

“Diseño de tren de propulsión en base a hidrógeno verde para vehículo de movimiento de tierra, con restricciones de espacio”

Joaquín Carreño

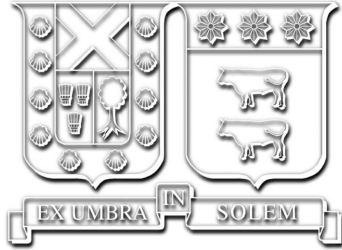
2023

Requisito parcial para obtener el título de:
Ingeniero Civil Electricista

Profesor Guía:
Dr. Patricio Valdivia (UTFSM)

Comisión:
Dr. Antonio Sánchez (UTFSM)
Ing. Ricardo Flores (UTFSM)

Santiago, 17 de enero de 2024.



“Diseño de tren de propulsión en base a hidrógeno verde para vehículo de movimiento de tierra, con restricciones de espacio”

Joaquín Carreño

2023

“Todo el esfuerzo es inútil, si no crees en ti mismo.”
— *M.G*

Índice de Contenidos

Índice de Contenidos	I
Índice de Figuras	III
Índice de Tablas	V
Resumen	1
1. Introducción	3
1.1. Motivación	3
1.2. Objetivos	5
1.3. Metodología	6
2. Estado del Arte	7
3. Topologías, operación y restricciones físicas del vehículo	12
3.1. Topologías existentes en la literatura	12
3.2. Características técnicas del vehículo	14
3.3. Cálculo de potencia del Motor original	16
3.3.1. Cálculo de la potencia de desplazamiento P_{desp}	17
3.3.2. Cálculo de la potencia del sistema hidráulico P_{hid}	18
3.4. Ciclo de trabajo 1: Pala cargadora en "V"	19
3.5. Ciclo de trabajo 2: Excavar trinchera	21
4. Metodología de diseño del tren de propulsión	23
4.1. Método de separación de frecuencia y rampa de FC	23
4.2. Elementos del tren de propulsión	26
4.2.1. Motor eléctrico	26
4.2.2. Tanque de Hidrógeno	26
4.2.3. Pila de combustible	27
4.2.4. Baterías	29
4.2.5. Supercapacitor	30
4.2.6. Convertidores e inversor	30
5. Optimización de espacios	33

6.	Resultados y análisis	38
6.0.1.	$FC + BAT$	39
6.0.2.	$FC + SC$	43
6.0.3.	$FC + BAT + SC$	46
6.1.	Resultados de la distribución de los componentes del tren de propulsión dentro del espacio utilizado	52
6.1.1.	Iteración con FC como primer objeto	53
6.1.2.	Iteración con SC como primer objeto	54
6.1.3.	Iteración con el inversor como primer objeto	55
6.1.4.	Iteración con el convertidor DC/DC como primer objeto	56
6.1.5.	Iteración con inductor como primer objeto	57
7.	Conclusiones	59
	Bibliografía	61

Índice de Figuras

3.1.	Topologías de las distintas configuraciones de powertrain posibles.	13
3.2.	Diagrama de Ragone. [1]	13
3.3.	Respuesta dinámica. [2]	14
3.4.	Tren de propulsión original del sistema desde una vista lateral. [3]	15
3.5.	Modelo para determinar el ciclo de potencia a partir del ciclo de conducción.	17
3.6.	Sistema hidráulico de las retroexcavadoras. [4]	18
3.7.	Modelo para determinar el ciclo de potencia del sistema hidráulico.	19
3.8.	Esquema del movimiento en "V" de la retroexcavadora. [5]	20
3.9.	Ciclo de conducción del desplazamiento en "V" de la retroexcavadora. [5]	20
3.10.	Ciclo de trabajo 1: Pala cargadora "V". [5]	21
3.11.	Movimiento de excavación de trinchera. [6]	21
3.12.	Ciclo de trabajo 2: Excavar trinchera. [4]	22
4.1.	Gestión de energía de frecuencia utilizando la rampa de la <i>FC</i>	24
4.2.	Proceso de iteración de la optimización de volumen.	25
4.3.	Motor Emrax 268. [7]	26
4.4.	Cilindro contenedor de Hidrógeno Iljin Hysolus. [8]	27
4.5.	Principio de funcionamiento de la <i>FC</i> . [9]	28
4.6.	Reacción de Oxido-reducción de la <i>FC</i> . [9]	29
4.7.	Inversor DTI HV-550AC.	31
5.1.	<i>Bounding box</i>	33
5.2.	Ilustración gráfica de la iteración de los objetos.	36
5.3.	Posibles posiciones o caras en las cuales puede existir un elemento.	37
6.1.	Evolución de la potencia del sistema utilizando la topología <i>FC</i> y <i>BAT</i> con el ciclo de trabajo 1: Pala cargadora en "V".	39
6.2.	Evolución de la energía del sistema utilizando la topología <i>FC</i> y <i>BAT</i> con el ciclo de trabajo 1: Pala cargadora en "V".	39
6.3.	Evolución de la energía de las baterías utilizando la topología <i>FC</i> y <i>BAT</i> con el ciclo de trabajo 1: Pala cargadora en "V".	40
6.4.	Evolución de la potencia del sistema utilizando la topología <i>FC</i> y <i>BAT</i> con el ciclo de trabajo 2: excavadora.	41
6.5.	Evolución de la energía del sistema utilizando la topología <i>FC</i> y <i>BAT</i> con el ciclo de trabajo 2: excavadora.	41
6.6.	Evolución de la energía de las baterías utilizando la topología <i>FC</i> y <i>BAT</i> con el ciclo de trabajo 2: excavadora.	42
6.7.	Evolución de la potencia del sistema utilizando la topología <i>FC</i> y <i>SC</i> con el ciclo de trabajo 1: Pala cargadora en "V".	43

6.8.	Evolución de la energía del sistema utilizando la topología <i>FC</i> y <i>SC</i> con el ciclo de trabajo 1: Pala cargadora en "V".	43
6.9.	Evolución de la energía de los supercapacitores utilizando la topología <i>FC</i> y <i>SC</i> con el ciclo de trabajo 1: Pala cargadora en "V".	44
6.10.	Evolución de la potencia del sistema utilizando la topología <i>FC</i> y <i>SC</i> con el ciclo de trabajo 2: excavadora.	44
6.11.	Evolución de la energía del sistema utilizando la topología <i>FC</i> y <i>SC</i> con el ciclo de trabajo 2: excavadora.	45
6.12.	Evolución de la energía de los supercapacitores utilizando la topología <i>FC</i> y <i>SC</i> con el ciclo de trabajo 2: excavadora.	45
6.13.	Evolución de la potencia del sistema utilizando la topología <i>FC</i> , <i>BAT</i> y <i>SC</i> con el ciclo de trabajo 1: Pala cargadora en "V".	46
6.14.	Evolución de la energía del sistema utilizando la topología <i>FC</i> , <i>BAT</i> y <i>SC</i> con el ciclo de trabajo 1: Pala cargadora en "V".	47
6.15.	Evolución de la energía de las baterías y supercapacitores utilizando la topología <i>FC</i> , <i>BAT</i> y <i>SC</i> con el ciclo de trabajo 1: Pala cargadora en "V".	47
6.16.	Evolución de la potencia del sistema utilizando la topología <i>FC</i> , <i>BAT</i> y <i>SC</i> con el ciclo de trabajo 2: excavadora.	48
6.17.	Evolución de la energía del sistema utilizando la topología <i>FC</i> , <i>BAT</i> y <i>SC</i> con el ciclo de trabajo 2: excavadora.	48
6.18.	Evolución de la energía de las baterías y supercapacitores utilizando la topología <i>FC</i> , <i>BAT</i> y <i>SC</i> con el ciclo de trabajo 2: excavadora.	49
6.19.	Ubicación de los tanques de hidrógeno en el techo del vehículo.	52
6.20.	Posicionamiento de los elementos del tren de propulsión cuando el primer elemento iterado es la <i>FC</i> desde distintas perspectivas.	53
6.21.	Posicionamiento de los elementos del tren de propulsión cuando el primer elemento iterado es el <i>SC</i> desde distintas perspectivas.	54
6.22.	Posicionamiento de los elementos del tren de propulsión cuando el primer elemento iterado es el inversor desde distintas perspectivas.	55
6.23.	Posicionamiento de los elementos del tren de propulsión cuando el primer elemento iterado es el convertidor <i>DC/DC</i> desde distintas perspectivas.	56
6.24.	Posicionamiento de los elementos del tren de propulsión cuando el primer elemento iterado es el inductor desde distintas perspectivas.	57

Índice de Tablas

3.1.	Características de la retroexcavadora.	14
3.2.	Características del motor.	16
3.3.	Características de los elementos relacionados al motor. [3]	16
4.1.	Especificaciones técnicas del motor. [7]	26
4.2.	Especificaciones técnicas del cilindro contenedor de hidrógeno. [8]	27
4.3.	Diversas opciones de <i>FC</i> disponibles en el mercado.	29
4.4.	Distintas opciones de <i>BAT</i> disponibles en el mercado.	30
4.5.	Distintas opciones de <i>SC</i> disponibles en el mercado.	30
4.6.	Especificaciones técnica del inversor. [10]	31
4.7.	Resumen de las distintas opciones de los elementos del tren de propulsión.	32
6.1.	Resultados del Ciclo de trabajo 1: Pala cargadora en "V".	38
6.2.	Resultados del Ciclo de trabajo 2: excavadora.	38
6.3.	Resultado de las simulaciones con la topología <i>FC</i> y <i>BAT</i>	42
6.4.	Resultado de las simulaciones con la topología <i>FC</i> y <i>SC</i>	46
6.5.	Resultado de las simulaciones con la topología <i>FC</i> , <i>BAT</i> y <i>SC</i>	49
6.6.	Balance de masa y volumen del tren de propulsión.	51
6.7.	Resultados de la distribución de los componentes.	52

Nomenclatura.

FC	: Pila de combustible, viene de su nombre en ingles Fuell Cell.
SC	: Supercapacitor.
BAT	: Batería.
CdT	: Ciclo de Trabajo.
CdC	: Ciclo de Conducción.
m	: Corresponde a la masa.
g	: Constante de Gravedad.
H_2	: Hidrógeno.
VOL	: Corresponde al Volumen.
C_d	: Coeficiente de roce de giro.
C_r	: Coeficiente de resistencia de arrastre.
ρ	: Densidad del aire.
v	: Velocidad de conducción.
α	: Ángulo de inclinación del vehículo.
P_{peak}	: Máxima potencia alcanzada.
$Rate_{fc}$	: Rampa de potencia máxima de la FC .
f_c	: Frecuencia especifica de la BAT .
GEI	: Gases de efecto invernadero.

Resumen

El cambio climático, resultado de las emisiones de gases de efecto invernadero, es una de las problemáticas más apremiantes en la actualidad. Por esta razón, es crucial abordarlo desde todos los ámbitos posibles. El sector automotriz, uno de los principales contribuyentes a esta situación, no puede quedar al margen de esta responsabilidad. En este contexto, diversas entidades gubernamentales han emprendido esfuerzos para incentivar la electromovilidad. Por ejemplo, en Chile, a partir de 2035, se ha establecido la prohibición de la venta de vehículos de combustión interna. No obstante, estos esfuerzos se han centrado principalmente en los vehículos de pasajeros, pasando por alto los vehículos off-road debido a su menor cantidad en comparación. Sin embargo, es esencial incluirlos en la transición hacia la electromovilidad debido a la contaminación que generan. El objetivo principal de este trabajo es la reconversión de una retroexcavadora Diesel a una versión eléctrica, pero con proyección de escalamiento a máquinas de mayor potencia, como los camiones mineros que transportan grandes cantidades de material (CAEX).

En este proyecto, se busca diseñar el tren de propulsión de una retroexcavadora modelo Komatsu WB146-5 para que funcione principalmente con pilas de combustible alimentadas de hidrógeno. Esto se debe a que el uso de otros tipos de hidrógeno, como el gris o el azul, desvían el trabajo del objetivo principal, que es la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero. Dado que el espacio disponible para acomodar los distintos componentes es limitado, es imperativo optimizar el volumen del tren de propulsión, asegurando que todos los componentes que lo componen quepan dentro del espacio original del vehículo. Después de una cuidadosa selección de los componentes del tren de propulsión, se procedió a realizar una segunda optimización, enfocada en la reducción del volumen de la caja envolvente (bounding box) que engloba todos sus elementos. Este enfoque se llevó a cabo con el fin de minimizar el espacio requerido y cumplir con la restricción de que todos los elementos estén contenidos dentro del espacio original del vehículo.

La primera etapa de optimización se basó en la comparación de dos ciclos de trabajo diferentes para determinar cuál configuración minimizaba el volumen total. Se evaluaron distintas opciones de pilas de combustible (FC), baterías (BAT) y supercapacitores (SC) disponibles en el mercado. Entre las configuraciones posibles, se consideraron tres topologías distintas: $FC + BAT$, $FC + SC$ y $FC + BAT + SC$. Los resultados indicaron que la topología que ocupaba menos volumen era la que combinaba pilas de combustible y supercapacitores ($FC + SC$).

El tren de propulsión finalmente quedó compuesto por los siguientes elementos: un motor Emrax 268, un inversor DTI HV-550AC, dos tanques de hidrógeno Iljin Hysolus de 115 litros cada uno, una pila de combustible Toyota Gen 2 Horizontal, cuatro supercapacitores LSMtron 066F EA DC, dos inductores y un convertidor DC/DC para los SC . Esta

configuración resultó en un nuevo tren de propulsión con una masa de 546 kilogramos y un volumen de 0,869 metros cúbicos, por lo que es un 6,47 % más ligera y ocupa un 48,29 % más volumen que el tren de propulsión original.

Palabras Claves: Vehículos off-road, Retroexcavadora, Tren de propulsión, Hidrógeno verde, pila de combustible, baterías, supercapacitores, Optimización de volumen, bounding box, algoritmos voraces.

Capítulo 1

Introducción

1.1. Motivación

Cada vez es más común presenciar récords de altas temperaturas en lugares como Italia, donde se registraron 47°C [11], o en China, con 52°C [12]. Esto se debe a varios factores, pero el principal corresponde al cambio climático. En el artículo resumen del informe del Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC) [13], se señala que ya existen daños generalizados e irreversibles. Además, se menciona que “las reducciones profundas, rápidas y sostenidas de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) conducirían a una desaceleración perceptible del calentamiento global en unas dos décadas”. Por lo tanto, urge una disminución de las emisiones de GEI lo antes posible.

Chile, a través del Ministerio de Medio Ambiente, actualizó su Contribución Determinada a Nivel Nacional (NDC) y se compromete a mantener un presupuesto de emisiones de GEI que no supere las $1.100 \text{ [MtCO}_2\text{eq]}$ entre 2020 y 2030, con un máximo de emisiones (*peak*) de GEI en 2025 y a alcanzar un nivel de emisiones de GEI de $95 \text{ [MtCO}_2\text{eq]}$ en 2030 [14]. Además, se propone una reducción de al menos el 25 % de las emisiones totales de carbono negro para 2030 en comparación con 2016.

El 13 % de las partículas contaminantes son causadas por el transporte por carretera [15]. Según la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA), un automóvil de pasajeros diésel emite $2,69 \text{ [kg CO}_2\text{/L]}$ [16]. En cambio, una retroexcavadora con una potencia de 73 [kW] emite $2,64 \text{ [kg CO}_2\text{/L]}$ [17]. En 2020, se vendieron 89.894 vehículos de pasajeros en el país [18], y se importaron 226 retroexcavadoras [19]. Esto significa que, en conjunto, los automóviles nuevos generaron $242.000 \text{ [kg CO}_2\text{/L]}$ y las retroexcavadoras, $597 \text{ [kg CO}_2\text{/L]}$. Los automóviles de pasajeros consumen $0,64 \text{ [L/h]}$ [20], y un adulto maneja en promedio 11,7 horas a la semana [21], lo que resulta en la emisión de 1.822 toneladas de CO_2 en una semana. En cambio, las retroexcavadoras consumen $6,46 \text{ [L/h]}$ [22], y asumiendo que se utilizan durante 45 horas a la semana, equivalentes a una jornada laboral, generarían 254 toneladas de CO_2 . Esto representa el 13,94 % de las emisiones de los automóviles de pasajeros, esto es aun peor si se utiliza un sistema de turnos. Este porcentaje no es despreciable, por lo que es necesario reducir la contaminación de las retroexcavadoras, y una solución es reconvertirlas en vehículos eléctricos que funcionen con hidrógeno para no emitir CO_2 .

Es pertinente considerar la electromovilidad basada en hidrógeno, ya que “la estrategia

Nacional de hidrógeno verde pretende posicionar a Chile como uno de los principales exportadores del mundo para 2040” [23]. Además, el Banco Mundial otorgó un préstamo de 150 millones de dólares para proyectos de hidrógeno verde [24], marcando la primera vez que esta institución realiza un préstamo para este fin. La Unión Europea lanzó dos iniciativas de cooperación con Chile, con un valor de 225 millones de dólares, destinados a proyectos relacionados con el hidrógeno verde [25]. Esto demuestra un fuerte interés en la producción de hidrógeno verde en Chile, y es atractivo aprovechar esta oportunidad económica.

Al momento de llevar a cabo la conversión de un vehículo Diesel a eléctrico, se presenta el desafío de incorporar el nuevo tren de propulsión en el vehículo. Esto puede requerir utilizar el espacio original del sistema de propulsión o, en casos extremos, sacrificar espacios como asientos de pasajeros o el maletero del vehículo para acomodar todos los componentes necesarios. En el caso de vehículos de carga de tamaño mediano y grande, existe una relación que establece que, a medida que aumenta el tamaño de las ruedas, se dispone de más espacio para realizar la conversión. Esto se debe a que los componentes del nuevo tren de propulsión pueden ubicarse en las barandillas laterales o detrás de la cabina del vehículo [26]. Sin embargo, en el caso de retroexcavadoras, no cuentan con estos espacios adicionales, lo que significa que el único lugar disponible para alojar los nuevos elementos es el espacio original del sistema de propulsión. Por lo tanto, resulta crítico tener en cuenta las restricciones de espacio de la retroexcavadora para garantizar que todos los componentes del nuevo tren de propulsión puedan ser instalados adecuadamente en el vehículo.

La conversión de la retroexcavadora se debería escalar a otros tipos de vehículos utilizados en la industria minera como grúas, cargadores, camiones mineros, entre otros. Esto porque la ICMM en su convenio de emisiones cero al 2050, establece el objetivo de acelerar la adopción de vehículos mineros cero emisiones [27].

Este estudio podría ser el punto de partida para convertir otros tipos de vehículos como buses, tractores, camiones de basura, entre otros. Porque la metodología del diseño del tren de propulsión es la misma independiente de las características de la operación de cada vehículo.

1.2. Objetivos

Objetivo General: Diseñar y dimensionar un tren de propulsión en base a hidrógeno verde para un cargador frontal y retro, optimizando el espacio disponible.

Objetivos Específicos:

- Estudiar la operación y restricciones físicas del vehículo de movimiento de tierra para poder realizar un modelo simple de la potencia y energía del tren de propulsión de este.
- Definir los dispositivos disponibles en el mercado para la conversión del tren de propulsión.
- Diseñar nuevo tren de propulsión en base a hidrógeno verde a partir de los dispositivos previamente definidos y comprobar diseño mediante simulación del ciclo de trabajo.
- Optimizar el tren de propulsión en base a hidrógeno verde diseñado, considerando las restricciones técnicas previamente establecidas.

1.3. Metodología

El objetivo principal de este trabajo es dimensionar el tren de propulsión para una retroexcavadora, optimizando el espacio disponible. El modelo seleccionado para este estudio es la retroexcavadora Komatsu WB146-5, que cuenta con una potencia de 69 [kW]. La intención es reemplazar el motor y todos los componentes relacionados por un nuevo sistema de propulsión eléctrico basado principalmente, en hidrógeno, además de mantener las prestaciones originales del vehículo para así mantener su funcionalidad.

Para cumplir con este objetivo, en el Capítulo 2 se proporciona una descripción del estado del arte, examinando las diferentes topologías de trenes de propulsión que se encuentran en la literatura. También se detallan las técnicas de optimización empleadas para acomodar los elementos en el espacio disponible.

El Capítulo 3 presenta las diversas topologías posibles del tren de propulsión, que incluyen $FC + BAT$, $FC + SC$ y $FC + BAT + SC$. Se analizan las características de la máquina, el motor diésel y las restricciones físicas. Además, se expone una metodología para calcular ciclos de trabajo basados en ciclos de conducción y perfiles de presiones y caudales del sistema hidráulico. El capítulo concluye con la presentación de dos ciclos de trabajo, uno para operaciones de carga frontal y otro para excavación, que serán evaluados para dimensionar el tren de propulsión.

Una vez definido las características de la máquina y los ciclos de trabajo, en el Capítulo 4 se describe la metodología de optimización que se utiliza para seleccionar los componentes del nuevo sistema de propulsión. La función principal es minimizar el volumen de estos elementos. Además, se selecciona el motor, el inversor y el tanque de hidrógeno, junto con una lista de opciones disponibles en el mercado para FC , BAT y SC .

Más adelante, en el capítulo 5, se muestra a la técnica de optimización del espacio, cuyo objetivo es asegurar que todos los nuevos componentes encajen en el volumen original ocupado por el motor de combustión interna y sus componentes relacionados.

Finalmente, en el Capítulo 6, se presentan los resultados de las metodologías mencionadas con respecto al tren de propulsión seleccionado y su ubicación tridimensional. Esto en conjunto con sus respectivos análisis y discusiones sobre los resultados obtenidos, y el Capítulo 7 concluye la memoria y resume el trabajo realizado.

Capítulo 2

Estado del Arte

En la literatura, se encuentra información sobre los trenes de propulsión para vehículos eléctricos, la mayoría de los cuales están diseñados para vehículos ligeros. Aunque la información sobre vehículos fuera de carretera (Off-road) es menos común, es relevante destacar que los diseños disponibles para este tipo de transporte son similares a los de sus contrapartes más livianas.

En el trabajo realizado por Bordons et al. [28], se utilizó un automóvil tipo SUV híbrido con una configuración de $FC + BAT$ para el tren de propulsión. El enfoque principal fue el control del sistema de energía para alimentar el motor eléctrico del vehículo, utilizando un modelo de control predictivo para minimizar la energía total en presencia de las dificultades de la conducción, empleando el ciclo de conducción europeo. Se mostraron resultados positivos en la potencia demandada de las fuentes de almacenamiento, haciendo viable esta combinación de fuentes de energía para un vehículo.

Por otra parte, en Thounthong et al. [29], se empleó un tren de propulsión con una topología $FC + SC$. La FC fue la principal fuente de energía, trabajando de forma casi uniforme, mientras que los SC se encargaron de los transitorios de potencia. Para los convertidores DC/DC de la FC , se utilizó un convertidor tipo *boost* para elevar la tensión de la pila de combustible. En cambio, para los supercapacitores se utilizó un convertidor de 4 cuadrantes capaz de entregar y recibir potencia. Se implementó un control de estructura híbrida, utilizando la tensión de los SC como referencia. Los experimentos entregaron resultados destacables en el rendimiento del sistema híbrido de potencia en un ambiente controlado, haciendo esta topología también viable para la reconversión de vehículos a hidrógeno.

Existe una tercera topología que consiste en $FC + BAT + SC$, utilizada en Snoussi et al. [30]. Este trabajo se centra en la optimización del tren de propulsión, minimizando su masa. Se utilizan filtros pasa-bajos con frecuencias específicas para cada componente, basadas en la densidad de potencia y energía de cada elemento. A través de un ciclo de trabajo y a con el método de optimización de lobo gris, se logra una solución óptima en términos de masa. Sin embargo, el trabajo ignora completamente el volumen y la ubicación de los componentes del tren de propulsión.

