE BATERÍAS [\$ /año]	COSTO SC [\$]	TIEMPO DE VIDA SC [años]	COSTO ANUAL DE SC [\$ /año]	ENERGÍA ANUAL CONSUMIDA BATERÍA [kWh/año]	ENERGÍA ANUAL CONSUMIDA SC [kWh/año]	COSTO ANUAL DE ENERGÍA [\$ /año]	COSTO TOTAL ANUAL [\$ /año]
92	0,94	0,04	28	18	702	0,2	0,40	1738	1829	26,1	70	1488	119	129	2177
93	0,95	0,04	27	18	709	0,2	0,40	1758	1602	26,1	61	1506	87	127	2187
94	0,95	0,03	26	18	716	0,2	0,40	1778	1375	26,1	53	1524	88	129	2199
95	0,97	0,03	25	18	726	0,2	0,40	1802	1127	26,1	43	1549	57	128	2213
96	0,98	0,02	23	18	733	0,2	0,40	1821	900	26,1	34	1568	57	130	2226
97	0,99	0,01	22	19	739	0,2	0,40	1841	672	26,1	26	1586	0	127	2234
98	0,99	0,01	21	19	746	0,2	0,40	1861	445	26,1	17	1604	0	128	2246

ANEXO 13. Tabla de resultados para la simulación con baterías de Litio y SC para un viaje de operación

% Ebat [%]	ENERGÍA NOMINAL BATERÍA [kWh]	ENERGÍA NOMINAL SC [kWh]	PESO BAT + SC [kg]	PESO BATERÍAS [kg]	COSTO BATERÍAS [\$]	DOD BATERÍAS [%]	TIEMPO DE VIDA BATERÍAS [años]	COSTO ANUAL DE BATERÍAS [\$/año]	COSTO SC [\$]	TIEMPO DE VIDA SC [años]	COSTO ANUAL DE SC [\$/año]	ENERGÍA ANUAL CONSUMIDA BATERÍA [kWh/año]	ENERGÍA ANUAL CONSUMIDA SC [kWh/año]	COSTO ANUAL DE ENERGÍA [\$/año]	COSTO TOTAL ANUAL [\$/año]
20	0,29	0,39	99	2	482	0,1	23,94	20	17468	26,1	669	270	1432	136	1066
21	0,30	0,38	98	2	500	0,1	23,49	21	17250	26,1	661	284	1412	136	1058
22	0,31	0,38	97	2	517	0,1	22,97	23	17032	26,1	653	297	1392	135	1050
23	0,32	0,37	96	2	534	0,1	22,47	24	16815	26,1	644	311	1373	135	1043
24	0,33	0,37	95	3	550	0,1	21,99	25	16597	26,1	636	324	1357	135	1036
25	0,34	0,36	94	3	567	0,1	21,54	26	16380	26,1	628	338	1338	134	1028
26	0,35	0,36	92	3	583	0,1	21,10	28	16163	26,1	619	351	1319	134	1021
27	0,36	0,35	91	3	598	0,1	20,69	29	15947	26,1	611	365	1303	133	1014
28	0,37	0,35	90	3	614	0,1	20,30	30	15730	26,1	603	378	1284	133	1006
29	0,38	0,34	89	3	632	0,1	20,07	31	15513	26,1	595	392	1260	132	998
30	0,39	0,34	88	3	650	0,1	19,87	33	15296	26,1	586	406	1245	132	991
31	0,40	0,34	87	3	668	0,1	19,67	34	15079	26,1	578	419	1230	132	984
32	0,41	0,33	86	3	686	0,1	19,48	35	14862	26,1	570	433	1207	131	976
33	0,42	0,33	85	3	704	0,1	19,29	37	14645	26,1	561	447	1192	131	969
34	0,43	0,32	83	3	722	0,1	19,10	38	14428	26,1	553	460	1168	130	961
35	0,44	0,32	82	3	739	0,1	18,92	39	14212	26,1	545	474	1153	130	954
36	0,45	0,31	81	3	757	0,1	18,75	40	13996	26,1	536	487	1139	130	947
37	0,46	0,31	80	4	774	0,1	18,58	42	13780	26,1	528	501	1115	129	939
38	0,47	0,30	79	4	791	0,1	18,41	43	13564	26,1	520	515	1100	129	932
39	0,48	0,30	78	4	808	0,1	18,25	44	13349	26,1	512	528	1076	128	924
40	0,50	0,29	77	4	827	0,1	18,16	46	13134	26,1	503	542	1062	128	917
41	0,51	0,29	76	4	843	0,1	18,00	47	12919	26,1	495	555	1047	128	910