Otros estudios comparativos de las distintas topologías incluyen el trabajo de Thounthong et al. [31], que destaca las ventajas de un vehículo híbrido de celdas de combustible. Este estudio se enfoca en el papel de los dispositivos de almacenamiento de energía, mostrando

mejoras en el rendimiento del vehículo y la eficiencia del combustible. Aunque la combinación $FC + SC$ presenta un rendimiento superior, se señala que un vehículo FC híbrido con supercapacitores como única fuente de energía puede experimentar deficiencias durante el arranque debido al tiempo de este al uso de celda de combustible PEM, siendo la batería más adecuada en este contexto. Se propone una solución más práctica en forma de una fuente de energía híbrida $FC + BAT + SC$ para aumentar la vida útil de la batería al reducir las cargas y descargas de alta corriente.

En la literatura, además de comparar distintas topologías, se encuentra documentación sobre el diseño y análisis de trenes de propulsión. En el trabajo de Feroldi et al. [32], se aborda el estudio de sistemas híbridos de celdas de combustible para aplicaciones automotrices. Se destaca la ventaja de la hibridación con supercapacitores en sistemas basados en celdas de combustible (FC), utilizando el simulador *Advanced Vehicle Simulator* (ADVISOR) para determinar la topología eléctrica y el grado de hibridación (HD) según las condiciones de conducción. Se evidencia una mejora significativa en la economía de hidrógeno mediante la recuperación de energía de frenado. Aunque se señala un conflicto entre el diseño para condiciones de conducción y el diseño para la máxima eficiencia, la hibridación con SC en vehículos basados en FC mejora significativamente el rendimiento, siendo la opción técnica más viable.

Otro ejemplo de diseño óptimo de vehículos con celda de combustible se puede apreciar en Han et al. [33], donde se aborda el creciente interés en las celdas de combustible como fuente de energía viable para automóviles. Se presenta un modelo de análisis y optimización de diseño para vehículos de celdas de combustible, aplicable tanto a vehículos híbridos como no híbridos mediante la integración de un simulador de vehículos de celdas de combustible con un modelo físico de celdas de combustible. La optimización del sistema mejora la eficiencia global del vehículo híbrido en un 14 %, sin violar restricciones. Se destaca el desarrollo de un modelo de simulación del vehículo para lograr una fidelidad y eficiencia suficientes en la optimización del diseño, demostrando mejoras significativas en eficiencia sin sacrificar precisión.

En el trabajo elaborado por Park et al. [34], se presenta un observador de modo deslizante aplicado a un motor de inducción en vehículos eléctricos de celda de combustible. Este observador es crucial para la estimación precisa del flujo del rotor y la optimización del rendimiento del sistema. El diseño del observador se establece específicamente para vehículos eléctricos bajo carga variable, utilizando procedimientos de modo deslizante que permiten estimar tanto la velocidad del vehículo como el flujo del rotor del motor. Las simulaciones demuestran la eficacia del observador de modo deslizante al cumplir con los requisitos del ciclo de conducción urbana SAE de ciclo B, ofreciendo perspectivas valiosas para mejorar la precisión y eficiencia en la estimación del sistema en vehículos eléctricos de celda de combustible.

Thounthong et al. [35] se centra en un sistema híbrido de energía para vehículos eléctricos que combina una pila de combustible y una batería. Se presenta una estrategia de control utilizada para gestionar la potencia de la pila de combustible, la potencia al motor y el estado de carga de la batería. Los resultados experimentales indican que el sistema híbrido de pila de combustible/batería puede funcionar de manera efectiva para satisfacer la demanda de un vehículo eléctrico, demostrando un rendimiento sobresaliente. Se destaca un método innovador para el funcionamiento de esta fuente de energía híbrida, basado en la estrategia de control que utiliza la pila de combustible para suministrar energía tanto

a la carga como a la batería.

Con toda la documentación mostrada hasta ahora, es factible la reconversión de vehículos para que funcionen en base de hidrógeno. Solamente hace falta una segunda fuente de almacenamiento que puede ser batería o supercapacitores. Cada fuente tiene sus ventajas y desventajas y se puede aproximar de formas diferentes. Para abordar los problemas de volúmenes y formas de optimizar el espacio disponible, se tiene la siguiente documentación.

En la publicación de Maarouf et al. [36], se aborda el problema *NP-hard* (Nondeterministic Polynomial-time hard) clásico de empaquetamiento tridimensional (*3D bin packing*). Se presenta un nuevo algoritmo heurístico denominado "*Peak Filling Slice Push*" (PFSP) para el *3D bin packing*. Este algoritmo divide recursivamente el contenedor en compartimientos más pequeños, llenándolos antes de empujarlas para minimizar el espacio desperdiciado. Los resultados experimentales revelan mejoras significativas en el rendimiento en comparación con otros enfoques actuales. Aunque presenta limitaciones, como la incapacidad para cargar contenedores balanceados en términos de peso, su aplicación práctica en el llenado de volúmenes pequeños con cajas de diferentes tamaños sugiere un potencial ahorro de tiempo y dinero en diversas industrias. Se proyecta un trabajo futuro para mejorar el algoritmo, incorporando capacidades como la rotación de las cajas para mayor eficiencia y la implementación de diferentes ratios para dividir sub-compartimientos y lograr un empaquetado equilibrado, con la expectativa de aumentar el rendimiento y la eficiencia del algoritmo.

Otra forma de abordar el problema de *3D bin packing* se ve en Erbayrak et al. [37], donde se extiende el 3D-BPP equilibrado mediante la combinación de orientación y estabilidad, e introduce el concepto de "unidad familiar" para fomentar el empaquetado de una familia de productos. Se propone un modelo de programación mixta entera multiobjetivo para determinar el plan de empaquetado óptimo, minimizando el número de contenedores utilizados, la desviación del equilibrio desde el bariócentro ideal y maximizando la proporción de unidad familiar. En el trabajo se proporciono un ejemplo numérico para analizar el rendimiento del modelo propuesto, mostrando ventajas prácticas al incluir la unidad familiar y consideraciones de equilibrio de carga.

Otras técnicas, como las voraces, se estudian en Brassard et al. [38], destacando su simplicidad, facilidad de implementación, aparte son eficientes y fáciles de crear, su aplicabilidad se ve limitada en problemas más complejos. El trabajo se centra en un ejemplo cotidiano de algoritmo voraz que es el problema de dar cambio utilizando monedas de diferentes denominaciones. Este algoritmo voraz selecciona la moneda de mayor valor en cada paso sin reconsiderar sus decisiones, y se demuestra que es eficaz para resolver este problema particular. Se discuten las características generales de los algoritmos voraces y se destaca la posibilidad de relajar la condición de finitud del conjunto de candidatos en función de la eficiencia del algoritmo.

En este trabajo de Hu et al. [39] propone un nuevo enfoque para el problema tridimensional de empaquetamiento de contenedores (*3D bin packing*), donde objetos en forma de cubo deben colocarse en un contenedor de manera ortogonal con el objetivo de minimizar el área superficial del mismo. La complejidad radica en la ausencia de contenedores de tamaño fijo en escenarios comerciales reales, donde el costo del contenedor está directamente relacionado con su área superficial. La investigación demuestra la naturaleza *NP-hard* del problema y aborda esta dificultad aplicando un método basado en el aprendizaje profundo por refuerzo (DRL), específicamente la red Pointer, para optimizar la secuencia

de empaquetado. Los resultados numéricos destacan una mejora del 5 % en comparación con métodos heurísticos. El problema clásico de empaquetamiento de contenedores (BPP) es esencial en sistemas logísticos y de producción, siendo la variante más significativa y desafiante el 3D BPP.

Zhao et al. [40] aborda una variante del Problema de Empaquetamiento Tridimensional (3D-BPP). En esta versión, el agente tiene información limitada sobre los elementos a empaquetar en un solo contenedor, y un elemento debe colocarse inmediatamente después de su llegada sin posibilidad de almacenamiento intermedio ni ajustes. La disposición de los elementos está sujeta a restricciones de dependencia de orden y estabilidad física. Se formulo este 3D-BPP en línea como un proceso de decisión de Markov restringido (CMDP). Para resolver el problema, se propone un método efectivo y sencillo de implementar de aprendizaje profundo por refuerzo restringido (DRL) bajo el marco actor-crítico. Es introducido un esquema de predicción y proyección, donde el agente predice inicialmente una máscara de viabilidad para las acciones de ubicación y luego la utiliza para modular las probabilidades de acción durante el entrenamiento. Este método supera significativamente a los métodos de vanguardia, demostrando eficacia en la optimización de políticas frente a restricciones complejas. Este enfoque puede extenderse para abordar elementos anticipados, empaquetado en múltiples contenedores y reorientación de elementos. La evaluación extensa revela un rendimiento destacado, respaldado incluso por un estudio preliminar que sugiere un rendimiento a nivel humano. En conclusión, se ha abordado con éxito el 3D-BPP en línea mediante la formulación como CMDP y su resolución mediante DRL restringido, destacando la aplicabilidad.

Se presenta otro enfoque en la resolución del Problema de Empaquetamiento Tridimensional (3D-BPP) en Castro Silva et al. [41], considerando la estabilidad física del empaquetado. La propuesta consiste en un metodo heurístico de búsqueda codiciosa que aborda la complejidad *NP-hard* del problema, buscando minimizar tanto el número de contenedores como garantizar la estabilidad física de la disposición de los elementos. Los experimentos computacionales comparan los resultados obtenidos con el heurístico de Martello, Pisinger y Vigo (2000), evidenciando la eficacia de la nueva metodología. El BPP, fundamental en la optimización combinatoria y *NP-hard* según Garey y Johnson (1979), encuentra su extensión en el 3D-BPP, donde la estabilidad física de la disposición de los elementos cobra una relevancia adicional. A diferencia de enfoques anteriores que asumían el empaquetado por capas, el algoritmo propuesto flexibiliza esta restricción. Dividido en dos fases, establece una política de empaquetado y evalúa la estabilidad física, demostrando su viabilidad en experimentos computacionales. Los resultados sugieren que GS-3D-BPP puede representar una alternativa prometedora, abriendo oportunidades para futuras investigaciones en estabilidad dinámica y factores externos que influyan en el empaquetado.

En Benell et al. [42] se aborda el problema tridimensional de corte y empaquetado, con especial relevancia para la logística de carga en problemas de carga de contenedores. Se observa un aumento significativo en el número de estudios relacionados con variantes del problema de carga de contenedores, desde enfoques teóricos hasta implementaciones que se centran en cumplir múltiples restricciones del mundo real. La revisión literaria se enfoca en las metodologías de solución utilizadas por los investigadores, proporcionando información valiosa sobre aspectos críticos del diseño algorítmico. Además, se realiza una extensa comparación del rendimiento de los algoritmos a lo largo de la literatura de referencia. El problema tridimensional de empaquetado es una generalización natural de los problemas clásicos de una y dos dimensiones, destacándose en aplicaciones como el

transporte de mercancías en contenedores, camiones o pallets. A pesar de sus importantes aplicaciones industriales y comerciales, históricamente, hay relativamente pocos trabajos publicados en comparación con sus contrapartes de una y dos dimensiones. Sin embargo, en años recientes, se ha observado un crecimiento rápido en la investigación y publicaciones sobre este problema, explorando nuevas direcciones que integran el empaquetado con enrutamiento y programación. Este artículo revisa la literatura sobre el empaquetado en contenedores tridimensionales, centrándose en el diseño e implementación de metodologías de solución y proporcionando una comparación experimental del rendimiento de diferentes algoritmos en conjuntos de datos de referencia. La revisión destaca áreas de investigación potencialmente fructíferas, como la escasez de estudios sobre el problema de empaquetado en múltiples contenedores y la necesidad de conjuntos de datos realistas y desafiantes para impulsar la investigación en esta área.

Lazarević et al. [43] aborda la aplicación de modelado geométrico para mejorar la eficiencia en la utilización del espacio de carga de vehículos mediante la resolución del Problema de Empaquetado 3D. La implementación de este concepto resulta en la formación de un modelo tridimensional del plan de empaquetado, logrando compactar la carga y maximizar el uso del espacio. Se demuestra su aplicabilidad en el transporte de paquetes en una empresa de envío de artículos postales, donde la resolución del Problema de Empaquetado 3D genera resultados significativos debido a la naturaleza estocástica de los requisitos de transporte. La eficiente utilización del espacio de carga contribuye a mejorar la realización de actividades comerciales y reducir costos. Se destaca la importancia de la optimización en los sistemas de transporte modernos, especialmente en el contexto de la red postal, que enfrenta desafíos logísticos significativos debido a la diversidad en plazos y estructuras de bienes transportados. Se identifican problemas específicos en el proceso de envío de paquetes exprés, especialmente relacionados con el aumento de paquetes no estandarizados en el sistema postal. Se aborda la ineficiente utilización del espacio de carga debido a la dificultad de empaquetar estos paquetes no estándar, lo que puede resultar en entregas retrasadas o costos adicionales. La aplicación de este concepto, respaldada por el software EasyCargo, demuestra la capacidad de generar soluciones compactas y eficientes para el empaquetado tridimensional, lo cual es crucial para el éxito continuo de los servicios postales y la optimización de las actividades comerciales.

Capítulo 3

Topologías, operación y restricciones físicas del vehículo

3.1. Topologías existentes en la literatura

Para llevar a cabo la conversión del tren de propulsión de un sistema basado en combustión interna a uno impulsado por hidrógeno, es necesario reemplazar el motor de combustión interna por un motor eléctrico con características de torque, velocidad y potencia iguales o superiores. En la literatura y la industria existen 3 formas principales de alimentar un vehículo eléctrico, las cuales son baterías, supercapacitores e hidrógeno a partir de pilas de combustible. Este trabajo se centra en evaluar la viabilidad de utilizar el hidrógeno como fuente principal de energía para alimentar la retroexcavadora. Dentro de la literatura, se han propuesto tres combinaciones principales para alimentar un vehículo eléctrico: $FC + BAT$, $FC + SC$, y $FC + BAT + SC$ [44], [45], [46].

Cada fuente de alimentación requiere su propio convertidor DC/DC para controlar su energía y asegurar que trabajen a la misma tensión en la salida, lo que permite su acoplamiento en un bus DC , aunque hay casos en que se ocupa un único convertidor DC/DC para todas las fuentes de alimentación, pero estos suelen ser más costosos y difíciles de implementar. Por otra parte, estos convertidores tienen que ser no acoplados porque esto ocupan menos volumen que su contraparte acoplada. Dado que generalmente se utilizan motores trifásicos para este tipo de aplicaciones, es necesario un inversor para convertir de tensión DC a AC y, al mismo tiempo, controlar el motor. Junto a cada convertidor, se deben instalar filtros que se hagan cargo de filtrar los armónicos indeseados de la corriente para mejorar la calidad de esta. Las diferentes topologías se ilustran en la Figura 3.1.

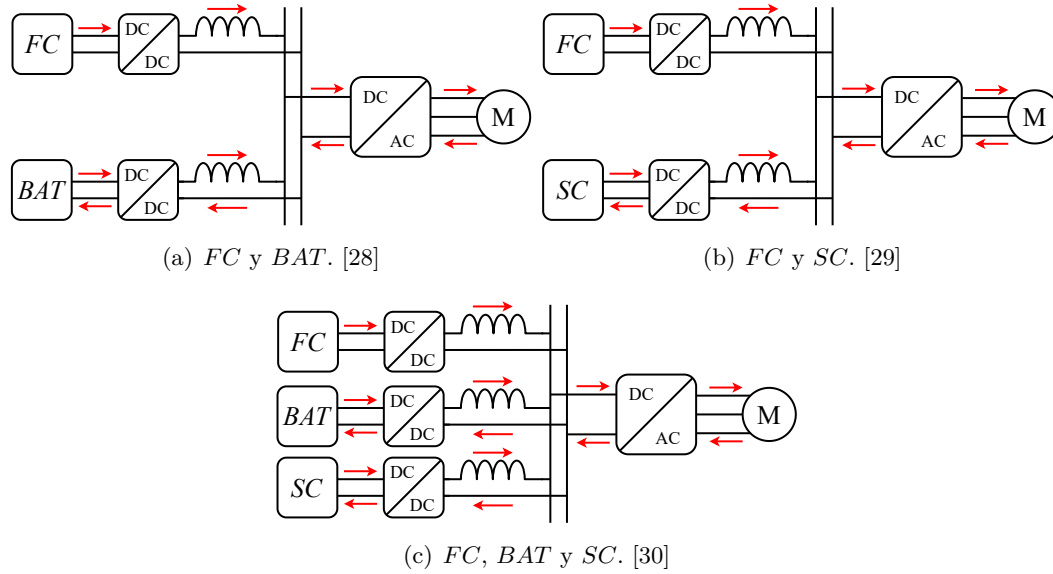


Figura 3.1: Topologías de las distintas configuraciones de powertrain posibles.

En la Figura 3.1, las flechas rojas representan el flujo de potencia y energía en cada topología. Es importante destacar que la única fuente de alimentación que no puede regenerar energía es la *FC*, lo que significa que todos los otros convertidores deben tener la capacidad de regenerar potencia, ya sea del motor o de otras fuentes de energía con dinámicas más lentas, como en el caso de la *FC*.

Una razón fundamental para utilizar más de una fuente de alimentación es que cada una tiene una densidad de potencia y energía específica, como se muestra en el diagrama de Ragone de la Figura 3.2. Esto es esencial para dimensionar adecuadamente el nuevo tren de propulsión en función de la potencia y la energía requeridas en los ciclos de trabajo que se analizarán. Además, cada componente tiene un comportamiento dinámico diferente, siendo los *SC* los más rápidos, seguidos por las *BAT* y, finalmente, las *FC* con la dinámica más lenta, como se muestra en la Figura 3.3.

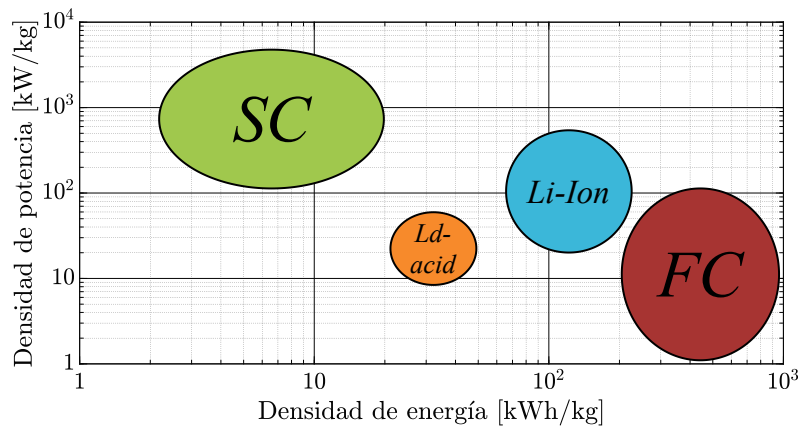


Figura 3.2: Diagrama de Ragone. [1]

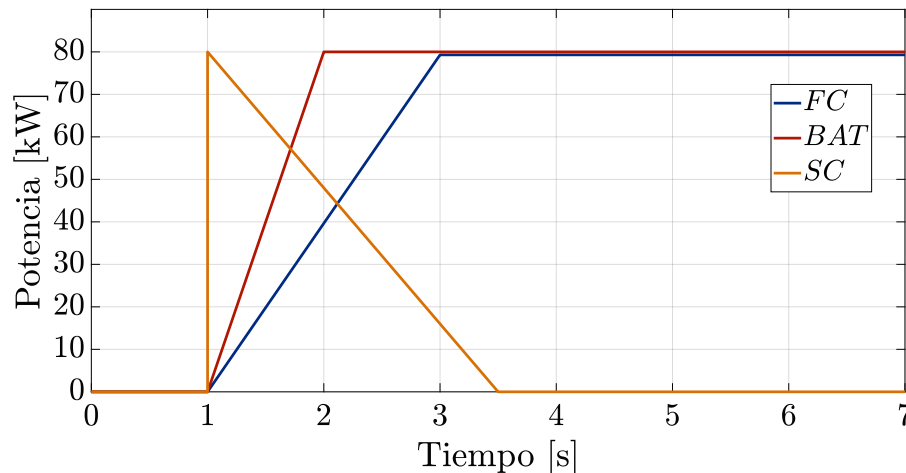


Figura 3.3: Respuesta dinámica. [2]

3.2. Características técnicas del vehículo

Para el diseño del nuevo tren de propulsión se ocupará la retroexcavadora Komatsu WB146-5. Este tipo de vehículos tiene la particularidad de que posee dos modos de operación, puede trabajar como excavadora y como cargador frontal. Cuando trabaja como excavadora se colocan unos soportes especiales para asegurar que la máquina no se mueva mientras se trabaja. En caso que trabaje como cargador frontal, se trasladan de un lugar a otro distintos materiales como tierra, áridos, minerales, entre otros. La masa y el volumen que puede transportar el vehículo en cada tipo de trabajo se puede ver en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1: Características de la retroexcavadora.

	Excavadora	Cargador Frontal
Masa máxima antes del fallo [kg]	4005	6000
Volumen máximo [m^3]	0,20	0,95
Velocidad máxima [km/h]	—	37,8

El tren de propulsión original del vehículo se muestra en la Figura 3.4. En donde destaca que la única fuente de potencia es el motor Diésel.

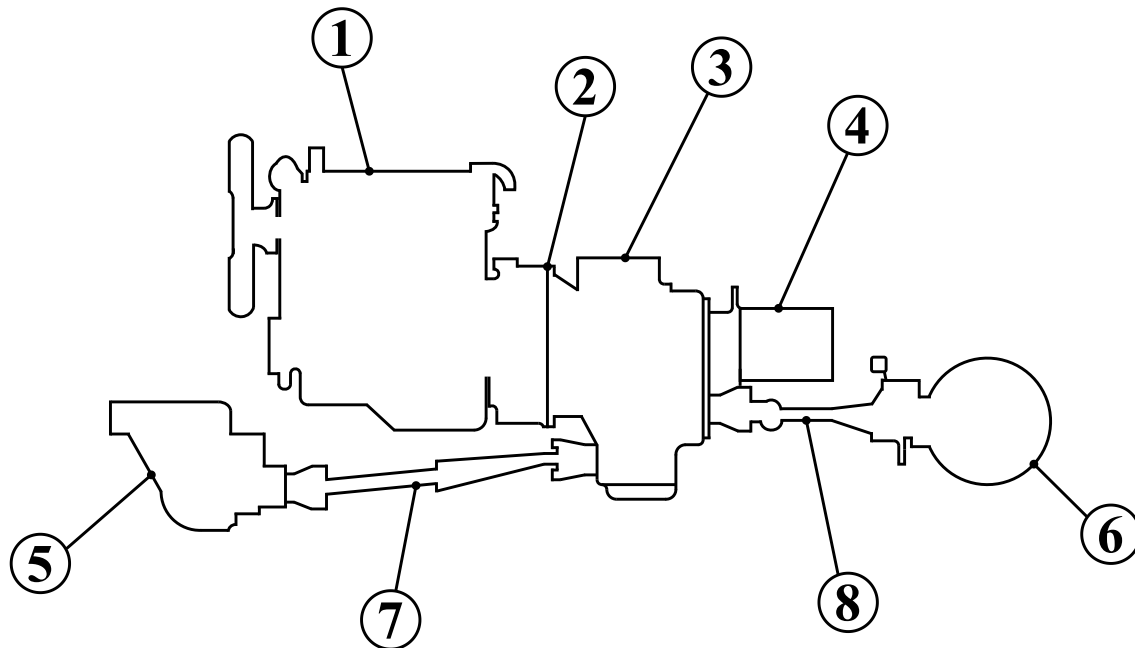


Figura 3.4: Tren de propulsión original del sistema desde una vista lateral. [3]

1. Motor Diésel
2. Convertidor de torque.
3. Transmisión.
4. Bomba hidráulica.
5. Eje Frontal.
6. Eje trasero.
7. Eje de transmisión delantero.
8. Eje de transmisión trasero.

De todos estos componentes, se opta por retirar únicamente el motor diésel y reemplazarlo por un motor eléctrico con características de torque, velocidad y potencia, iguales o superiores, esto con la finalidad de evitar subdimensionarlo. El nuevo motor eléctrico estará conectado al convertidor de torque del sistema original para no interferir en el complejo sistema hidráulico del vehículo y minimizar las intervenciones para mantener las prestaciones originales del vehículo. El motor Diésel original corresponde a un Komatsu S4D102LE-2, cuyas características se detallan a continuación:

Tabla 3.2: Características del motor.

Modelo	Komatsu S4D102LE-2
Potencia Bruta [kW]	69
Potencia Neta [kW]	66
Torque Máximo [Nm]	407
Torque Neto [Nm]	286
Velocidad de giro máxima [rpm]	2200
Masa [kg]	394

Tabla 3.3: Características de los elementos relacionados al motor. [3]

Componente	Masa [kg]	Volumen [m^3]
Motor	394	0,436
Tanque de Combustible (lleno)	190	0,150
TOTAL	584	0,586

3.3. Cálculo de potencia del Motor original

Como se mencionó previamente, el motor diésel es la única fuente de energía para el vehículo. Esto significa que proporciona la potencia necesaria para el desplazamiento del vehículo (P_{desp}), la potencia de los servicios auxiliares (P_{aux}) y la potencia hidráulica (P_{hid}) requerida para diversas operaciones, como mover y transportar tierra y otros solidos.

$$P_{veh} = P_{desp} + P_{aux} + P_{hid} \quad (3.1)$$

La ecuación 3.1 es válida para ambos modos de operación de la retroexcavadora, pero cuando se esta trabajando como excavadora la $P_{desp} = 0$, porque esta afirmada al suelo y no se puede desplazar.

Para dimensionar adecuadamente el nuevo tren de propulsión eléctrico, es necesario conocer la potencia que debe entregar el sistema de almacenamiento de energía (P_{ESA}) y la energía del sistema del almacenamiento de energía (E_{ESA}), para esto se debe tener en cuenta las pérdidas de los componentes eléctricos principales. En este estudio, se utilizaron las eficiencias del motor (η_{motor}), los convertidores DC/DC ($\eta_{DC/DC}$) y el inversor del motor ($\eta_{DC/AC}$). P_{ESA} se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$P_{ESA} = \frac{P_{veh}}{\eta_{motor} \cdot \eta_{DC/DC} \cdot \eta_{DC/AC}} \quad (3.2)$$

En donde:

- $\eta_{motor} = 0,98$ [-]
- $\eta_{DC/DC} = 0,92$ [-]

$$\blacksquare \eta_{DC/AC} = 0,95 [-]$$

La energía del sistema de almacenamiento (E_{ESA}) durante un ciclo de trabajo se calcula mediante la integral de la P_{ESA} respecto al tiempo durante la duración del ciclo de trabajo como se muestra en la ecuación 3.3. En esta ecuación se considera la regeneración de la FC , para simplificar el análisis no se toma en cuenta las pérdidas de esta regeneración.

$$E_{ESA} = \int_0^{T_f} P_{ESA} dt \quad (3.3)$$

3.3.1. Cálculo de la potencia de desplazamiento P_{desp}

Para determinar la potencia de desplazamiento, es fundamental considerar las fuerzas que actúan sobre un vehículo en movimiento. Estas fuerzas incluyen la resistencia a la rotación (F_r) debida al rozamiento de las ruedas con el suelo, la resistencia aerodinámica (F_a) causada por la interacción del vehículo con el aire y la resistencia al gradiente (F_g) debida a la inclinación del terreno. El siguiente diagrama de cuerpo libre ilustra cómo interactúan estas fuerzas:

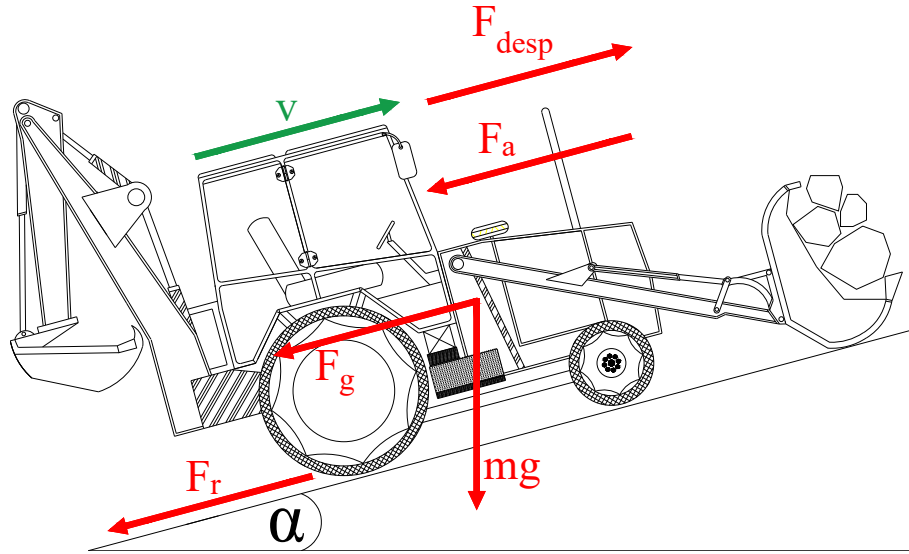


Figura 3.5: Modelo para determinar el ciclo de potencia a partir del ciclo de conducción.

La potencia de desplazamiento se obtiene multiplicando la velocidad por la suma de estas fuerzas:

$$P_{desp} = v \left[\sum F_x \right] \quad (3.4)$$

$$P_{desp} = v [m \cdot a + F_g + F_r + F_a] \quad (3.5)$$

$$P_{desp} = v \left[m \frac{dv}{dt} + m \cdot g \cdot \sin(\alpha) + m \cdot g \cdot C_r \cdot \cos(\alpha) + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot C_d \cdot v^2 \right] \quad (3.6)$$

Donde los parámetros en la ecuación incluyen:

- m : Masa total del vehículo.
- v : Velocidad instantánea.
- g : Constante de gravedad.
- α : Ángulo de inclinación.
- C_r : Coeficiente de roce de giro.
- ρ : Densidad del aire.
- C_d : Coeficiente resistencia de arrastre.
- A : Área de la superficie frontal.

3.3.2. Cálculo de la potencia del sistema hidráulico P_{hid}

El sistema hidráulico opera mediante una bomba alimentada por el motor. Esta bomba, a su vez, suministra fluido a diversas válvulas, incluyendo las que controlan la pala excavadora y el cargador frontal del vehículo. Cada válvula opera actuadores de distintos tipos, como se muestra en la imagen a continuación:

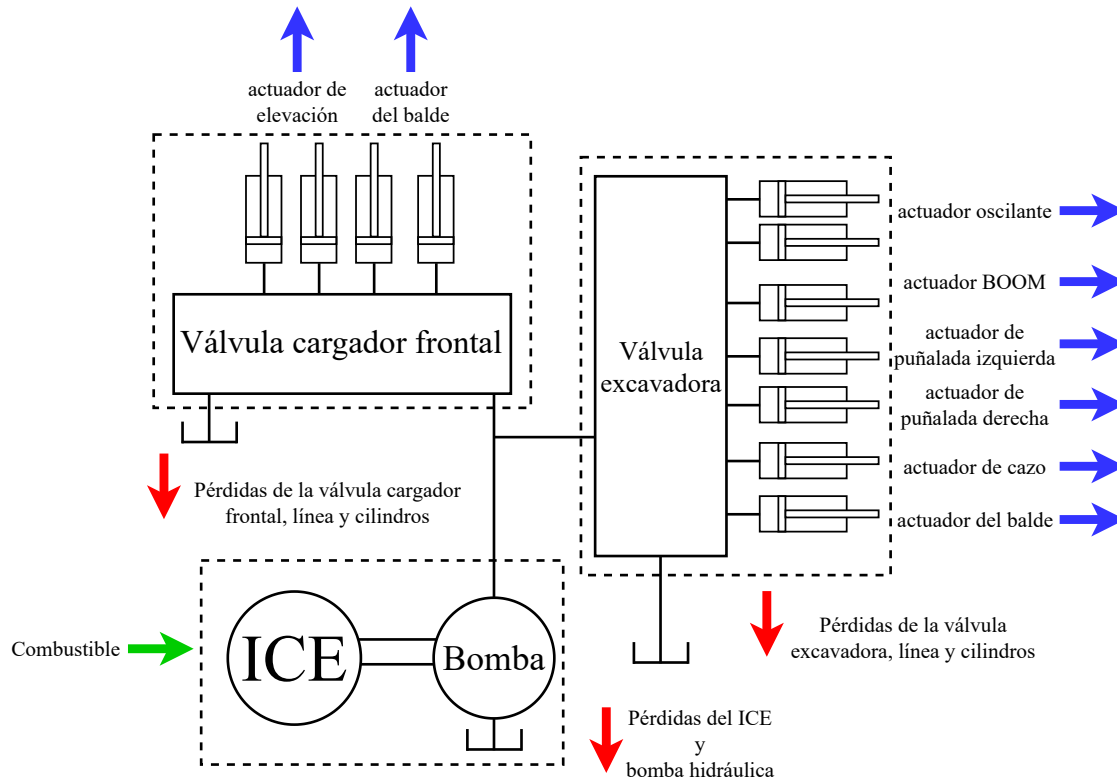


Figura 3.6: Sistema hidráulico de las retroexcavadoras. [4]

Como se vio en la sección anterior, la potencia se puede representar como la fuerza por la velocidad, cuando se trabaja con fluidos la fuerza se representa como presión por

caudal, en donde la presión vendría siendo el símil a la fuerza y el caudal a la velocidad, como se muestra a en la Figura 3.7.

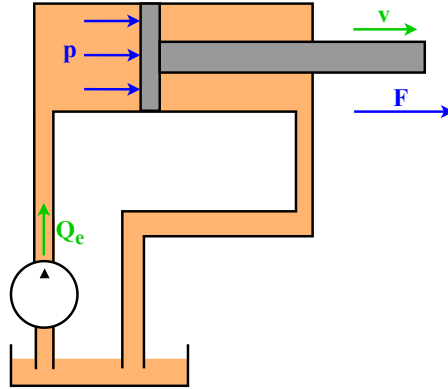


Figura 3.7: Modelo para determinar el ciclo de potencia del sistema hidráulico.

$$P_{mec} = F \cdot V \quad (3.7)$$

$$P_{hid} = p \cdot Q \quad (3.8)$$

La potencia total del sistema hidráulico se obtiene sumando la potencia de cada cilindro:

$$P_{hid} = \sum p \cdot Q \cdot \eta_{hid} \quad (3.9)$$

En donde η_{hid} corresponde a la eficiencia del sistema hidráulico.

3.4. Ciclo de trabajo 1: Pala cargadora en "V"

Un ciclo de trabajo representa la potencia que el motor del vehículo produce mientras la máquina realiza una tarea específica. Como se mencionó anteriormente, la retroexcavadora tiene dos funciones principales: cargador frontal y excavadora. Para dimensionar adecuadamente el tren de propulsión, es necesario analizar los ciclos de trabajo para ambos casos.

Cuando el vehículo actúa como cargador frontal, se puede mover y trasladar tierra de diversas maneras. De acuerdo con la literatura especializada, uno de los movimientos más comunes en este tipo de operaciones es el movimiento en forma de "V" [5], que se ilustra en la Figura 3.8. Este se compone en 6 desplazamientos distintos los cuales son:

1. Retroceder sin masa adicional hasta cierto punto.
2. Avanzar hacia la pila de tierra.
3. Llenar la pala frontal con tierra.

4. Retroceder con la tierra que se representa como un Δm porque se le agrega una cierta cantidad de masa al vehículo.
5. Se avanza hasta el camión con esta masa adicional.
6. Se deja la tierra dentro del camión, para así, partir el ciclo de nuevo.

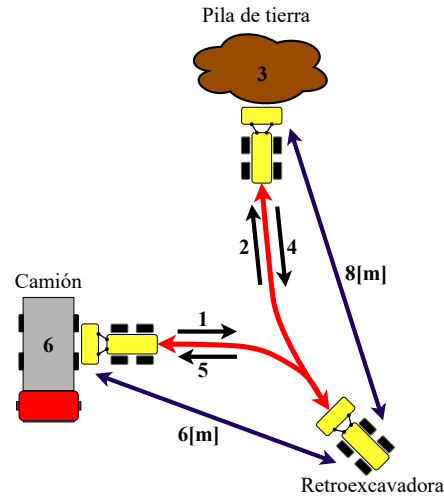


Figura 3.8: Esquema del movimiento en "V" de la retroexcavadora. [5]

Como se puede apreciar en la Figura 3.8, la retroexcavadora se desplaza en tramos con y sin masa extra. Para poder obtener la P_{ESA} de la ecuación 3.2, se utilizó el ciclo de conducción de la Figura 3.9, en donde en esta se indica cuales fueron los tramos con masa adicional por la tierra que tiene que ser movida.

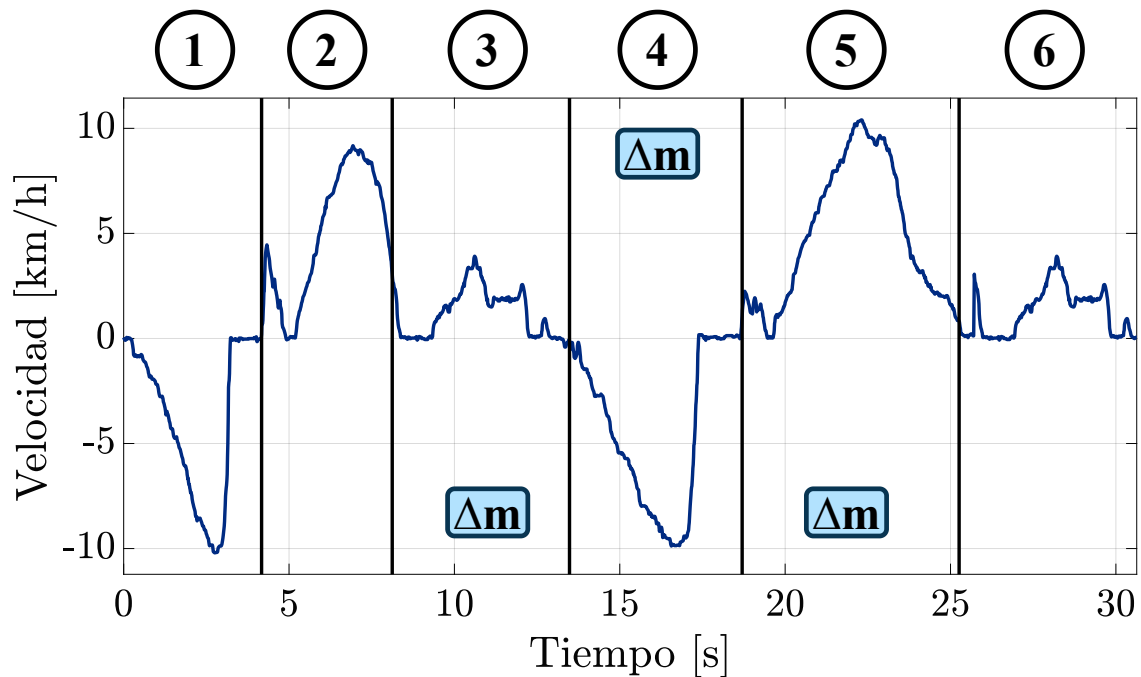


Figura 3.9: Ciclo de conducción del desplazamiento en "V" de la retroexcavadora. [5]

Además, durante todo el ciclo, se utiliza el sistema hidráulico para operar la pala. Por lo tanto, la potencia hidráulica se calcula utilizando la ecuación 3.9. La suma de ambas potencias y P_{aux} proporciona el ciclo de trabajo como se muestra en la Figura 3.10.

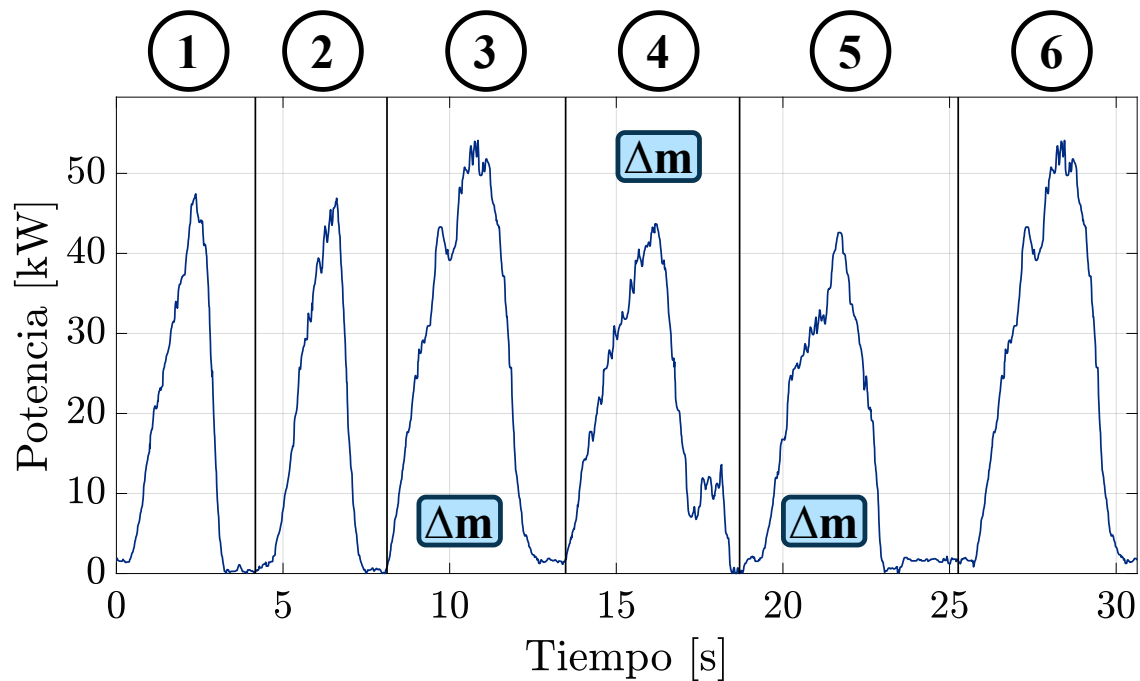


Figura 3.10: Ciclo de trabajo 1: Pala cargadora "V". [5]

3.5. Ciclo de trabajo 2: Excavar trinchera

Cuando el vehículo funciona como excavadora, se ancla al suelo con soportes especiales que evitan su movimiento y garantizan la estabilidad durante el trabajo. El principal objetivo de esta tarea es excavar trincheras, como se ilustra en la Figura 3.11.



Figura 3.11: Movimiento de excavación de trinchera. [6]

Dado que la retroexcavadora no puede moverse en este escenario, las únicas potencias involucradas son la potencia hidráulica (P_{hid}) y la potencia auxiliar (P_{aux}). El ciclo de trabajo de esta modalidad se muestra en la Figura 3.12.

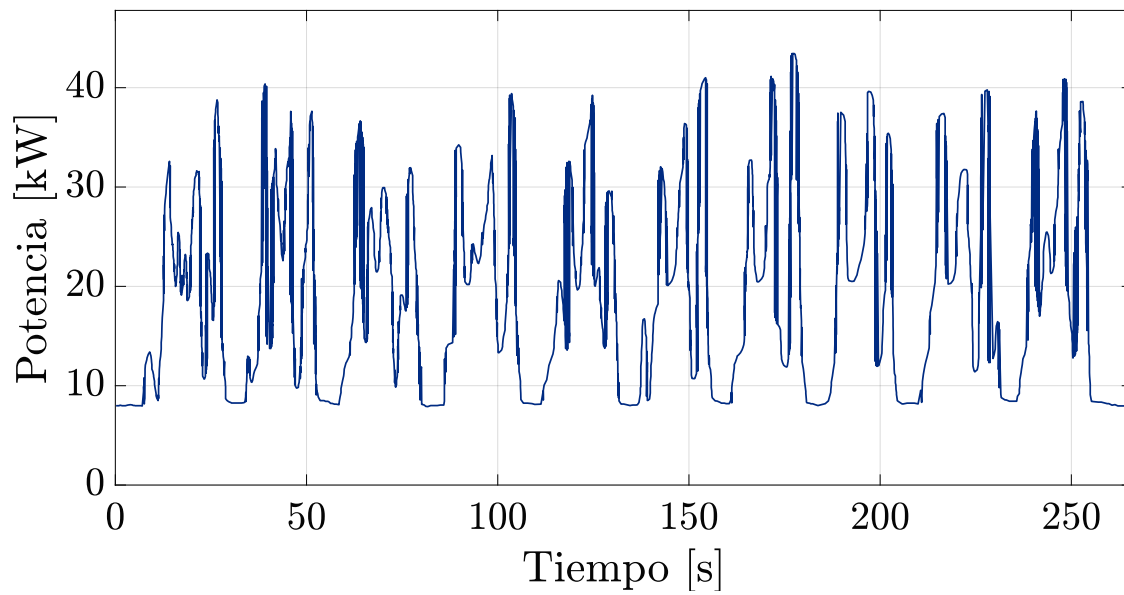


Figura 3.12: Ciclo de trabajo 2: Excavar trinchera. [4]

Capítulo 4

Metodología de diseño del tren de propulsión

4.1. Método de separación de frecuencia y rampa de FC

El método de filtrado de frecuencia se basa en el trabajo presentado por Snoussi [30]. Este consiste en que, a partir de un ciclo de conducción se obtenga la cantidad óptima de FC , BAT y SC , minimizando la masa total del sistema sin considerar el volumen de este. Para esto, se modela la FC y las BAT como filtros pasa-bajo con una frecuencia específica (f_c) para cada uno, esta está determinada por la densidad de energía ($\rho^{energía}$) y la densidad de potencia ($\rho^{potencia}$) como se ve a continuación:

$$f_c[Hz] = \frac{\rho^{potencia} [W/kg]}{\rho^{energía} [J/kg]} \quad (4.1)$$

Una de las dificultades de este método, radica en obtener el valor de la densidad energética de la FC , ya que esta varía según la cantidad de tanques de hidrógeno conectados. Como resultado, la f_c de la FC no refleja con precisión la realidad. Sin embargo, los datasheets de la mayoría de las FC proporcionan la pendiente de la respuesta dinámica de potencia, que es un dato más concreto y fácil de medir que la f_c .

Por lo que se va a modificar este método y se reemplazara el bloque correspondiente al filtro pasa-bajo de la FC por un bloque *Rate Limiter*, como se muestra en la Figura 4.1, donde se ha llamado al nuevo bloque *Rate* para abreviar.

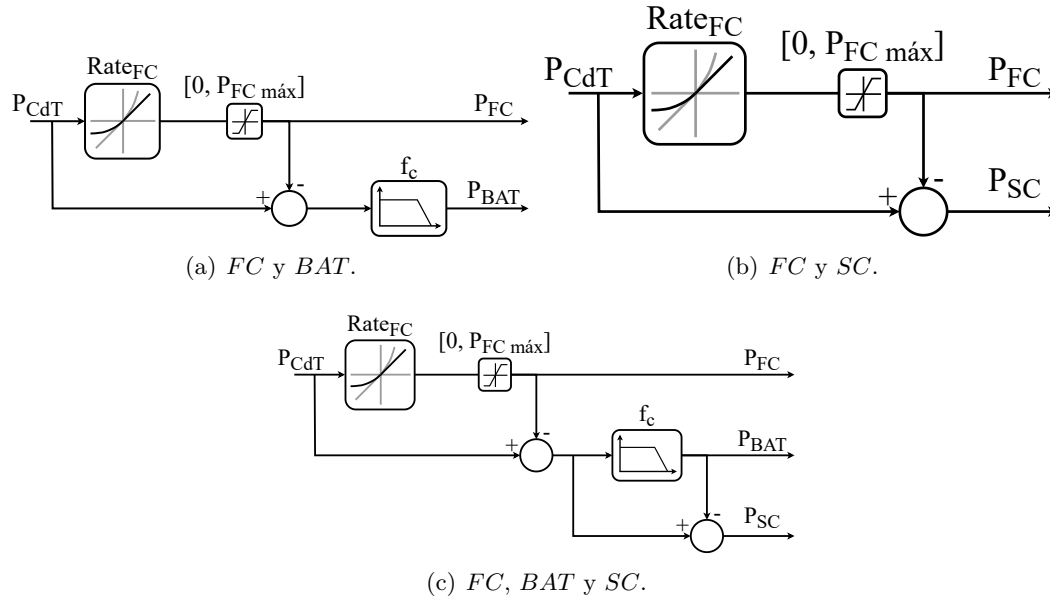


Figura 4.1: Gestión de energía de frecuencia utilizando la rampa de la FC .