% Ebat [%]	ENERGÍA NOMINAL BATERÍA [kWh]	ENERGÍA NOMINAL SC [kWh]	PESO BAT + SC [kg]	PESO BATERÍAS [kg]	COSTO BATERÍAS [\$]	DOD BATERÍAS [%]	TIEMPO DE VIDA BATERÍAS [años]	COSTO ANUAL DE BATERÍAS [\$/año]	COSTO SC [\$]	TIEMPO DE VIDA SC [años]	COSTO ANUAL DE SC [\$/año]	ENERGÍA ANUAL CONSUMIDA BATERÍA [kWh/año]	ENERGÍA ANUAL CONSUMIDA SC [kWh/año]	COSTO ANUAL DE ENERGÍA [\$/año]	COSTO TOTAL ANUAL [\$/año]
42	0,51	0,28	75	4	860	0,1	17,85	48	12705	26,1	487	569	1023	127	903
43	0,53	0,28	73	4	877	0,1	17,70	50	12491	26,1	479	583	1002	127	895
44	0,54	0,27	72	4	896	0,1	17,65	51	12274	26,1	470	597	989	127	888
45	0,55	0,27	71	4	915	0,1	17,59	52	12057	26,1	462	610	975	127	881
46	0,56	0,26	70	4	934	0,1	17,53	53	11840	26,1	454	624	947	126	873
47	0,57	0,26	69	4	949	0,1	17,35	55	11627	26,1	446	638	933	126	866
48	0,58	0,25	68	4	968	0,1	17,29	56	11410	26,1	437	652	920	126	859
49	0,59	0,25	67	5	986	0,1	17,24	57	11194	26,1	429	666	891	125	851
50	0,60	0,24	66	5	1005	0,1	17,18	58	10978	26,1	421	680	878	125	844
51	0,61	0,24	65	5	1023	0,1	17,13	60	10762	26,1	412	693	865	125	837
52	0,62	0,23	63	5	1038	0,1	16,96	61	10548	26,1	404	707	836	123	829
53	0,63	0,23	62	5	1056	0,1	16,91	62	10333	26,1	396	721	823	123	822
54	0,64	0,22	61	5	1074	0,1	16,85	64	10118	26,1	388	734	810	124	815
55	0,65	0,22	60	5	1093	0,1	16,80	65	9903	26,1	380	748	782	122	807
56	0,67	0,22	59	5	1111	0,1	16,74	66	9688	26,1	371	762	768	122	800
57	0,68	0,21	58	5	1128	0,1	16,69	68	9474	26,1	363	776	755	122	793
58	0,68	0,21	57	5	1143	0,1	16,54	69	9264	26,1	355	789	727	121	785
59	0,70	0,20	56	5	1161	0,1	16,49	70	9051	26,1	347	803	714	121	779
60	0,71	0,20	55	5	1178	0,1	16,43	72	8838	26,1	339	817	701	121	772
61	0,72	0,19	53	6	1196	0,1	16,38	73	8626	26,1	331	830	673	120	764
62	0,73	0,19	52	6	1214	0,1	16,32	74	8415	26,1	322	844	660	120	757
63	0,74	0,18	51	6	1231	0,2	16,26	76	8202	26,1	314	858	637	120	750
64	0,75	0,18	50	6	1251	0,2	16,26	77	7982	26,1	306	872	613	119	742
65	0,76	0,17	49	6	1270	0,2	16,26	78	7762	26,1	297	886	590	118	734
66	0,77	0,17	48	6	1284	0,2	16,12	80	7553	26,1	289	900	592	119	729