Para conocer el volumen total del sistema de almacenamiento de energía, es crucial conocer cuantos componentes de forma individual son necesarios. Por ello, se necesita conocer la energía y potencia que necesita suministrar cada uno en base a un ciclo de trabajo. Para esto, se van a utilizar las ecuaciones 4.2 y 4.4, las cuales utiliza el peor caso entre la potencia y energía para así asegurar su correcto funcionamiento. Para el caso de la energía se utiliza el factor DOD , que es la profundidad de descarga, la cual se puede fijar en un valor con el fin de no descargar por completo la fuente de alimentación para así extender la vida útil de esta.

$$N_{BAT} = \max \left(\frac{E_{BAT}^{\text{máx}} - E_{BAT}^{\text{mín}}}{DOD_{BAT} \cdot E_{BAT}^{\text{datasheet}}}, \frac{\max(|P_{BAT}(t)|)}{P_{BAT}^{\text{datasheet}}} \right) \quad (4.2)$$

$$V_{BAT} = N_{BAT} \cdot V_{BAT}^{\text{datasheet}} \quad (4.3)$$

$$N_{SC} = \max \left(\frac{E_{SC}^{\text{máx}} - E_{SC}^{\text{mín}}}{DOD_{SC} \cdot E_{SC}^{\text{datasheet}}}, \frac{\max(|P_{SC}(t)|)}{P_{SC}^{\text{datasheet}}} \right) \quad (4.4)$$

$$V_{SC} = N_{SC} \cdot V_{SC}^{\text{datasheet}} \quad (4.5)$$

En donde:

- $E^{\text{máx}}$: La energía máxima de la BAT o SC que se registró en un CdT .
- $E^{\text{mín}}$: La energía mínima de la BAT o SC que se registró en un CdT .
- DOD : Profundidad de descarga de la BAT o SC .

- $E^{\text{datasheet}}$: La energía de la *BAT* o *SC* que se señala en su datasheet.
- $P^{\text{datasheet}}$: La potencia de la *BAT* o *SC* que se señala en su datasheet.
- $P(t)$: La potencia de la *BAT* o *SC* que se registró en un *CdT*.
- N : Es la cantidad de *BAT* o *SC*.
- $V^{\text{datasheet}}$: Es el volumen que ocupa una unidad de *BAT* o *SC*.
- V : Es el volumen total de *BAT* o *SC*.

Dentro de las opciones disponibles en el mercado para *FC*, *BAT* y *SC*, se realizó un listado de posibles candidatos para cada uno de estos con el propósito de encontrar la opción que minimice el volumen del sistema de almacenamiento. Para seleccionar los componentes y la cantidad, se llevará a cabo una iteración, donde se probarán diversas combinaciones posibles de los elementos (*FC*, *BAT*, *SC*) para las tres topologías distintas.

Además, en cada iteración se variará el valor de profundidad de descarga entre 5 % y 100 %, con pasos del 5 %, tanto para las baterías (DOD_{BAT}), como para los supercapacitores (DOD_{SC}). Se considero todo el rango para encontrar los valores de *DOD* en los cuales se minimice el volumen total. Cabe destacar que entre menor resulte ser el valor del DOD_{BAT} y DOD_{SC} mayor va a ser la vida útil y confiabilidad de estos equipos.

Una vez completadas todas las iteraciones, se utilizará la función objetivo mostrada en la ecuación 4.6 para seleccionar el tren de propulsión. En la Figura 4.2 se presenta un esquema del proceso de selección del tren de propulsión.

$$\min \sum_{n=1}^k volumen_n \quad (4.6)$$

En donde:

- $volumen_n$: Es el volumen del elemento n.
- k : Es la cantidad de elementos del tren de propulsión que hay en cada iteración.

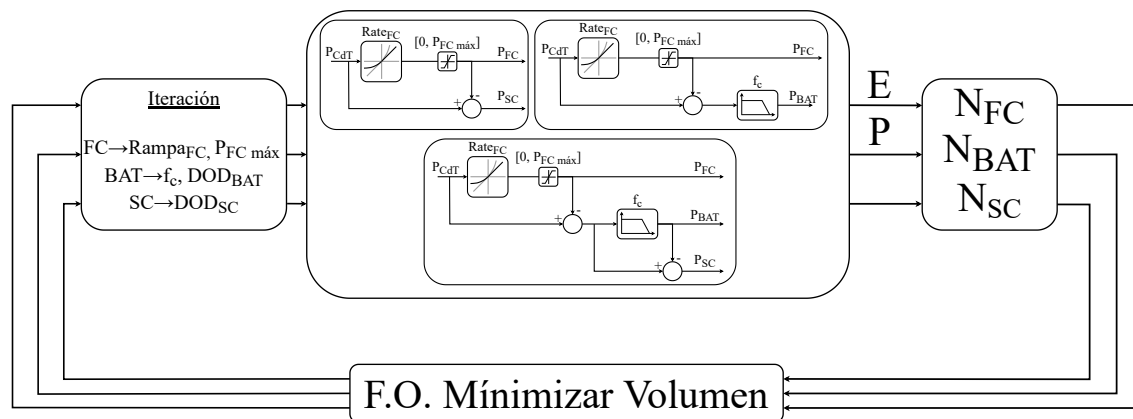


Figura 4.2: Proceso de iteración de la optimización de volumen.

4.2. Elementos del tren de propulsión

4.2.1. Motor eléctrico

El motor eléctrico debe tener características de torque, velocidad y potencia iguales o superiores al motor de combustión interna original, esto con la finalidad de evitar subdimensionar el sistema. Entre las opciones disponibles en el mercado, se ha seleccionado el motor Emrax 268 debido a su similitud con el original para mantener las mismas prestaciones. Se trata de un motor síncrono de flujo axial con imanes permanentes que presenta una alta densidad de potencia y par, como se detalla en la siguiente tabla:



Figura 4.3: Motor Emrax 268. [7]

Tabla 4.1: Especificaciones técnicas del motor. [7]

Marca	Emrax
Modelo	268
Torque máximo [Nm]	500
Torque continuo [Nm]	250
Velocidad máxima [rpm]	4500
Potencia peak [kW]	210
Potencia máxima continua [kW]	117
Tensión [V]	100/800
Sistema de enfriamiento	Aire/hibrido
Diámetro [m]	0,268
Largo [m]	0,136
Masa [kg]	22,34

4.2.2. Tanque de Hidrógeno

El hidrógeno se caracteriza por tener una elevada energía específica, con un valor de $39,5 [kWh/kg]$, casi tres veces mayor que la gasolina, que es de $13,1 [kWh/kg]$ [47]. Esto lo convierte en una excelente opción como fuente de energía para vehículos con espacio limitado para almacenamiento de combustible. El hidrógeno se almacena en un tanque a

alta presión, generalmente de 350 a 700 [bar], y requiere un sistema de control y regulación para garantizar un suministro seguro y continuo al sistema de celdas de combustible.

En la industria, existen distintos métodos para el almacenamiento de hidrógeno. Uno de los principales es conservarlo en estado líquido, donde el hidrógeno alcanza una temperatura de $-252,87^{\circ}\text{C}$. Una ventaja de este método es que se puede almacenar a presión ambiente, y debido a su estado líquido, es 850 veces más denso que en estado gaseoso, lo que permite guardar grandes cantidades en un espacio reducido. No obstante, el inconveniente radica en que mantener y alcanzar estas bajas temperaturas conlleva un significativo consumo de energía [48].

Otra alternativa, ampliamente utilizada, que es la elegida para el nuevo tren de propulsión, consiste en almacenar el hidrógeno a alta presión. Esto se debe a que es más práctico de manejar, el proceso de comprimir hidrógeno es más eficiente que su contraparte en estado líquido y evita la necesidad de consumir energía de forma constante para mantener el hidrógeno a bajas temperaturas.

Finalmente, se optó por utilizar tanques de la marca surcoreana Iljin Hysolus, con una capacidad de 700 [bar] y de tipo IV. Esta elección se basó en varias razones: los tanques tipo IV son capaces de soportar altas presiones, lo que equivale a un mayor almacenamiento de hidrógeno. Además, su peso y volumen son menores en comparación con otros tipos de tanques disponibles en el mercado. Esto se debe a que cuentan con un recubrimiento interno de polímero y están revestidos de fibra de carbono para aumentar su ligereza y resistencia [49]. A continuación, se detallan las características del tanque seleccionado:



Figura 4.4: Cilindro contenedor de Hidrógeno Iljin Hysolus. [8]

Tabla 4.2: Especificaciones técnicas del cilindro contenedor de hidrógeno. [8]

Marca	Iljin Hysolus
Modelo	HT700-115
Presión [bar]	700
Volumen [L]	115
Masa H_2 [kg]	4,6
Masa Estanque [kg]	79
Largo [m]	1,23
Diámetro [m]	0,445
Tipo de seguridad	IV

4.2.3. Pila de combustible

Las celdas de combustible son el corazón del sistema de propulsión con hidrógeno. Transforman el hidrógeno y el oxígeno en electricidad y agua a través de una reacción

química. En este trabajo, se utilizarán celdas de combustible de membrana de intercambio de protones (*FC*), que son adecuadas para aplicaciones de electromovilidad debido a su alta densidad de energía.

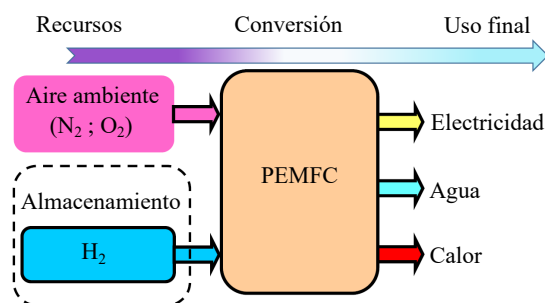


Figura 4.5: Principio de funcionamiento de la *FC*. [9]

La celda de combustible opera según el principio de oxidación-reducción, lo que implica que los reactivos deben estar separados por un electrolito que desempeña una doble función: aislar los reactivos y permitir el paso de iones necesarios para facilitar las dos reacciones electroquímicas. Un dispositivo eléctrico alimentado actúa como el puente electrónico, lo que, a su vez, posibilita la recuperación de energía útil en forma de trabajo eléctrico (W_{elec}) [9].

La Figura 4.6 ilustra las reacciones de oxidación-reducción específicas tanto en casos ácidos como alcalinos, así como los flujos de iones relacionados a través de electrolitos específicos. La industria automotriz, se enfoca en las *FC* ácidas basadas en una membrana polimérica ácida sólida y extremadamente delgada (10 $[\mu m]$ a 100 $[\mu m]$). Esta tecnología se conoce como "PEMFCs" por sus siglas en inglés, que se traducen como "Celdas de Combustible de Membrana de Intercambio de Protones". Esto permite que sea un convertidor de energía muy compacto y con una buena resistencia mecánica en entornos difíciles (vibraciones) [9].

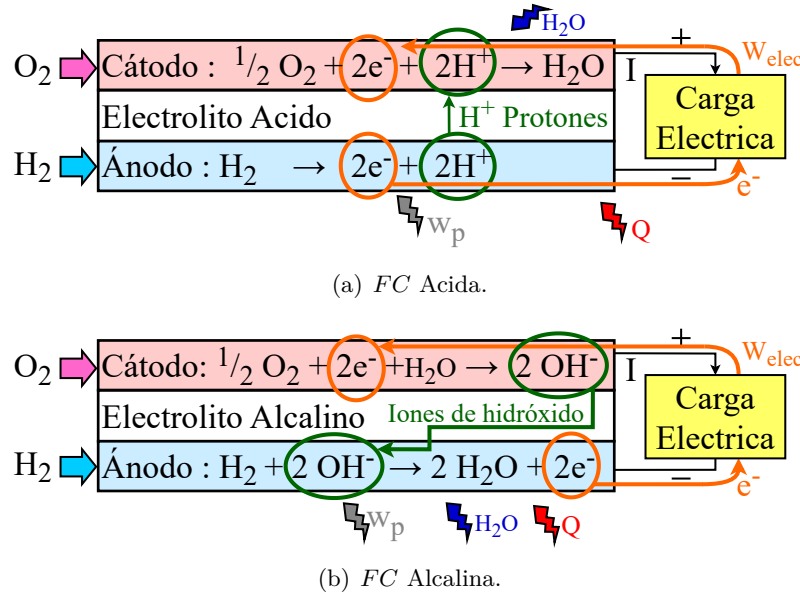


Figura 4.6: Reacción de Oxido-reducción de la FC. [9]

Dentro del mercado, se identificaron diversas opciones de celdas de combustible, por lo que se puede escoger la más adecuada en términos de volumen utilizado. Las características más relevantes en este estudio incluyen la velocidad de cambio de potencia ($Rate_{FC}$), la potencia de la celda de combustible y su volumen. Las opciones se detallan en la siguiente tabla.

Tabla 4.3: Diversas opciones de FC disponibles en el mercado.

Marca	Modelo	Potencia [kW]	$Rate_{FC}$ [kW/s]	Volumen [m^3]	Masa [kg]
Loop Energy	T600-S	60	30	0,6430	398
Loop Energy	T500-S	50	33	0,6710	381
Toyota	Gen 2	80	40	0,3280	246
US Hybrid	Fce 80	80	20	0,4940	248
Ballard	FCMove-HD	70	25	0,6140	250
Holly Tech	60KW	63	39	0,3440	200
PowerCell	Heavy Duty System 100	100	22	0,5660	170
Intelligent Energy	Intelligent Energy	100	37	0,4590	275

4.2.4. Baterías

La función principal de las baterías es complementar la potencia de la celda de combustible (FC) cuando esta no es capaz de suministrar suficiente energía. En el mercado actual, existe una amplia variedad de baterías disponibles, y se ha optado por utilizar las baterías de Litio Fosfato de Hierro ($LiFePO_4$) debido a su alta densidad energética de 120 [Wh/kg], lo que minimiza el volumen necesario. Además, estas baterías son seguras, ya que ofrecen estabilidad frente a sobrecargas, cortocircuitos y son capaces de soportar altas temperaturas [50].

Dentro de las numerosas opciones disponibles en el mercado actual, se han seleccionado los modelos que se detallan en la Tabla 4.4. Esta tabla resalta la potencia, energía y volumen de cada opción. Es importante destacar que todos los modelos elegidos incluyen su propio Sistema de Gestión de Batería (BMS, por sus siglas en inglés) integrado, por lo que ya se está considerando su masa y volumen dentro de las baterías, lo que simplifica el

proceso de implementación [50].

Tabla 4.4: Distintas opciones de *BAT* disponibles en el mercado.

Marca	Modelo	Potencia [kW]	Energía [kWh]	f_c [Hz]	Volumen [m^3]	Masa [kg]
KepWorth	36V y 60Ah	2,16	2,16	1,000	0,0266	21
KepWorth	36V y 120Ah	4,32	14,40	0,300	0,0345	38
KepWorth	48V y 100Ah	4,80	4,80	1,000	0,0345	37
Lithium Valley	LV-BAT-R5.12Aa	6,40	5,12	1,250	0,0315	47
HXX	H04F500	6,40	6,40	1,000	0,0308	50
SmartPropel	46V50A	3,74	2,34	1,600	0,0029	15
SmartPropel	144V120A	8,64	17,28	0,500	0,0526	220
SmartPropel	72V100A	3,60	7,20	0,500	0,0720	75
SmartPropel	48V100A	2,56	8,12	0,315	0,0315	45

4.2.5. Supercapacitor

El propósito de los supercapacitores (*SC*) es muy similar a la de las baterías (*BAT*), ya que cumplen la función de suministrar potencia cuando la celda de combustible (*FC*) no es capaz de hacerlo por sí sola, o en combinación con las baterías. Esto se debe a que los *SC* pueden entregar potencia de manera prácticamente instantánea debido a sus propiedades físicas. Otra ventaja de los supercapacitores es que experimentan muy poca degradación en los ciclos de carga y descarga, además utilizan materiales menos tóxicos que las baterías convencionales, lo que los hace más amigables con el medio ambiente. Sin embargo, los *SC* presentan una densidad energética muy baja, lo que significa que pueden almacenar una baja cantidad de energía, y su voltaje varía según la energía disponible, lo que requiere un sistema de conversión más complejo de controlar para almacenar y recuperar la energía [51].

En la Tabla 4.5, se presentan diferentes opciones de supercapacitores disponibles en el mercado. Al igual que en el caso de las baterías, los factores más importantes son la potencia, la energía y el volumen. Se optó por seleccionar supercapacitores de la marca LSMtron, ya que todos vienen con los módulos preensamblados, lo que facilitará el proceso de implementación.

Tabla 4.5: Distintas opciones de *SC* disponibles en el mercado.

Marca	Modelo	P_{peak} [kW]	Energía [kWh]	Volumen [m^3]	Masa [kg]	V_{nom} [V]	I_{peak} [A]
LSMtron	0058F EA	0,34	0,002	0,0882	0,6	16,8	20
LSMtron	0500F EA	3,24	0,018	0,0492	5,1	16,2	200
LSMtron	0166F EA DC	7,29	0,054	0,0142	14,2	48,6	150
LSMtron	0166F EA YJ	9,72	0,055	0,1390	16,7	48,6	200
LSMtron	0093F EA	6,91	0,096	0,0266	26,0	86,4	80
LSMtron	0062F EA	33,70	0,143	0,0659	53,0	129,6	260

4.2.6. Convertidores e inversor

Para el inversor del motor, se ha elegido el DTI HV-500AC, que es un modelo trifásico con ventilación activa por aire. Sus características se detallan en la Tabla 4.6. La elección se basó principalmente en la recomendación del fabricante del motor.



Figura 4.7: Inversor DTI HV-550AC.

Tabla 4.6: Especificaciones técnica del inversor. [10]

Marca	DTI
Modelo	HV-500AC
Potencia máxima [kW]	250
Corriente funcionamiento continuo AC [A_{pk}]	155
Corriente máxima AC [A_{pk}]	500
Tensión DC [V]	50-800
Corriente DC máxima [A]	350
Eficiencia [%]	95
Sistema de enfriamiento	Aire
Peso [kg]	7,7
Dimensiones [m]	0,110 x 0,213 x 0,420

Dado que cada modelo de FC , BAT y SC tiene diferentes niveles de tensión, los convertidores DC/DC se deberán diseñar una vez que se haya seleccionado el resto del tren de propulsión. El diseño de convertidores queda fuera de los objetivos de la memoria, por lo que se va a asumir uno de dimensiones $0,2[m] \times 0,27[m] \times 0,22[m]$ y masa de $20[kg]$. Se escogieron estos parámetros con el propósito de sobredimensionar el DC/DC , tomando como base el inversor del motor por ser el elemento de mayor potencia y aumentando el valor de sus variables para así trabajar en un caso aun más desfavorable.

En la tabla 4.7 se muestra un resumen de todas las opciones disponibles en el mercado con las cuales se puede diseñar el tren de propulsión.

Tabla 4.7: Resumen de las distintas opciones de los elementos del tren de propulsión.

Elemento	Marca	Modelo
Motor	Emrax	268
Tanque de hidrógeno	Iljin Hysolus	HT700-115
Pila de combustible	Loop Energy	T600-S
	Loop Energy	T500-S
	Toyota	Gen 2
	US Hybrid	Fce 80
	Ballard	FCMove-HD
	Holly Tech	60KW
	PowerCell	Heavy Duty System 100
	Intelligent Energy	Intelligent Energy
Batería	KepWorth	36V y 60Ah
	KepWorth	36V y 120Ah
	KepWorth	48V y 100Ah
	Lithium Valley	LV-BAT-R5.12Aa
	HXX	H04F500
	SmartPropel	144V120A
	SmartPropel	72V100A
	SmartPropel	48V100A
Supercapacitor	LSMtron	0058F EA
	LSMtron	0500F EA
	LSMtron	0166F EA DC
	LSMtron	0166F EA YJ
	LSMtron	0093F EA
	LSMtron	0062F EA
Inversor	DTI	HV-500AC

Capítulo 5

Optimización de espacios

Una vez seleccionados los componentes que compondrán el nuevo tren de propulsión, el siguiente paso es ubicarlos dentro del espacio asignado. Este espacio corresponde al chasis en la zona debajo del capó de la retroexcavadora, donde originalmente estaba el motor de combustión interna. El motor Diésel y todos sus componentes asociados fueron extraídos de este espacio, dejándolo vacío.

En la literatura, el concepto más relacionado con el caso de estudio es el problema de *3D bin packing*. Este problema de optimización es de tipo *NP-hard* (Nondeterministic Polynomial-time hard), lo que significa que no es posible encontrar una solución exacta en tiempo polinómico. El *3D bin packing* es un tipo de problema de empaquetado en el cual N cajas 3D deben ser colocadas en la menor cantidad de contenedores posibles, minimizando así el espacio vacío. Este problema ha generado una amplia variedad de artículos y métodos con enfoques diferentes para su resolución, cada uno con sus propias ventajas y desventajas [36].

En el estudio de la geometría, existe un concepto denominado *bounding box*. Esto consiste en crear un paralelepípedo a partir de los objetos más alejados entre sí en el espacio. Esto se puede ver gráficamente en la Figura 5.1, donde el cubo rojo delimita la cara izquierda, superior y frontal, mientras el cubo verde delimita la cara derecha, inferior y posterior del *bounding box*. Por último, el cubo azul no afecta el tamaño del paralelepípedo formado porque está contenido dentro de este.

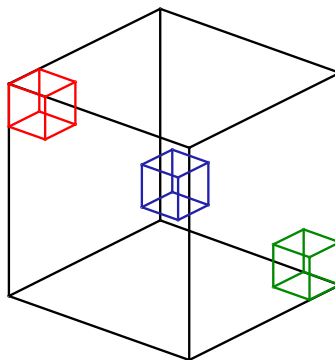


Figura 5.1: *Bounding box*.

La dificultad principal radica en implementar un método de resolución del *3D bin packing* que cumpla con la restricción de mantener un objeto fijo en el espacio. En este caso, el motor eléctrico tiene una posición invariable porque debe acoplarse al eje del motor original. Esto llevó a la búsqueda de un nuevo método para abordar el problema.

Para ello, se cambió la función objetivo. En lugar de minimizar la cantidad de contenedores (función objetivo original), ahora se busca minimizar el volumen del *bounding box* formado por los distintos elementos del tren de propulsión. El objetivo es encontrar el mínimo espacio en el cual se pueden acomodar todos los objetos y asegurar que quepan en el lugar asignado.

Otro aspecto no abordado por el problema de *3D bin packing*, es el centro de masa. Dado que se quitarán y agregarán elementos al vehículo, es fundamental que el nuevo centro de masa sea cercano al original. Se supone que el centro de masa original se encuentra en el centro del vehículo desde el plano visto desde arriba [52] y a un 35 % de la altura del vehículo [53]. El centro de masa se representa con coordenadas, y se utiliza la siguiente fórmula para obtener un valor numérico que permita comparar las opciones:

$$\Delta CM = |CM_{N,x} - CM_{O,x}| + |CM_{N,y} - CM_{O,y}| + |CM_{N,z} - CM_{O,z}| \quad (5.1)$$

En donde:

- $CM_{N,x}$, $CM_{N,y}$, y $CM_{N,z}$ corresponden al centro de masa del nuevo tren de propulsión en los ejes x , y y z , respectivamente.
- $CM_{O,x}$, $CM_{O,y}$, y $CM_{O,z}$ corresponden al centro de masa del tren de propulsión original en los ejes x , y y z , respectivamente.

Con el problema y la función objetivo definidos se va a seleccionar la metodología de optimización, que en este caso se utilizara los algoritmos voraces. Estos se caracterizan porque en la mayoría de los casos en que se aplican, se identifican varias de las siguientes propiedades [38]:

- El objetivo principal es encontrar una solución óptima global o local para un problema dado.
- Se dispone de un conjunto o lista de candidatos. En el caso de estudio los candidatos son los elementos del tren de propulsión.
- A medida que avanza el algoritmo, que son tres funciones más la función objetivo, se formaran otros dos grupos de candidatos: uno con los seleccionados y otro con los rechazados.
- La primera función evalúa si un conjunto de candidatos constituye una solución, sin importar si es factible u óptima en este punto. En este trabajo se va a omitir esta función por ser redundante.
- Existe otra función que evalúa la factibilidad de un conjunto de candidatos, sin importa todavía si es óptima.
- Hay otra función más de selección que indica el candidato más prometedor aún no seleccionado ni rechazado.

- Por último, está la función objetivo que evalúa la solución encontrada, esta se puede ver en la ecuación 5.2. En donde las condiciones de borde son que los elementos no salgan del espacio original ni tampoco se solapen entre si.

$$\min \text{ Volumen}_{\text{bounding box}} = (x_{\max} - x_{\min}) \cdot (y_{\max} - y_{\min}) \cdot (z_{\max} - z_{\min}) \quad (5.2)$$

Donde:

- $x_{\max}$: Punto más alejado entre todos los objetos a la coordenada x.
- $x_{\min}$: Punto más cercano entre todos los objetos a la coordenada x.
- $y_{\max}$: Punto más alejado entre todos los objetos a la coordenada y.
- $y_{\min}$: Punto más cercano entre todos los objetos a la coordenada y.
- $z_{\max}$: Punto más alejado entre todos los objetos a la coordenada z.
- $z_{\min}$: Punto más cercano entre todos los objetos a la coordenada z.

El término "voraz" se justifica por la tendencia del algoritmo a elegir la mejor opción actual sin considerar el futuro. Las decisiones son definitivas: un candidato aceptado permanece, mientras que uno rechazado no se reconsidera. Por esto, la función de selección se vincula generalmente con la función objetivo [38].

Para aplicar el algoritmo voraz al caso de estudio se utilizó los siguientes supuestos:

1. El primer conjunto de candidatos se compone por los elementos que van a componer el tren de propulsión, a excepción del motor, porque este tiene una posición predeterminada.
2. El orden de los elementos en este conjunto afectará el resultado final, por lo que se ordenarán los elementos de mayor a menor volumen.
3. Todos los objetos se van a representar como paralelepípedos.

Dado que el motor tiene una ubicación fija e inamovible, se inspeccionarán todas las opciones posibles para ubicar el segundo elemento. Esta inspección consiste en ubicar el segundo elemento en la esquina de una de las caras del primer elemento. Una vez ubicado, se evaluará si es factible o no la solución utilizando la segunda función del algoritmo voraz. La solución se considerará factible si el objeto puede entrar completamente en el espacio asignado sin solaparse con otros objetos; en caso contrario, se terminará el algoritmo. Si la ubicación es factible, se calculará el volumen del *bounding box* formado por estos dos objetos, se guardará este valor y se registrará su valor de ΔCM , y se concluirá el algoritmo. Después de terminar el algoritmo voraz el segundo objeto se va a desplazar una cierta distancia, que en este caso se utilizó una distancia de 1[cm], y luego se va a volver a ejecutar el algoritmo voraz. Esto se vuelve a repetir hasta que el segundo objeto cubra toda la cara con la cual se este trabajando como se ve en la Figura 5.2. Después

de terminar con una cara, se procede a hacer lo mismo con las otras 5 caras restantes. Una vez se hallan recorrido las 6 caras, se va a ubicar el segundo elemento en la posición cuyo volumen de *bounding box* se mínimo, en caso de que dos o más ubicaciones tengan el mismo volumen, se va a escoger el que tenga menor valor de ΔCM .

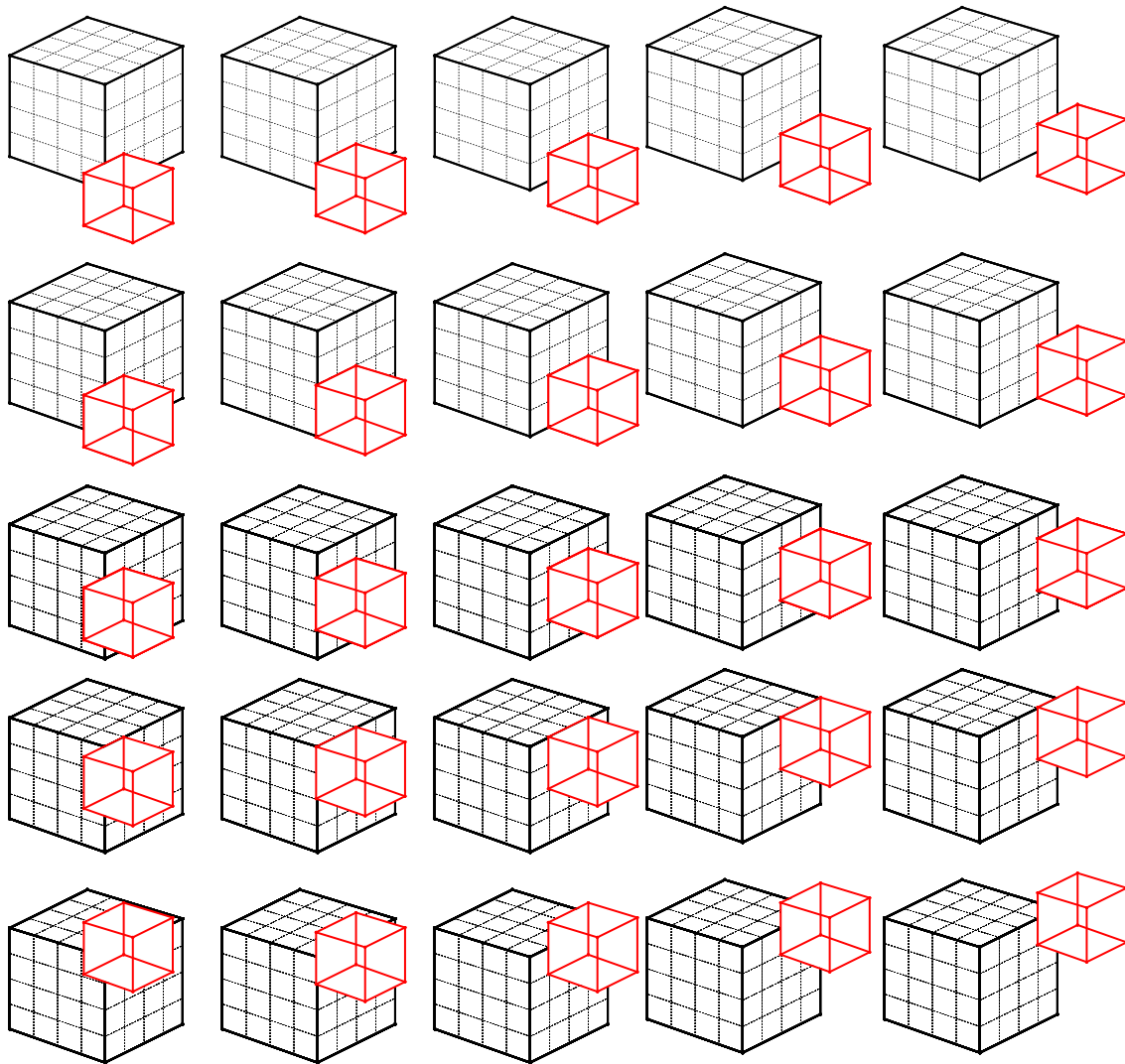


Figura 5.2: Ilustración gráfica de la iteración de los objetos.

A partir del tercer objeto en adelante, el procedimiento será el mismo que para el segundo objeto. La diferencia es que en lugar de recorrer un único paralelepípedo, ahora el recorrido se realizará en una figura más compleja.

El problema de este algoritmo es que los objetos se desplazan en una sola posición y no rotan. Los paralelepípedos tienen 6 posiciones diferentes, que se pueden ver en la Figura 5.3. Por lo tanto, para cada objeto, se probarán estas 6 posiciones distintas con el algoritmo voraz, a excepción de la *FC* porque, debido a su compleja estructura, solo puede funcionar en una posición fija. Los inductores también quedarán excluidos de este movimiento de posición porque son cubos, por lo que no se ven afectados. Esto generará que el algoritmo voraz deba ejecutarse 6^n veces, donde n es la cantidad de elementos que

se deben rotar.

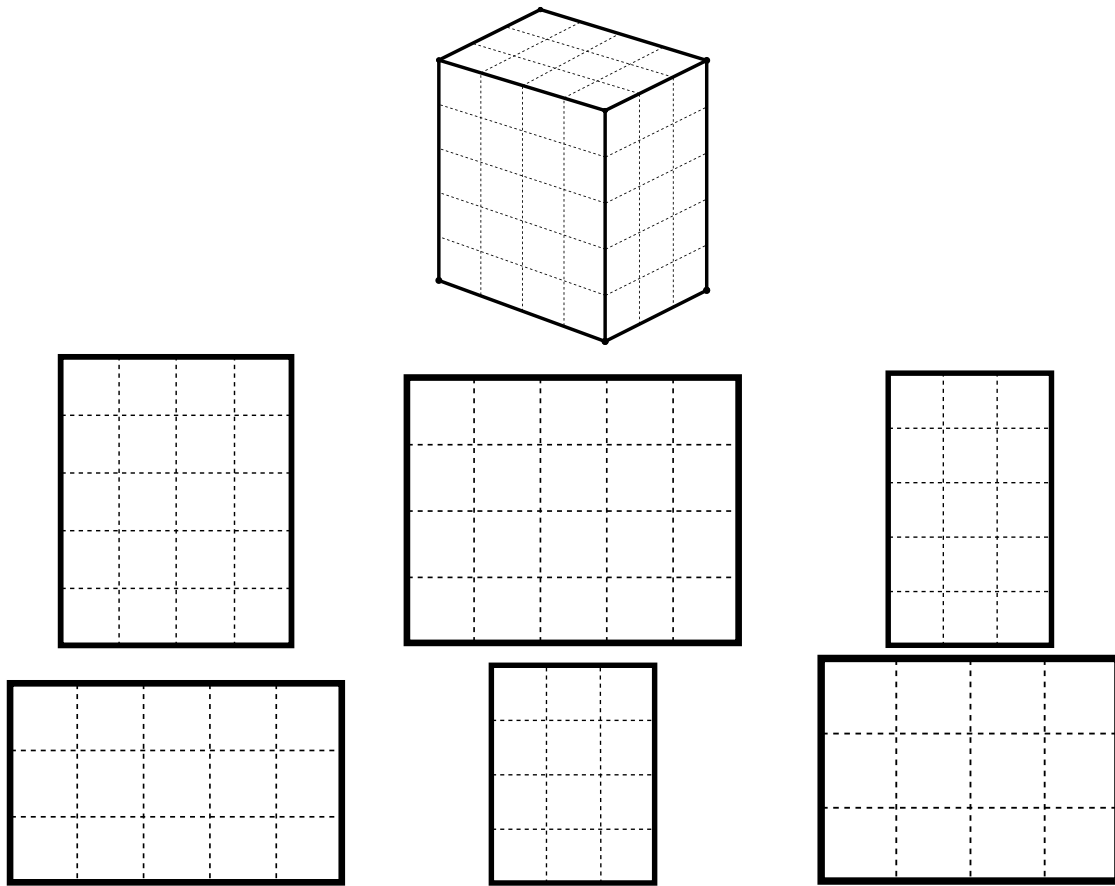


Figura 5.3: Posibles posiciones o caras en las cuales puede existir un elemento.

El orden en el cual se ubican los objetos va a afectar el resultado final, por lo que se va a analizar más de un orden distinto. Se van a estudiar los casos donde únicamente el primer elemento después del motor varíe, pero el orden de los demás queda igual. Por lo que se usarían 5 o 6 combinaciones distintas, esto va a depender de la topología a utilizar. Porque en la topología de $FC + BAT$ y $FC + SC$ hay 5 objetos distintos sin repetirse, en la topología $FC + BAT + SC$ hay 6 objetos sin repetirse. Es importante que el numero de combinaciones sea reducido porque computacionalmente es muy exigente utilizar el algoritmo.

Capítulo 6

Resultados y análisis

En el tren de propulsión los elementos que faltaban seleccionar era el tipo y cantidad de FC , BAT y SC . Para esto se utilizó la metodología del capítulo 4 en donde hay 6 resultados diferentes, en donde 3 son para un ciclo de trabajado y los otros 3 son para el segundo ciclo de trabajo. Cada uno de estos 3 resultados de un CdT corresponde a una topología distinta. Estos se pueden ver en la Tabla 6.1 y 6.2.

Tabla 6.1: Resultados del Ciclo de trabajo 1: Pala cargadora en "V".

		$FC + BAT$	$FC + SC$	$FC + BAT + SC$
FC	Modelo	Toyota: Gen 2 Horizontal	Toyota: Gen 2 Horizontal	Toyota: Gen 2 Horizontal
	Cantidad [-]	1	1	1
	Volumen [m^3]	0,328	0,328	0,328
BAT	Modelo	HXX: HO4F500	-----	HXX: HO4F500
	Cantidad [-]	3	-----	3
	Volumen [m^3]	0,092	-----	0,092
SC	$DOD_{BAT\ min}$ [%]	5	-----	5
	Modelo	-----	LSMtron: 0166F EA DC	LSMtron: 0166F EA DC
	Cantidad [-]	-----	3	2
	Volumen [m^3]	-----	0,043	0,028
	$DOD_{SC\ min}$ [%]	-----	10	5
Suma del volumen de FC , BAT y SC [m^3]		0,420	0,371	0,449

Tabla 6.2: Resultados del Ciclo de trabajo 2: excavadora.

		$FC + BAT$	$FC + SC$	$FC + BAT + SC$
FC	Modelo	Toyota: Gen 2 Horizontal	Toyota: Gen 2 Horizontal	Toyota: Gen 2 Horizontal
	Cantidad [-]	1	1	1
	Volumen [m^3]	0,328	0,328	0,328
BAT	Modelo	Smart Propel: 144V120A	-----	Smart Propel: 144V120A
	Cantidad [-]	1	-----	1
	Volumen [m^3]	0,053	-----	0,053
SC	$DOD_{BAT\ min}$ [%]	5	-----	5
	Modelo	-----	LSMtron: 0166F EA DC	LSMtron: 0166F EA DC
	Cantidad [-]	-----	4	4
	Volumen [m^3]	-----	0,057	0,057
	$DOD_{SC\ min}$ [%]	-----	5	5
Suma del volumen de FC , BAT y SC [m^3]		0,381	0,385	0,438

De estos resultados se destaca la baja profundidad de descarga (DOD), tanto de baterías como de los supercapacitores, esto permite extender la vida útil de las baterías.

Para seleccionar la opción final, se debe asegurar que esta abastezca de energía y potencia el sistema para ambos ciclos de trabajo para la topología determinada. Por eso en las secciones 6.0.1, 6.0.2 y 6.0.3 se muestran los resultados de la potencia y energía vs tiempo para cada ciclo de trabajo. En todos los resultados se utilizó la misma FC , por lo que solo se va a analizar los demás sistemas de energía.

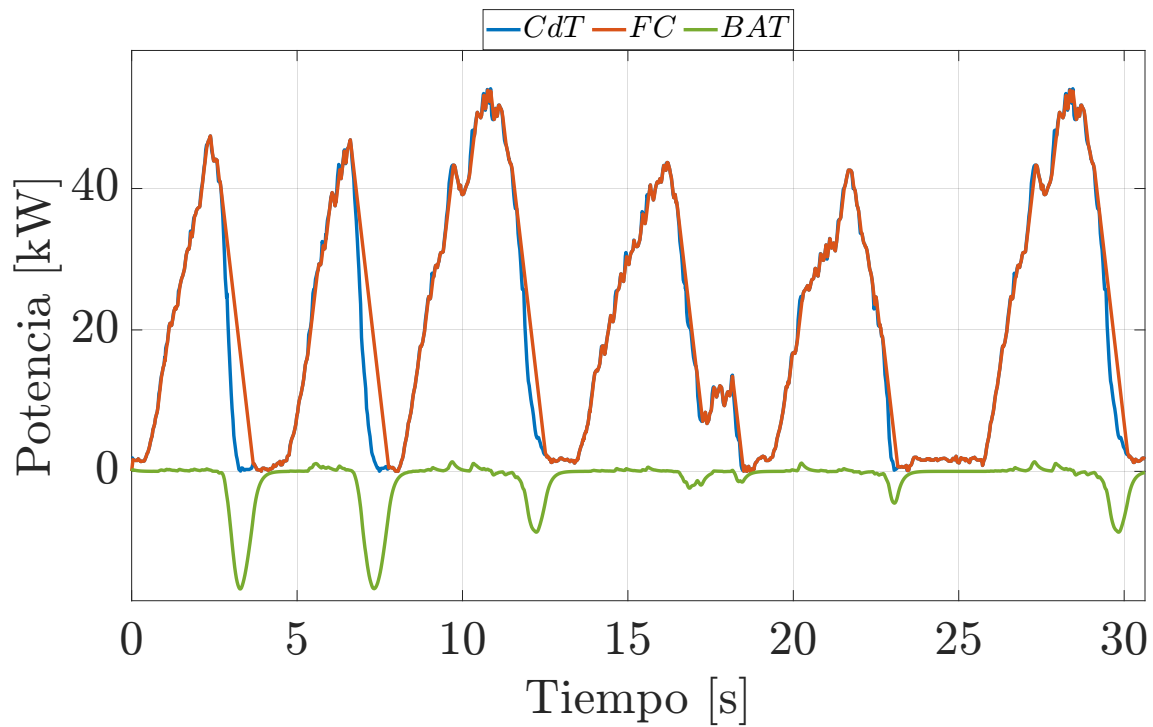
6.0.1. $FC + BAT$ 

Figura 6.1: Evolución de la potencia del sistema utilizando la topología FC y BAT con el ciclo de trabajo 1: Pala cargadora en "V".

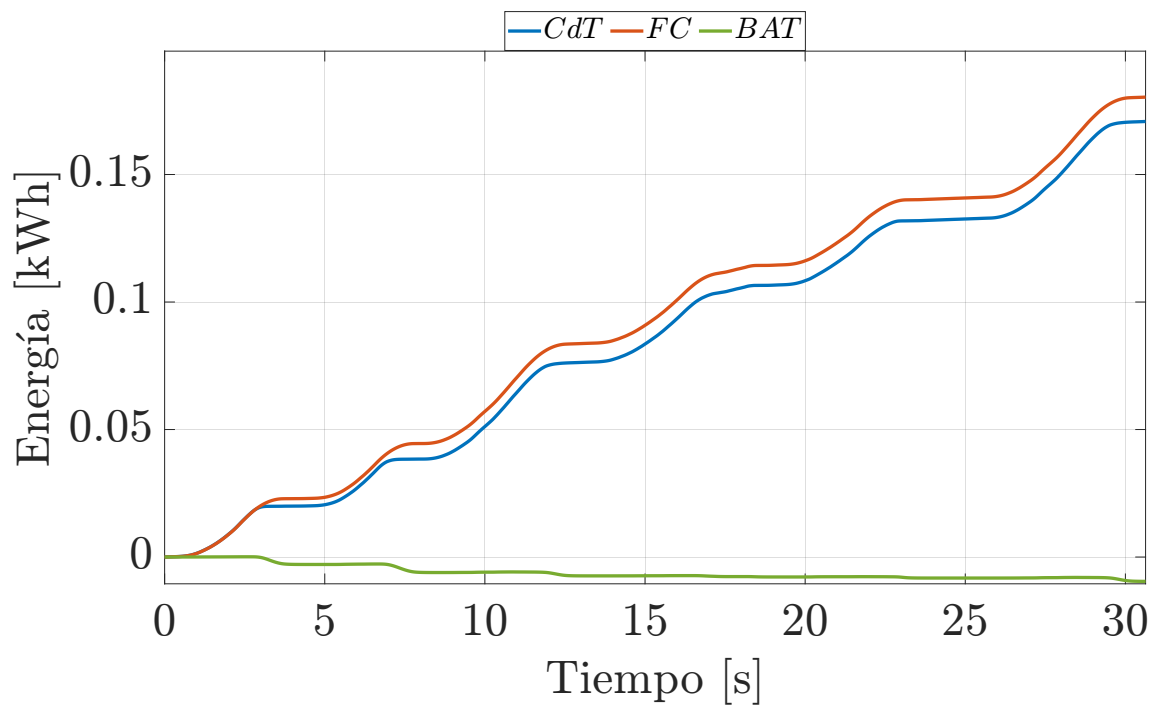


Figura 6.2: Evolución de la energía del sistema utilizando la topología FC y BAT con el ciclo de trabajo 1: Pala cargadora en "V".

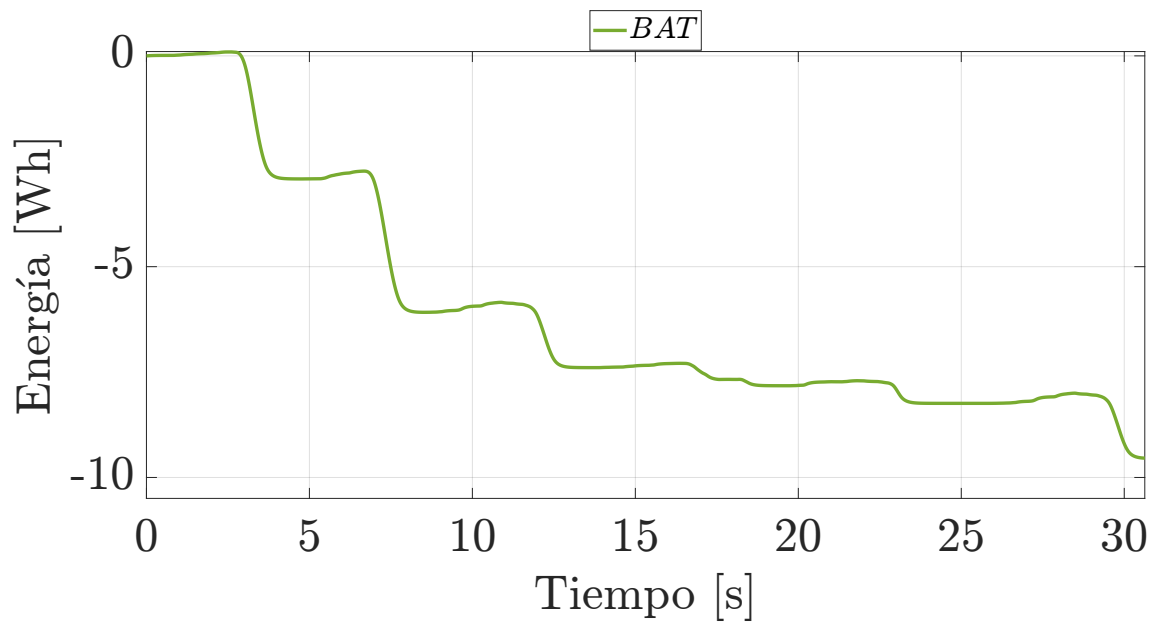


Figura 6.3: Evolución de la energía de las baterías utilizando la topología FC y BAT con el ciclo de trabajo 1: Pala cargadora en "V".

En la Figura 6.1, se observa que, en esta topología y ciclo de trabajo específico, la mayor parte de la potencia es suministrada por la pila de combustible (FC), mientras que la batería desempeña un papel significativo en momentos críticos cuando el ciclo de trabajo (CdT) experimenta disminuciones abruptas. Este comportamiento queda reflejado en las Figuras 6.2 y 6.3, que detallan la dinámica de la energía del sistema. Nuevamente, se evidencia que la FC es la principal fuente de energía en este escenario.