% Ebat [%]	ENERGÍA NOMINAL BATERÍA [kWh]	ENERGÍA NOMINAL SC [kWh]	PESO BAT + SC [kg]	PESO BATERÍAS [kg]	COSTO BATERÍAS [\$]	DOD BATERÍAS [%]	TIEMPO DE VIDA BATERÍAS [años]	COSTO ANUAL DE BATERÍAS [\$/año]	COSTO SC [\$]	TIEMPO DE VIDA SC [años]	COSTO ANUAL DE SC [\$/año]	ENERGÍA ANUAL CONSUMIDA BATERÍA [kWh/año]	ENERGÍA ANUAL CONSUMIDA SC [kWh/año]	COSTO ANUAL DE ENERGÍA [\$/año]	COSTO TOTAL ANUAL [\$/año]
67	0,78	0,16	47	6	1304	0,2	16,12	81	7333	26,1	281	914	569	119	721
68	0,79	0,16	46	6	1324	0,2	16,11	82	7113	26,1	273	929	546	118	713
69	0,80	0,15	45	6	1337	0,2	15,98	84	6905	26,1	265	942	523	117	705
70	0,81	0,15	43	6	1357	0,2	15,98	85	6685	26,1	256	956	500	116	698
71	0,82	0,14	42	6	1376	0,2	15,98	86	6464	26,1	248	970	502	118	692
72	0,83	0,14	41	6	1390	0,2	15,85	88	6256	26,1	240	984	479	117	684
73	0,84	0,13	40	6	1409	0,2	15,85	89	6036	26,1	231	998	456	116	677
74	0,86	0,13	39	7	1429	0,2	15,84	90	5815	26,1	223	1012	433	116	669
75	0,86	0,12	38	7	1442	0,2	15,72	92	5608	26,1	215	1026	410	115	662
76	0,88	0,12	37	7	1461	0,2	15,72	93	5387	26,1	206	1040	412	116	656
77	0,89	0,11	36	7	1480	0,2	15,71	94	5166	26,1	198	1054	389	115	648
78	0,90	0,11	34	7	1499	0,2	15,70	95	4944	26,1	189	1068	366	115	640
79	0,91	0,11	33	7	1513	0,2	15,59	97	4737	26,1	182	1081	344	114	633
80	0,92	0,10	32	7	1532	0,2	15,58	98	4516	26,1	173	1095	321	113	625
81	0,93	0,10	31	7	1550	0,2	15,57	100	4295	26,1	165	1109	323	115	619
82	0,94	0,09	30	7	1564	0,2	15,46	101	4088	26,1	157	1123	300	114	612
83	0,95	0,09	29	7	1583	0,2	15,46	102	3867	26,1	148	1137	277	113	604
84	0,96	0,08	28	7	1604	0,2	15,50	104	3633	26,1	139	1151	245	112	594
85	0,97	0,08	26	7	1620	0,2	15,44	105	3413	26,1	131	1165	246	113	589
86	0,98	0,07	25	8	1637	0,2	15,39	106	3193	26,1	122	1179	213	111	580
87	0,99	0,07	24	8	1653	0,2	15,33	108	2971	26,1	114	1193	214	113	574
88	1,00	0,06	23	8	1669	0,2	15,28	109	2749	26,1	105	1207	181	111	566
89	1,01	0,06	22	8	1693	0,2	15,37	110	2501	26,1	96	1222	183	112	558
90	1,02	0,05	21	8	1710	0,2	15,32	112	2277	26,1	87	1236	150	111	550
91	1,03	0,05	19	8	1726	0,2	15,26	113	2052	26,1	79	1250	118	109	541

% Ebat [%]	ENERGÍA NOMINAL BATERÍA [kWh]	ENERGÍA NOMINAL SC [kWh]	PESO BAT + SC [kg]	PESO BATERÍAS [kg]	COSTO BATERÍAS [\$]	DOD BATERÍAS [%]	TIEMPO DE VIDA BATERÍAS [años]	COSTO ANUAL DE BATERÍAS [\$ /año]	COSTO SC [\$]	TIEMPO DE VIDA SC [años]	COSTO ANUAL DE SC [\$ /año]	ENERGÍA ANUAL CONSUMIDA BATERÍA [kWh/año]	ENERGÍA ANUAL CONSUMIDA SC [kWh/año]	COSTO ANUAL DE ENERGÍA [\$ /año]	COSTO TOTAL ANUAL [\$/año]
92	1,04	0,04	18	8	1742	0,2	15,22	114	1826	26,1	70	1264	119	111	535
93	1,05	0,04	17	8	1758	0,2	15,17	116	1600	26,1	61	1278	87	109	526
94	1,06	0,03	16	8	1774	0,2	15,12	117	1373	26,1	53	1292	88	110	520
95	1,08	0,03	15	8	1798	0,2	15,20	118	1126	26,1	43	1307	57	109	511
96	1,09	0,02	13	8	1814	0,2	15,15	120	898	26,1	34	1320	56	110	504
97	1,10	0,01	12	8	1830	0,2	15,10	121	671	26,1	26	1334	0	107	494
98	1,11	0,01	11	9	1846	0,2	15,06	123	444	26,1	17	1348	0	108	487