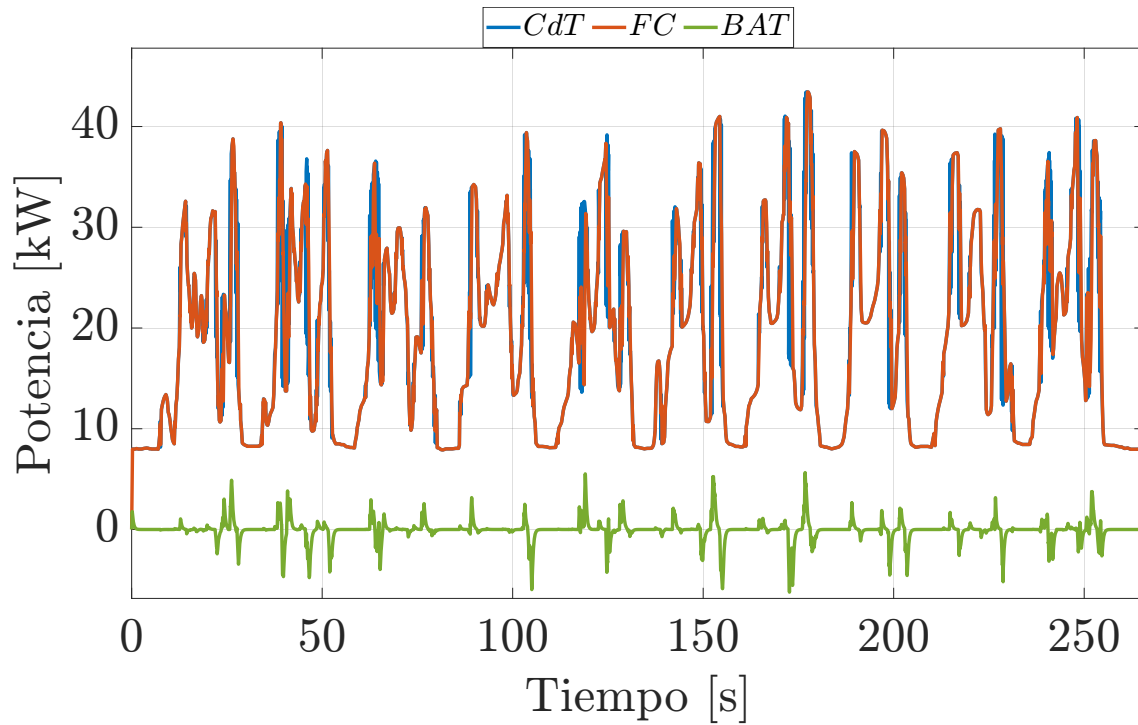


Figura 6.4: Evolución de la potencia del sistema utilizando la topología *FC* y *BAT* con el ciclo de trabajo 2: excavadora.

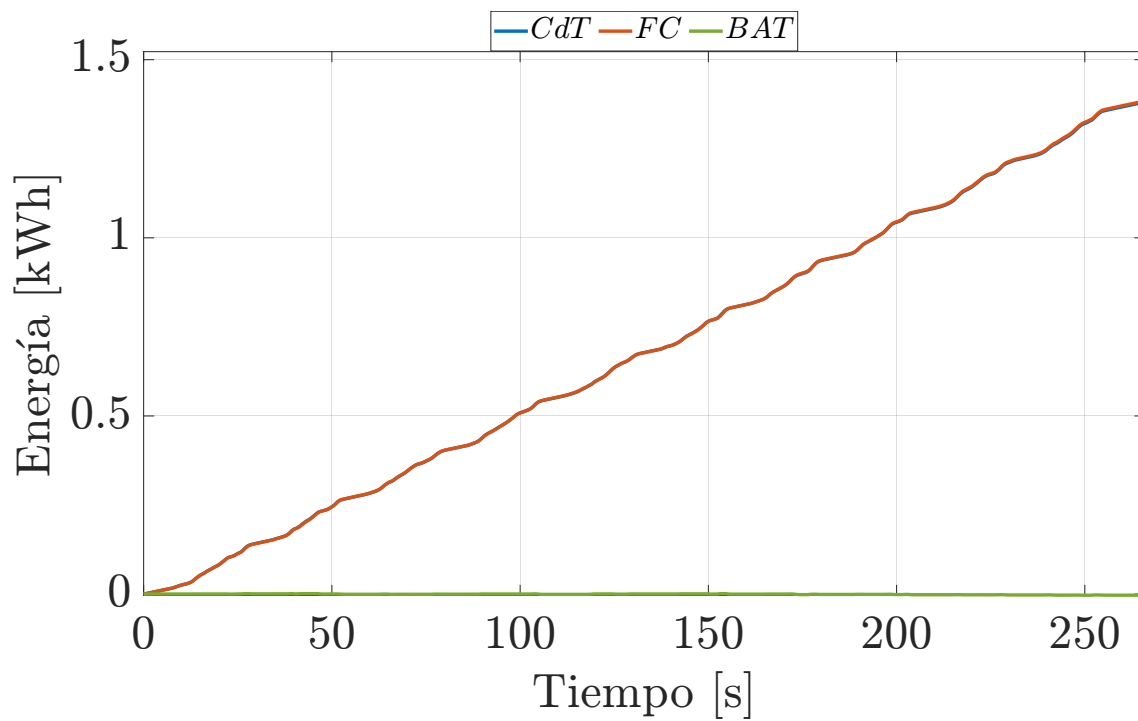


Figura 6.5: Evolución de la energía del sistema utilizando la topología *FC* y *BAT* con el ciclo de trabajo 2: excavadora.

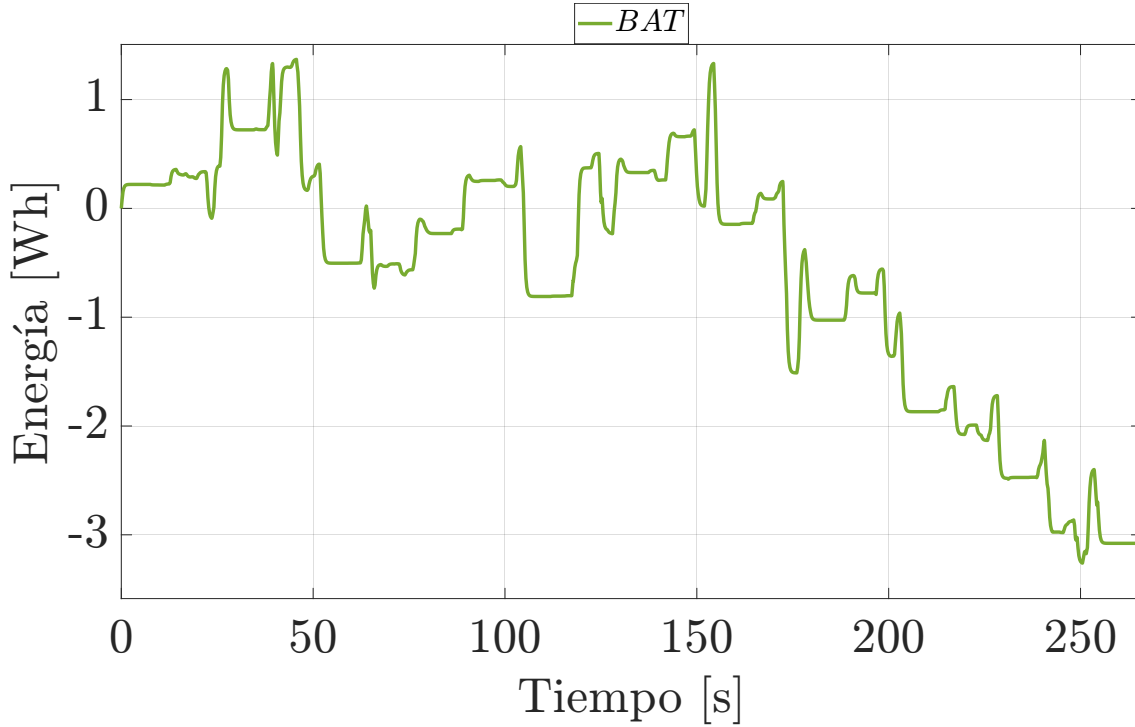


Figura 6.6: Evolución de la energía de las baterías utilizando la topología *FC* y *BAT* con el ciclo de trabajo 2: excavadora.

En la Figura 6.4, se evidencia que el ciclo de trabajo exhibe una mayor variabilidad, caracterizado por cambios más erráticos pero de ritmo más pausado. Este patrón permite que la pila de combustible (*FC*) suministre la mayor parte de la potencia, a excepción de las transiciones más rápidas, donde la batería entra en juego para garantizar una respuesta adecuada. Las Figuras 6.5 y 6.6 destacan un fenómeno interesante: la energía de la batería muestra valores negativos, indicando que se está cargando con el paso del tiempo.

Tabla 6.3: Resultado de las simulaciones con la topología *FC* y *BAT*.

	<i>CdT</i> 1: Pala cargadora en "V"	<i>CdT</i> 2: Excavadora
$P_{CdT\ max}$ [kW]	54,11	43,44
$E_{CdT\ max}$ [kWh]	0,17	1,38
$P_{FC\ max}$ [kW]	53,91	43,44
$E_{FC\ max}$ [kWh]	0,18	1,38
$P_{BAT\ max}$ [kW]	1,35	5,65
$P_{BAT\ min}$ [kW]	-16,63	-6,22
$E_{BAT\ max}$ [kWh]	0,00010	0,0014
$E_{BAT\ min}$ [kWh]	-0,0095	-0,0033
$Masa_{H_2}$ [kg]	1,6121	1,4680

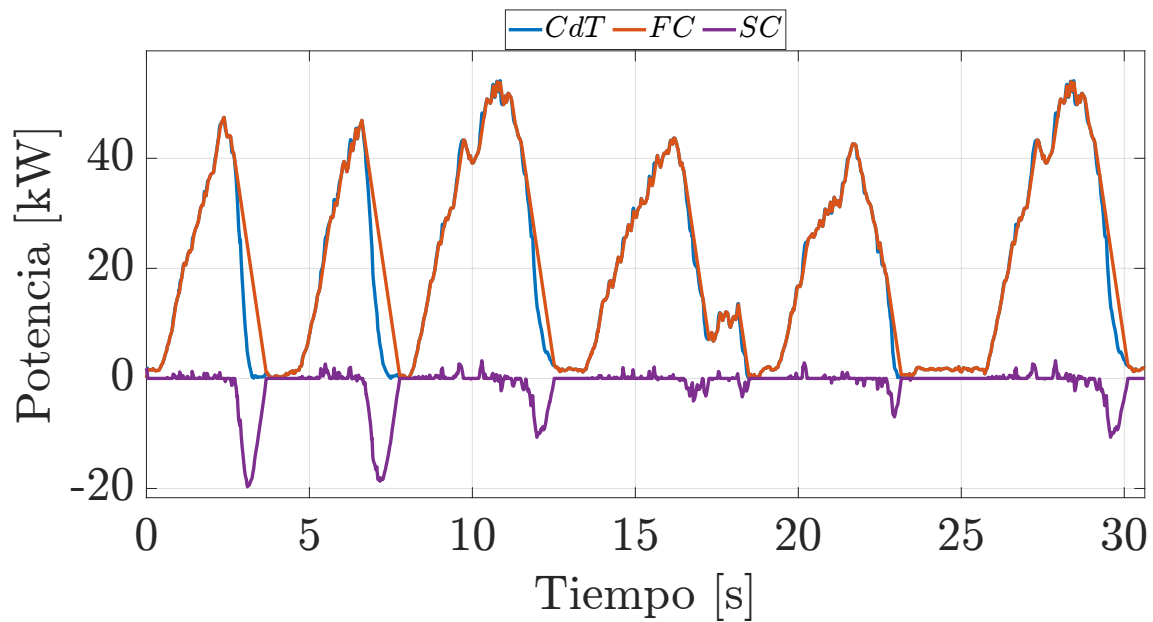
6.0.2. $FC + SC$ 

Figura 6.7: Evolución de la potencia del sistema utilizando la topología FC y SC con el ciclo de trabajo 1: Pala cargadora en "V".

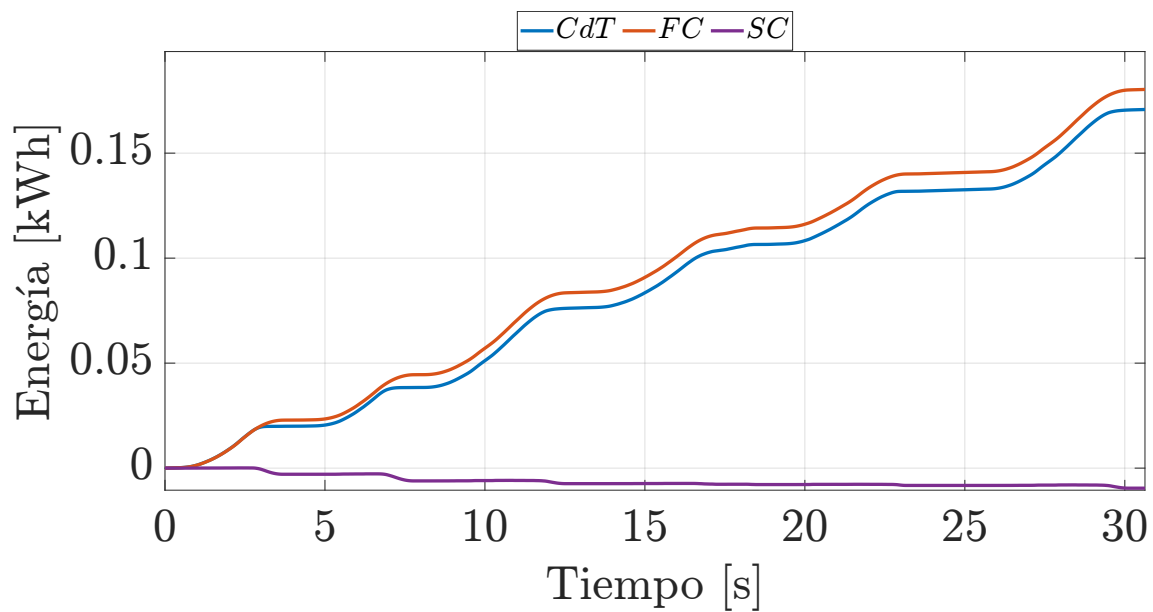


Figura 6.8: Evolución de la energía del sistema utilizando la topología FC y SC con el ciclo de trabajo 1: Pala cargadora en "V".

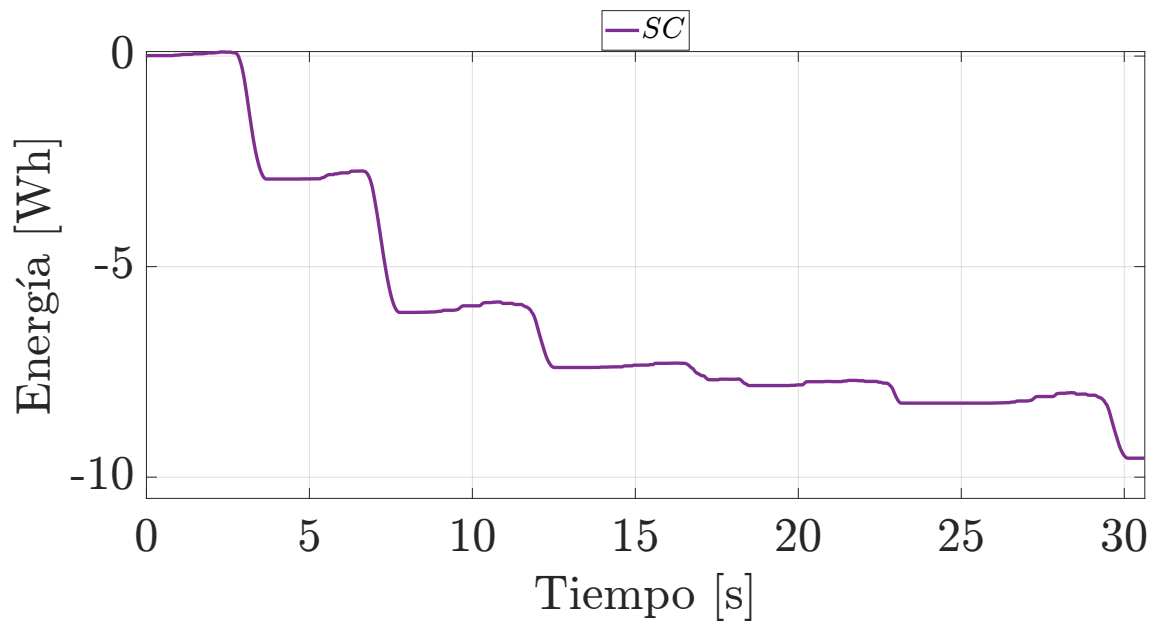


Figura 6.9: Evolución de la energía de los supercapacitores utilizando la topología *FC* y *SC* con el ciclo de trabajo 1: Pala cargadora en "V".

En cuanto a la potencia y la energía, los resultados de esta topología son prácticamente idénticos a los de la sección 6.0.1. En la Figura 6.7, se puede apreciar sutilmente un ligero aumento en los picos de potencia de los supercapacitores (*SC*), atribuible a su dinámica más rápida.

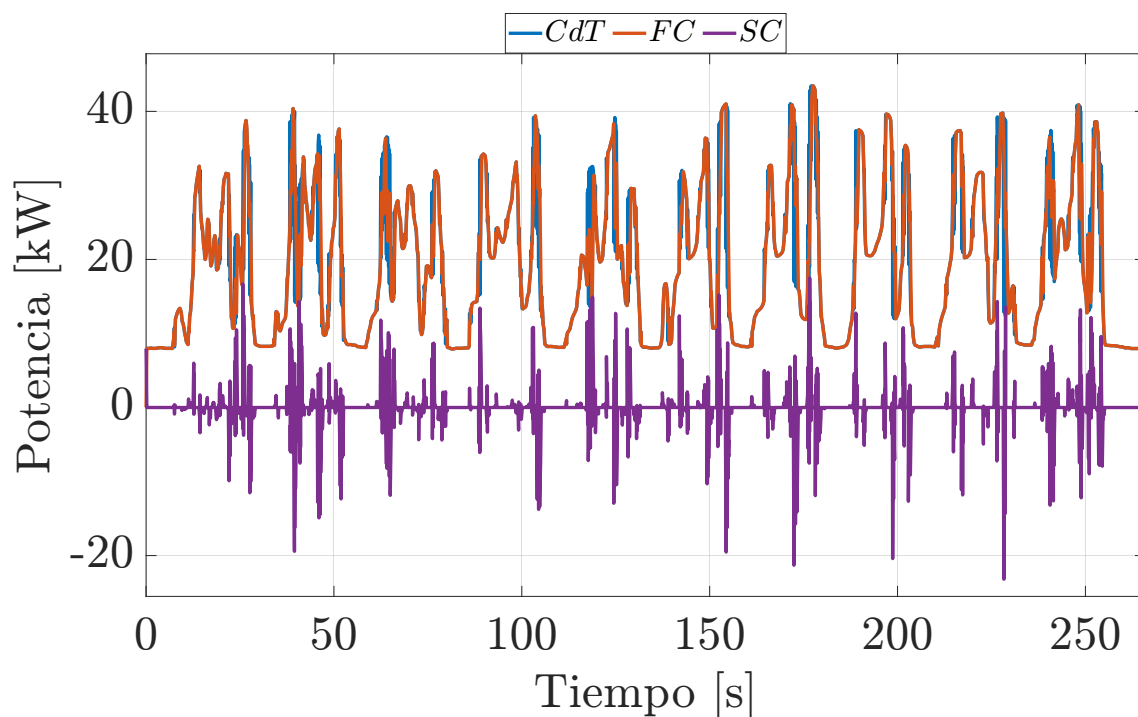


Figura 6.10: Evolución de la potencia del sistema utilizando la topología *FC* y *SC* con el ciclo de trabajo 2: excavadora.

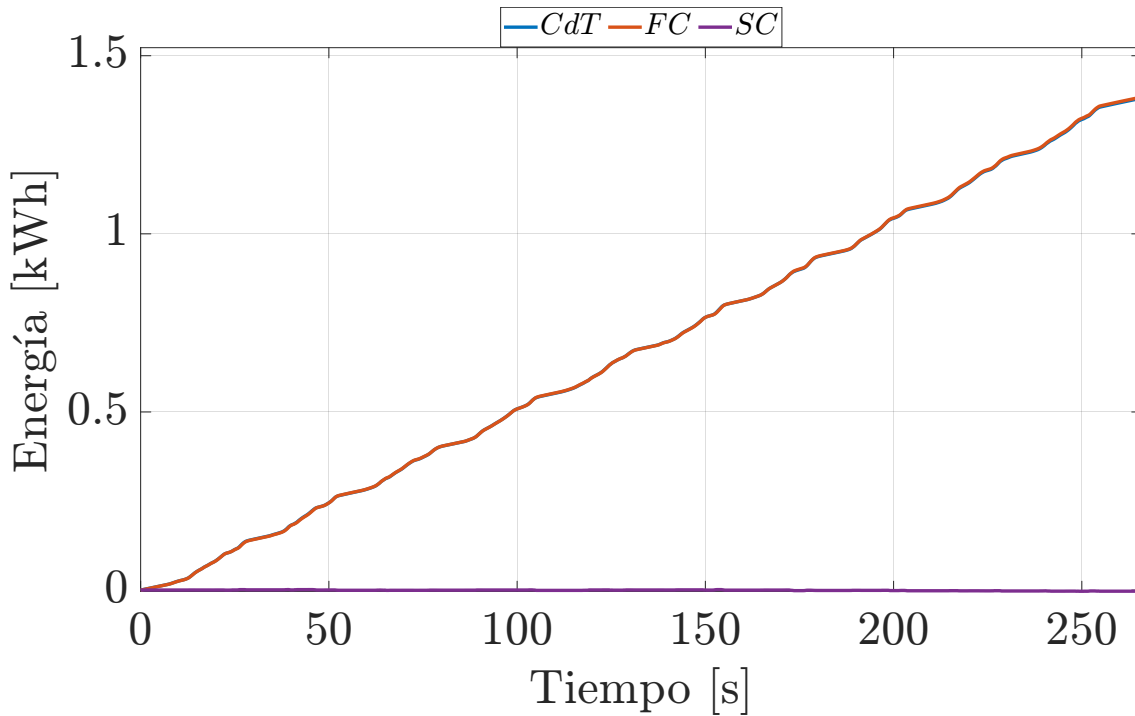


Figura 6.11: Evolución de la energía del sistema utilizando la topología *FC* y *SC* con el ciclo de trabajo 2: excavadora.

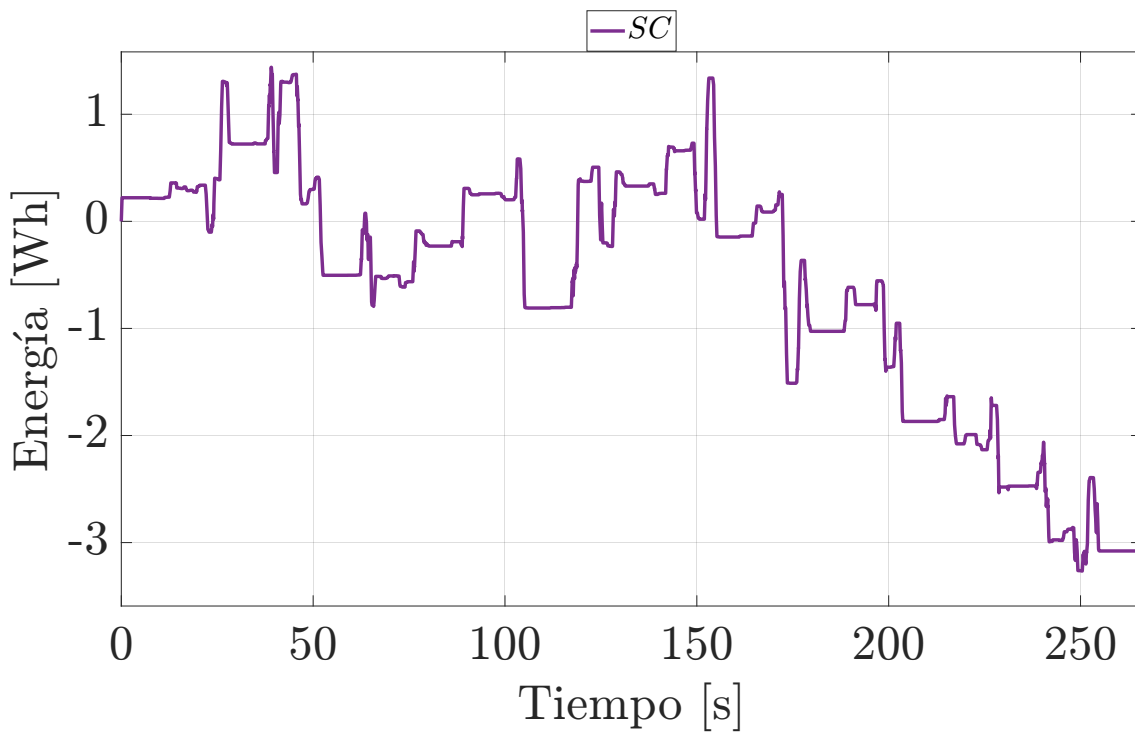


Figura 6.12: Evolución de la energía de los supercapacitores utilizando la topología *FC* y *SC* con el ciclo de trabajo 2: excavadora.

Al comparar la Figura 6.4 con la Figura 6.10, se observa un cambio significativo en el

comportamiento de las baterías (*BAT*) en relación con los supercapacitores (*SC*) durante este ciclo de trabajo. Este cambio resulta en que los supercapacitores logren picos de potencia superiores a los de la topología con baterías, gracias a su respuesta dinámica. Sin embargo, este efecto no es evidente en los gráficos de energía de las Figuras 6.11 y 6.12 debido a la breve duración de los picos de potencia.

Tabla 6.4: Resultado de las simulaciones con la topología *FC* y *SC*.

	<i>CdT</i> 1: Pala cargadora en "V"	<i>CdT</i> 2: Excavadora
$P_{CdT\ max}$ [kW]	54,11	43,44
$E_{CdT\ max}$ [kWh]	0,17	1,38
$P_{FC\ max}$ [kW]	53,91	43,43
$E_{FC\ max}$ [kWh]	0,18	1,38
$P_{SC\ max}$ [kW]	3,22	17,50
$P_{SC\ min}$ [kW]	-19,70	-23,19
$E_{SC\ max}$ [kWh]	0,00010	0,0014
$E_{SC\ min}$ [kWh]	-0,0095	-0,0033
$Masa_{H2}$ [kg]	1,6121	1,4680

6.0.3. *FC* + *BAT* + *SC*

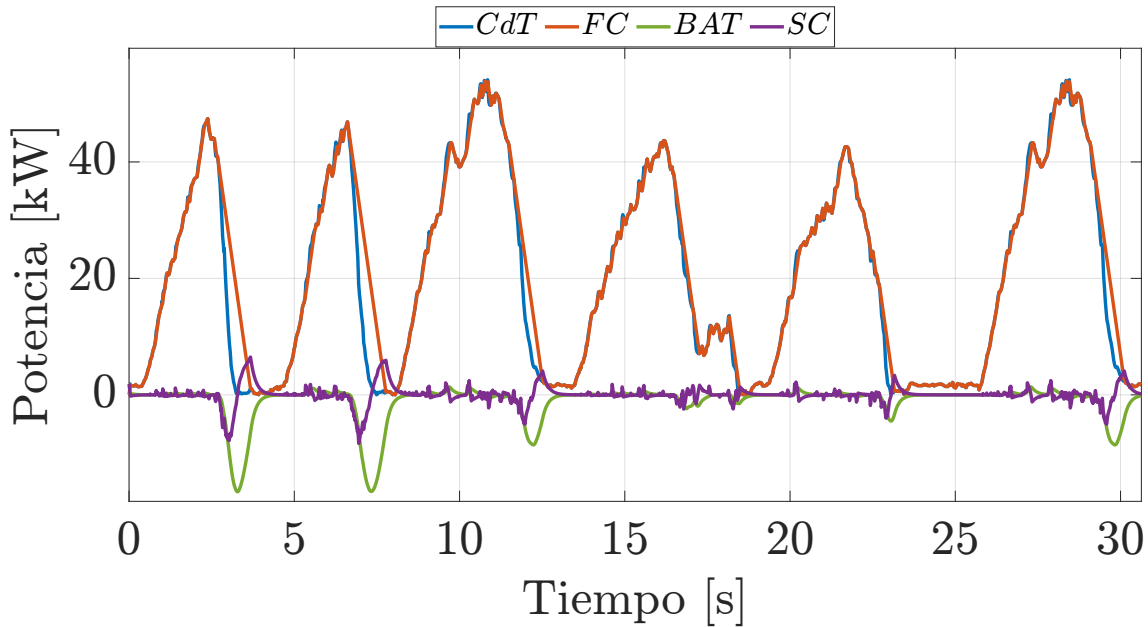


Figura 6.13: Evolución de la potencia del sistema utilizando la topología *FC*, *BAT* y *SC* con el ciclo de trabajo 1: Pala cargadora en "V".

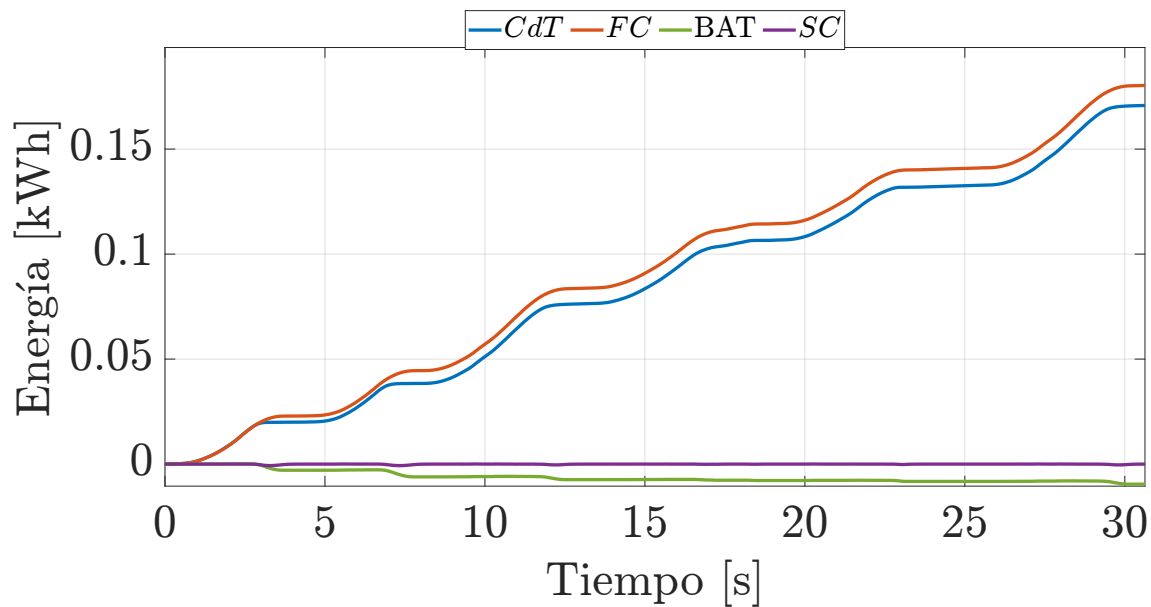


Figura 6.14: Evolución de la energía del sistema utilizando la topología FC , BAT y SC con el ciclo de trabajo 1: Pala cargadora en "V".

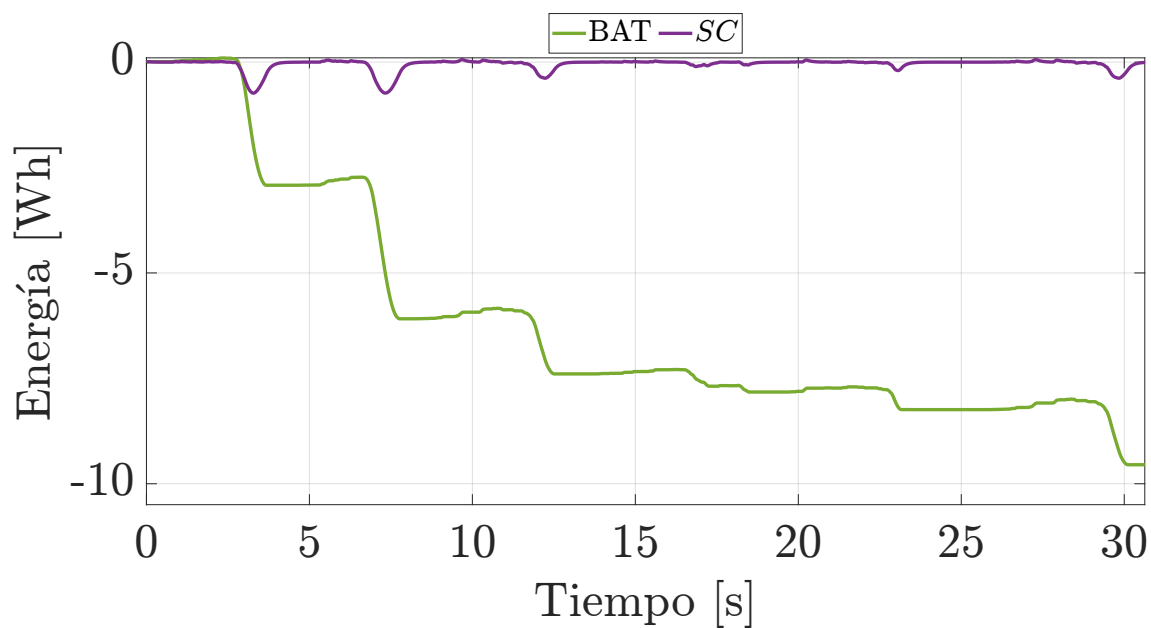


Figura 6.15: Evolución de la energía de las baterías y supercapacitores utilizando la topología FC , BAT y SC con el ciclo de trabajo 1: Pala cargadora en "V".

Al combinar las tres fuentes de alimentación, se evidencia lo que las baterías no pueden suministrar por sí solas. Aunque en este ciclo de trabajo no sea muy pronunciado, es perceptible. Este efecto es aún más tenue en los gráficos de energía de las Figuras 6.14 y 6.15.

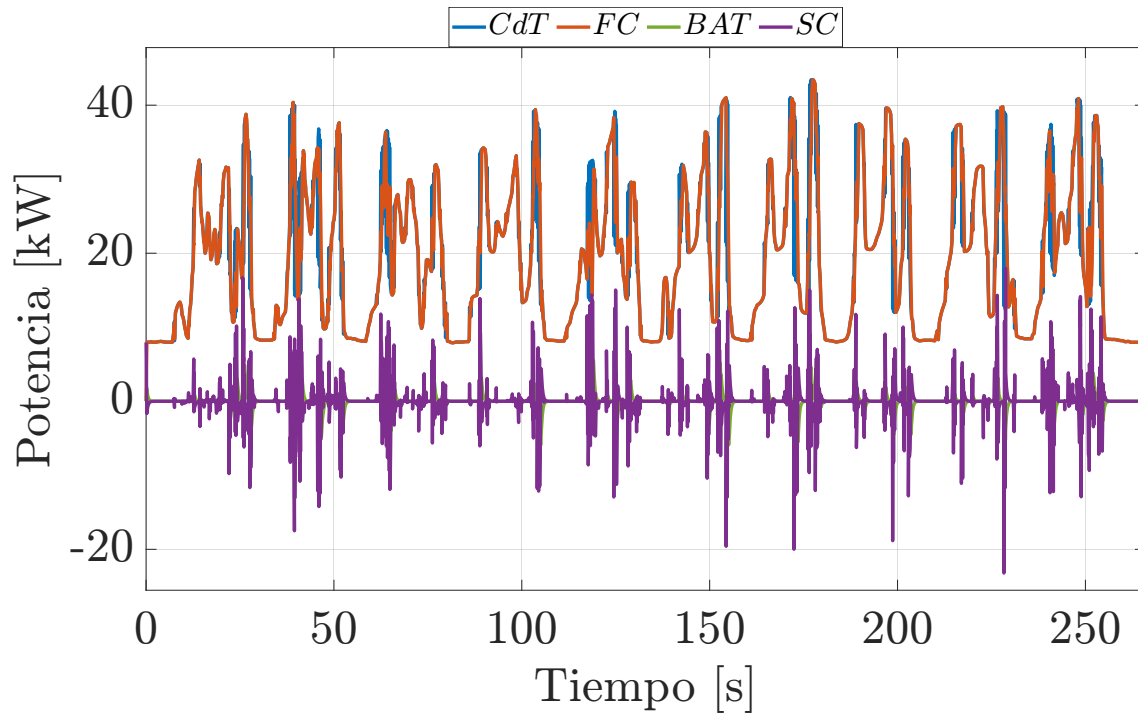


Figura 6.16: Evolución de la potencia del sistema utilizando la topología FC , BAT y SC con el ciclo de trabajo 2: excavadora.

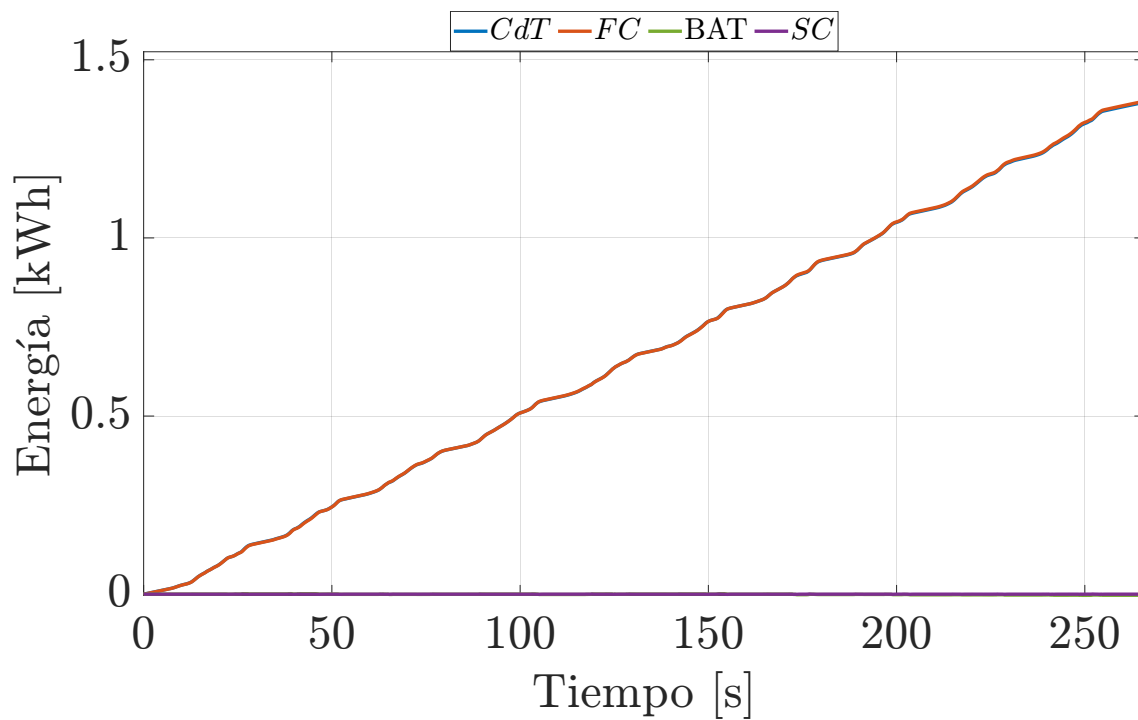


Figura 6.17: Evolución de la energía del sistema utilizando la topología FC , BAT y SC con el ciclo de trabajo 2: excavadora.

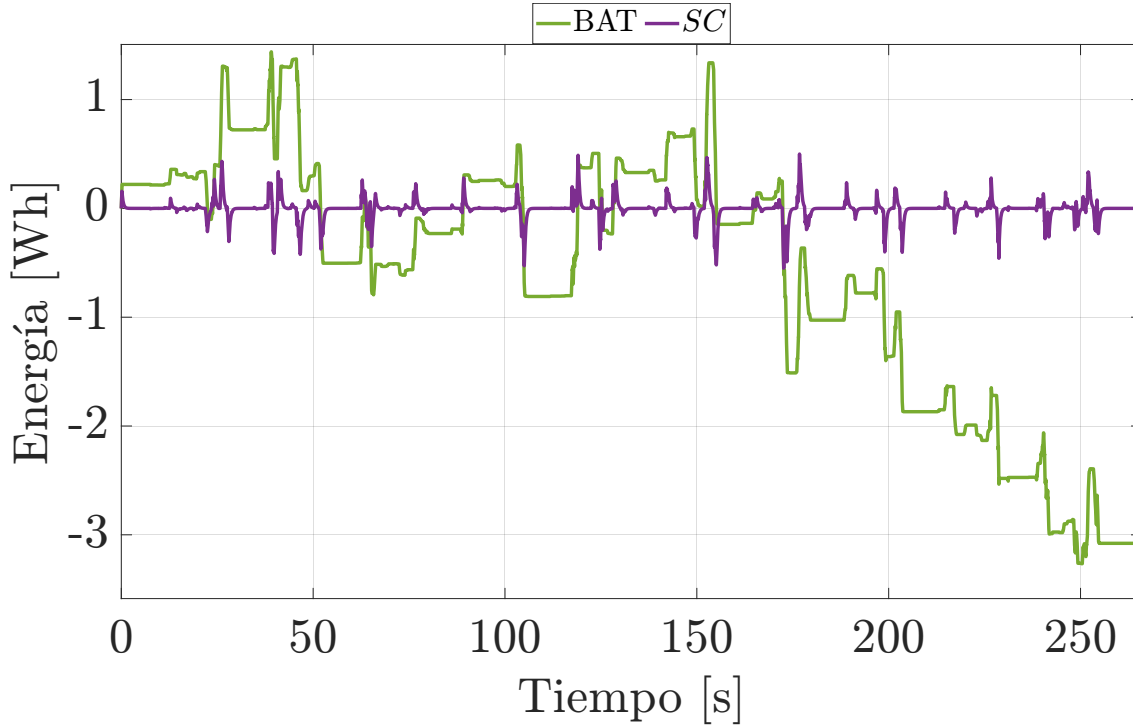


Figura 6.18: Evolución de la energía de las baterías y supercapacitores utilizando la topología FC , BAT y SC con el ciclo de trabajo 2: excavadora.

En el gráfico de la Figura 6.16, se aprecia claramente que los cambios de potencia en este ciclo de trabajo son más evidentes, ya que la potencia de los SC llega a superar a la de las baterías en algunos puntos. Sin embargo, para la energía, este efecto es casi imperceptible, como se observa en las Figuras 6.17 y 6.18.

Tabla 6.5: Resultado de las simulaciones con la topología FC , BAT y SC .

	CdT 1: Pala cargadora en "V"	CdT 2: Excavadora
$P_{CdT\ max}$ [kW]	54,11	43,44
$E_{CdT\ max}$ [kWh]	0,17	1,38
$P_{FC\ max}$ [kW]	53,91	43,44
$E_{FC\ max}$ [kWh]	0,18	1,38
$P_{BAT\ max}$ [kW]	1,35	5,65
$P_{BAT\ min}$ [kW]	-16,63	-6,22
$E_{BAT\ max}$ [kWh]	0,00010	0,0014
$E_{BAT\ min}$ [kWh]	-0,0095	-0,0033
$P_{SC\ max}$ [kW]	6,49	17,94
$P_{SC\ min}$ [kW]	-8,34	-23,21
$E_{SC\ max}$ [kWh]	0,0001	0,0005
$E_{SC\ min}$ [kWh]	-0,0007	-0,0005
$Masa_{H2}$ [kg]	1,6121	1,4680

En las tablas 6.3, 6.4 y 6.5 se muestra que, dependiendo de la topología, la mayor potencia suministrada por las baterías y/o supercapacitores se produce durante la rege-

neración de potencia en el sistema. Esta potencia proviene de la FC , ya que el ciclo de trabajo disminuye más rápido de lo que la FC puede disminuir, la cual es utilizada por las BAT y/o SC para cargarse. Sin embargo, se observa en las Figuras 6.3, 6.6, 6.9, 6.12, 6.15 y 6.18 que al final del ciclo de trabajo, las BAT y/o SC terminan con energía negativa, lo que indica que acumulan más energía de la que necesitan. Esto puede ser problemático en situaciones en las que estos elementos comiencen el ciclo de trabajo totalmente cargados, ya que se requerirá una carga eléctrica adicional para disipar el exceso de energía o que el sistema de gestión de energía primeramente utilice esta energía al comienzo del ciclo.

Una vez obtenido los resultados de energía y potencia para cada CdT y cada topología, se va a evaluar cada opción para comprobar si esta logra abastecer de energía y potencia en ambos ciclos de trabajo en su propia topología.

En primer lugar se evalúa la opción más óptima de las tablas 6.1 y 6.2 que corresponde a la topología $FC + SC$ del CdT 1, esta consta de una pila de combustible Toyota: Gen 2 Horizontal y 3 Supercapacitores LSMtron: 0166F EA DC, que entre los 3 cuentan con 21,87 [kW] de potencia y energía de 0,16 [kWh] 4.5. En la Tabla 6.4 se ve que en el segundo CdT la máxima potencia que entrega el supercapacitor es de 23,19[kW], que es superior a la potencia de esta configuración de SC , por lo que esta configuración queda descartada por no poder suplir ambos ciclos de trabajo.

Se va a estudiar la factibilidad de la segunda opción, cuyo volumen es menor, que corresponde a la topología $FC + BAT$ del CdT 2 que tiene un volumen de 0,381 [m^3], esta está conformada por una pila de combustible Toyota: Gen 2 Horizontal y una batería Smart Propel: 144V120A , que tiene 8,64[kW] de potencia y energía de 17,28[kWh] 4.4. En la Tabla 6.3, en el ciclo de trabajo 1, la potencia máxima de la batería es 16,63 [kW], por lo que esta combinación tampoco es apta porque no logra satisfacer de potencia ambos ciclos de trabajos.

La tercera configuración, pertenece a la topología $FC + SC$ del CdT 2, cuyo volumen de 0,385 [m^3] es el menor. La FC vuelve a ser Toyota: Gen 2 Horizontal, además hay 4 supercapacitores LSMtron: 0166F EA DC, que entre los 4 logran obtener 29,16 [kW] de potencia y energía de 0,22[kWh]. La potencia máxima de los supercapacitores del ciclo de trabajo 1 es 19,70 [kW] y la energía es 0,0095[kWh]. Por lo que se puede ver que esta configuración si logra abastecer de potencia y energía ambos CdT , por lo que va a ser la opción escogida para el tren de propulsión.

De acuerdo con la Tabla 4.5, si se trabajara de forma continua durante una hora con el ciclo de trabajo 1, se utilizarían 1,612[kg] de hidrógeno, mientras que en el segundo ciclo de trabajo, se consumirían 1,468[kg]. El tanque de hidrógeno seleccionado en el capítulo 4 almacena hasta 4,6[kg] de hidrógeno, lo que significa que, con dos tanques, se podría utilizar el ciclo de trabajo 1 durante 5 horas y 42 minutos y el segundo ciclo de trabajo durante 6 horas y 16 minutos. Dado que el operario no trabajara con la retroexcavadora durante las 8 horas completas de su turno, el consumo de hidrógeno dependerá de la duración real del uso de la máquina. Por lo tanto, se considera adecuado un período de aproximadamente 6 horas de uso continuo para un turno de 8 horas de trabajo.

En cuanto al convertidor DC/DC , será necesario diseñar uno a medida, específicamente un convertidor *boost*, para elevar la tensión de los supercapacitores de 48,6[V] a 700[V], que es la salida requerida por la FC y va a ser la tensión del BUS DC.

Finalmente, el tren de propulsión seleccionado es de topología $FC + SC$, que consta

de la *FC* Toyota Gen 2 Horizontal y 4 *SC* LSMtron: 0166F EA DC. Además, se incluyen 2 inductores, uno para la *FC* y otro para los *SC*, con el propósito de filtrar la corriente de estos componentes, se considera el motor Emrax 268, el inversor DTI HV-550AC, el inversor de los *SC* y 2 tanques de hidrógeno.

Tabla 6.6: Balance de masa y volumen del tren de propulsión.

	Componente	Masa [kg]	Volumen [m^3]
	Motor Diesel	-394	-0,436
	Tanque de combustible lleno	-190	-0,15
Sistema Mecánico	Tanque H2 lleno X2	167	0,382
	Motor	22	0,012
	Inversor	4,2	0,006
	Inductores X2	30	0,008
	Convertidor DC-DC	20	0,015
Sistema eléctrico	Toyota: Gen 2 Horizontal	246	0,39
	LSMtron: 0166F EA DC X4	57	0,056
Diferencia respecto a la masa y volumen original		-38.8	0,283

En la Tabla 6.6, se muestra la diferencia entre la masa y el volumen finales del tren de propulsión. Es importante destacar que los valores correspondientes al sistema mecánico tienen signo negativo debido a la eliminación de componentes del sistema de propulsión original. Lo más relevante es que el sistema final es $38,8[kg]$ más liviano que el sistema de propulsión Diésel. Sin embargo, es más voluminoso, con $0,283[m^3]$ adicionales en comparación con el sistema original. Si no se tuvieran en cuenta los tanques de hidrógeno, el sistema sería menos voluminoso que el original, pero dado que esta no es la situación, se requiere espacio adicional. Esto obliga a instalar los cilindros de hidrógeno fuera del chasis de la retroexcavadora. Por lo tanto, se opta por ubicarlos en el techo del vehículo, como se ilustra en la Figura 6.19. Esta ubicación presenta ventajas en caso de una posible fuga de hidrógeno, ya que este se eleva rápidamente, alejándose del operario, lo que proporcionará tiempo para que el operario tome las medidas adecuadas en caso de una emergencia. Sin embargo, esta ubicación requerirá un mayor sistema de tuberías para transportar el hidrógeno hasta la *FC*. También hay consideraciones que se alejan de los objetivos del trabajo como estudiar la estructura del techo para ver si resiste el peso o es necesario alguna intervención, ver si es necesario agregarle una caja de seguridad por posible golpes, entre otras medidas de contingencia.

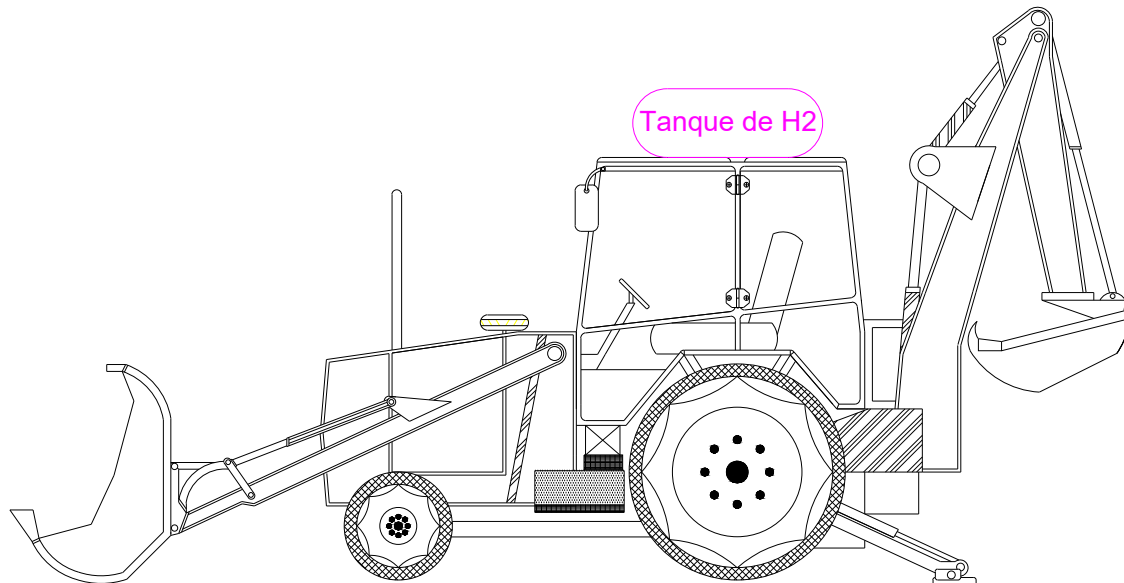


Figura 6.19: Ubicación de los tanques de hidrógeno en el techo del vehículo.

6.1. Resultados de la distribución de los componentes del tren de propulsión dentro del espacio utilizado

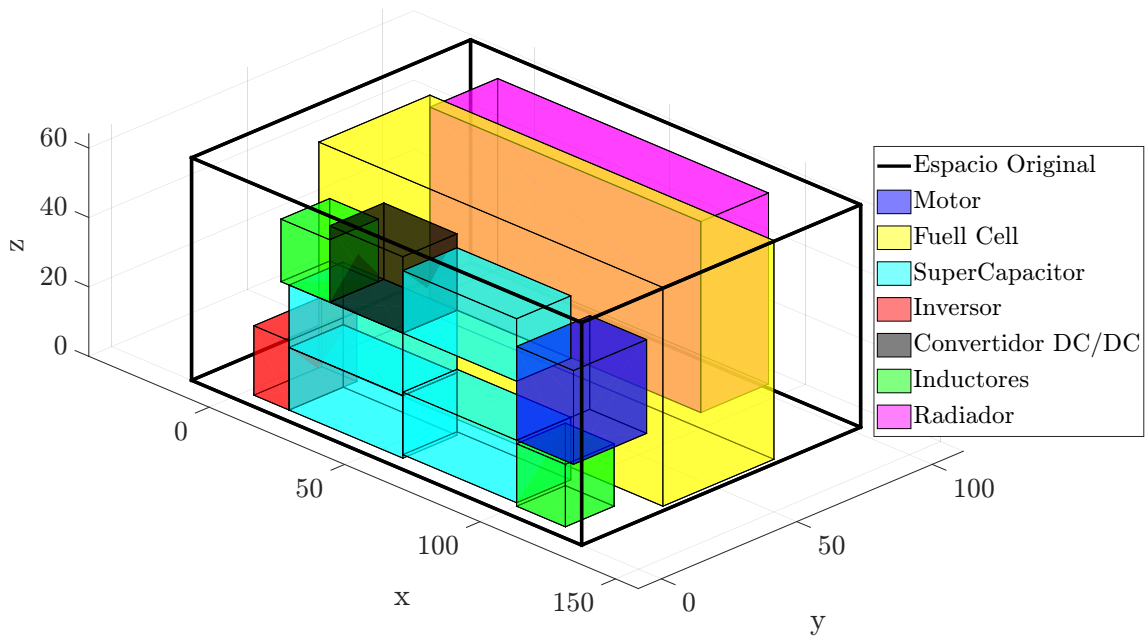
En la Tabla 6.7 se presenta el volumen de la *bounding box* generada por todos los elementos del tren de propulsión, las coordenadas del nuevo centro de masa y su diferencia con respecto al centro de masa original. Esto para los casos en donde el primer objeto iterado es *FC*, *SC*, inversor, convertidor *DC/DC* e inductor.

Tabla 6.7: Resultados de la distribución de los componentes.

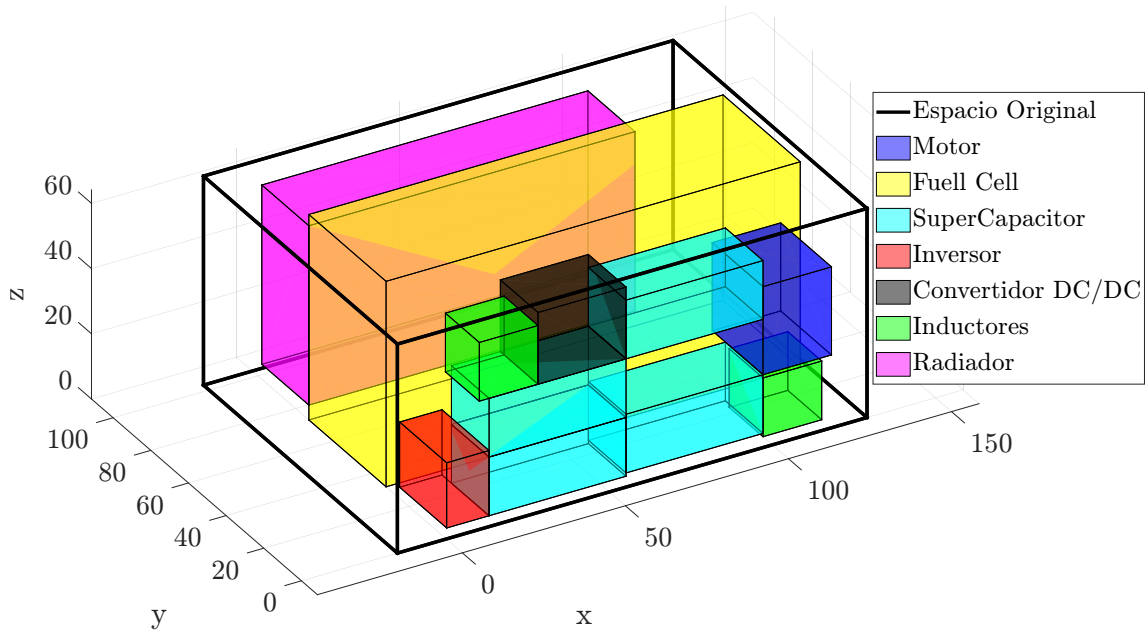
	<i>FC</i>	<i>SC</i>	Inversor	Convertidor <i>DC/DC</i>	Inductor
Volumen Bounding Box [m^3]	0,544	0,544	0,544	0,544	0,688
Coordenada del eje <i>x</i> del centro de masa [cm]	63,774	63,937	64,240	64,598	68,363
Coordenada del eje <i>y</i> del centro de masa [cm]	39,664	39,664	39,664	39,664	52,409
Coordenada del eje <i>z</i> del centro de masa [cm]	30,466	30,294	29,253	29,803	31,218
ΔCM [cm]	146,622	146,631	147,369	146,461	130,353

En las Figuras 6.20, 6.21, 6.22, 6.23 y 6.24 se muestra como es la distribución de los elementos en el espacio desde dos perspectivas distintas. En estas figuras el plano *xy* corresponde a una perspectiva vista desde arriba del vehículo y el eje *z* corresponde a la altura de este.

6.1.1. Iteración con *FC* como primer objeto



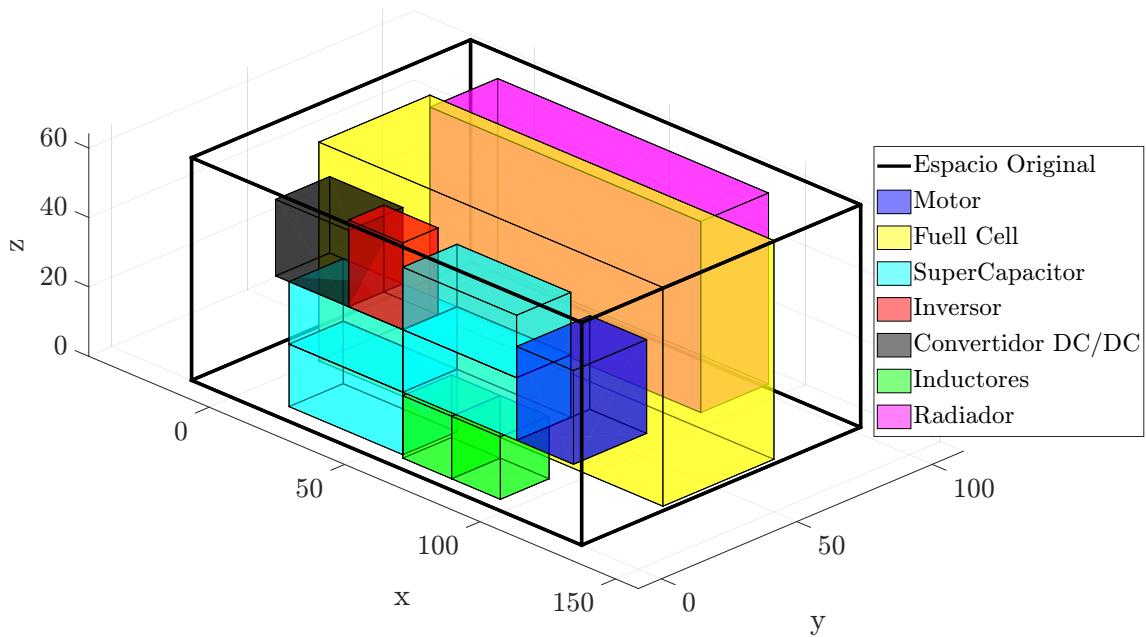
(a) Perspectiva 1.



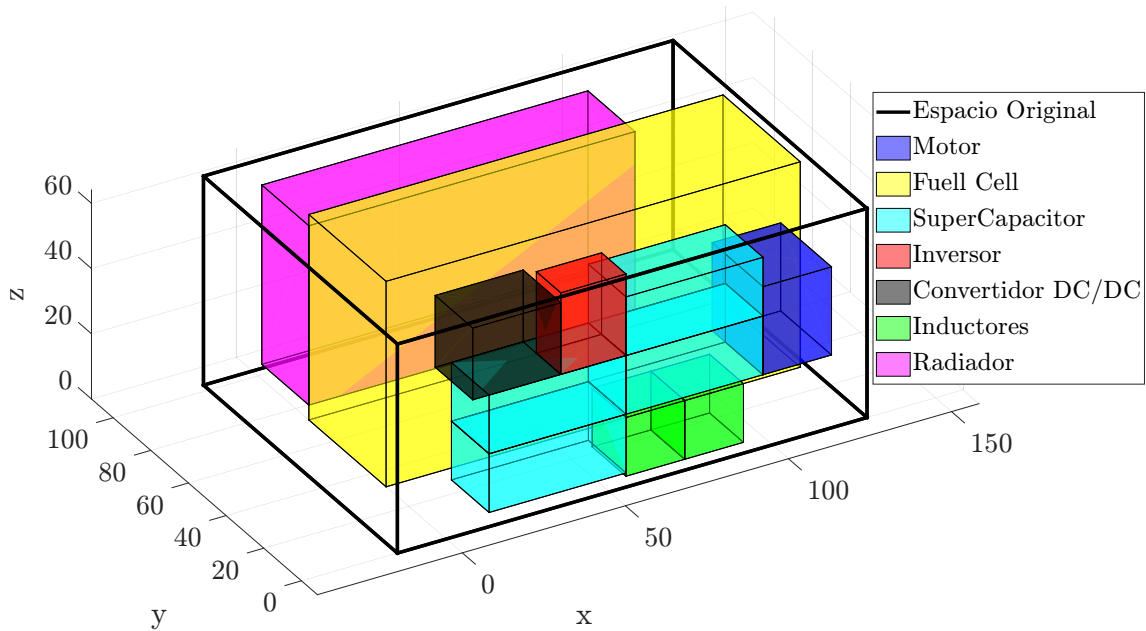
(b) Perspectiva 2.

Figura 6.20: Posicionamiento de los elementos del tren de propulsión cuando el primer elemento iterado es la *FC* desde distintas perspectivas.

6.1.2. Iteración con *SC* como primer objeto



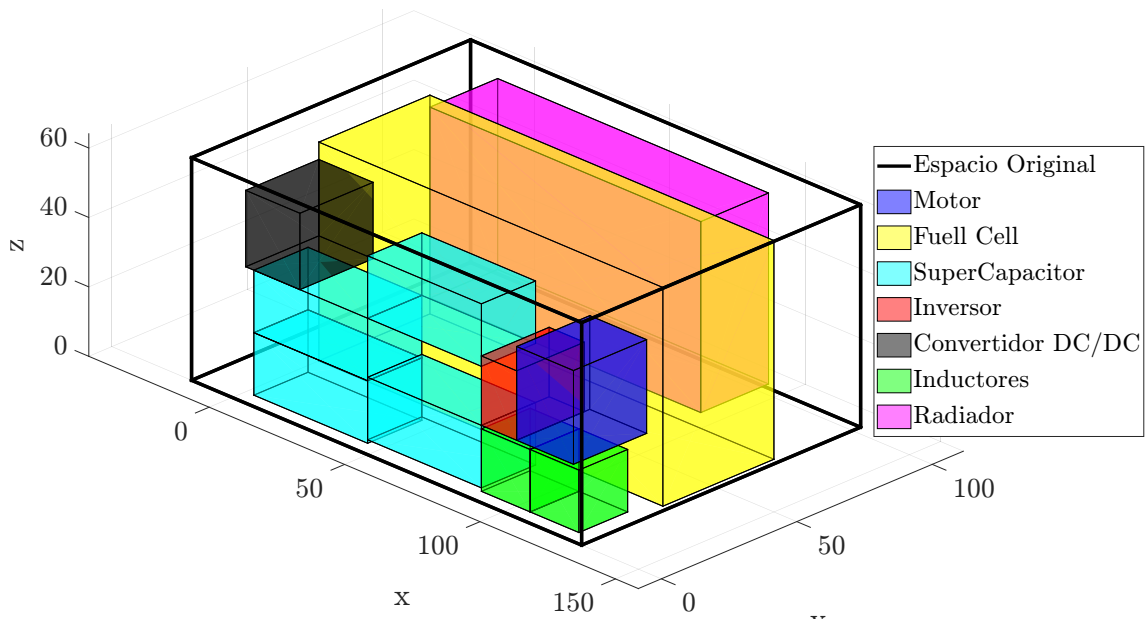
(a) Perspectiva 1.



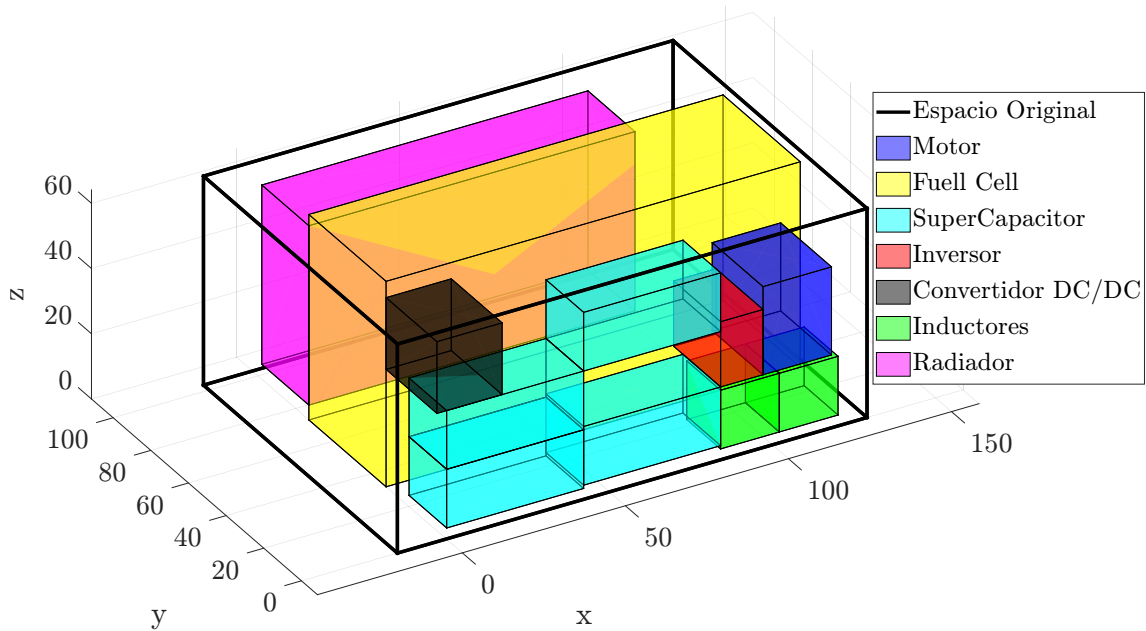
(b) Perspectiva 2.

Figura 6.21: Posicionamiento de los elementos del tren de propulsión cuando el primer elemento iterado es el *SC* desde distintas perspectivas.

6.1.3. Iteración con el inversor como primer objeto



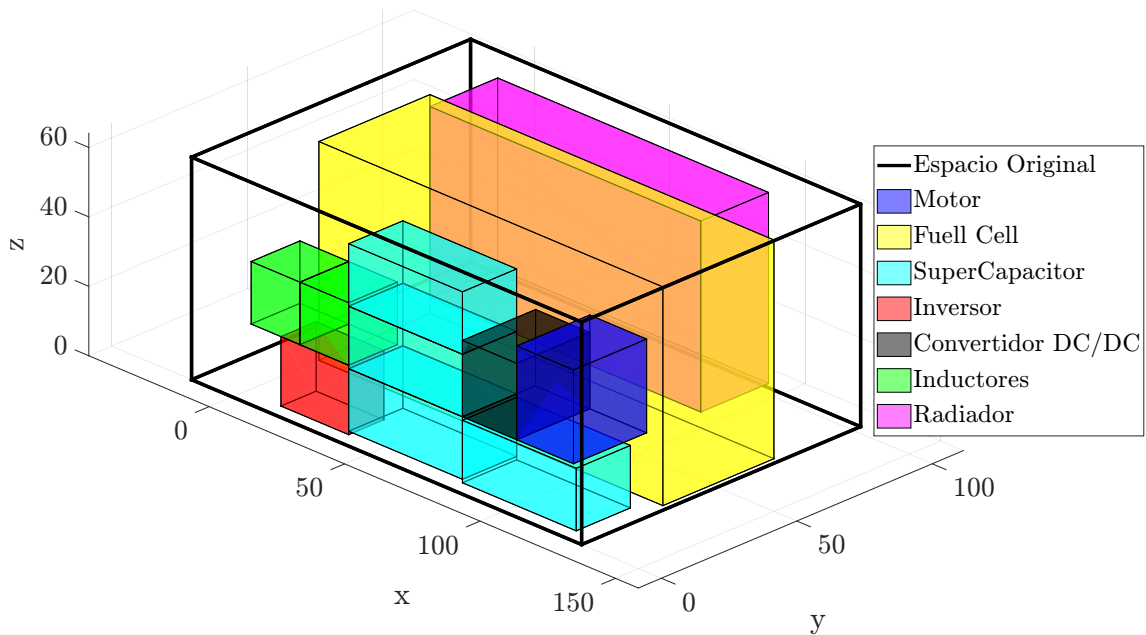
(a) Perspectiva 1.



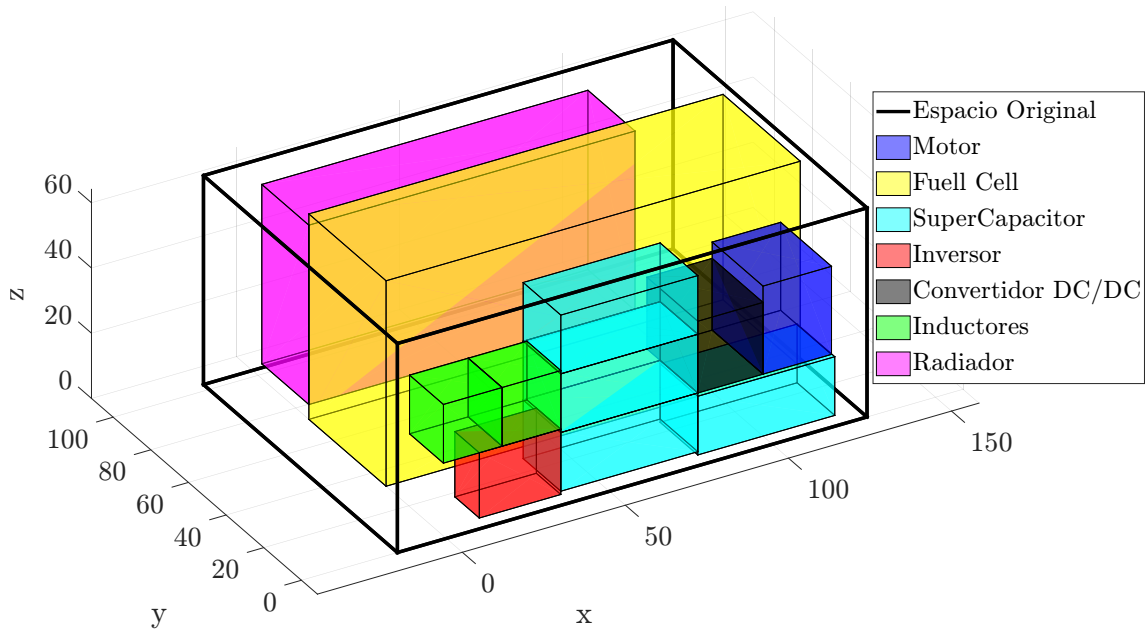
(b) Perspectiva 2.

Figura 6.22: Posicionamiento de los elementos del tren de propulsión cuando el primer elemento iterado es el inversor desde distintas perspectivas.

6.1.4. Iteración con el convertidor DC/DC como primer objeto



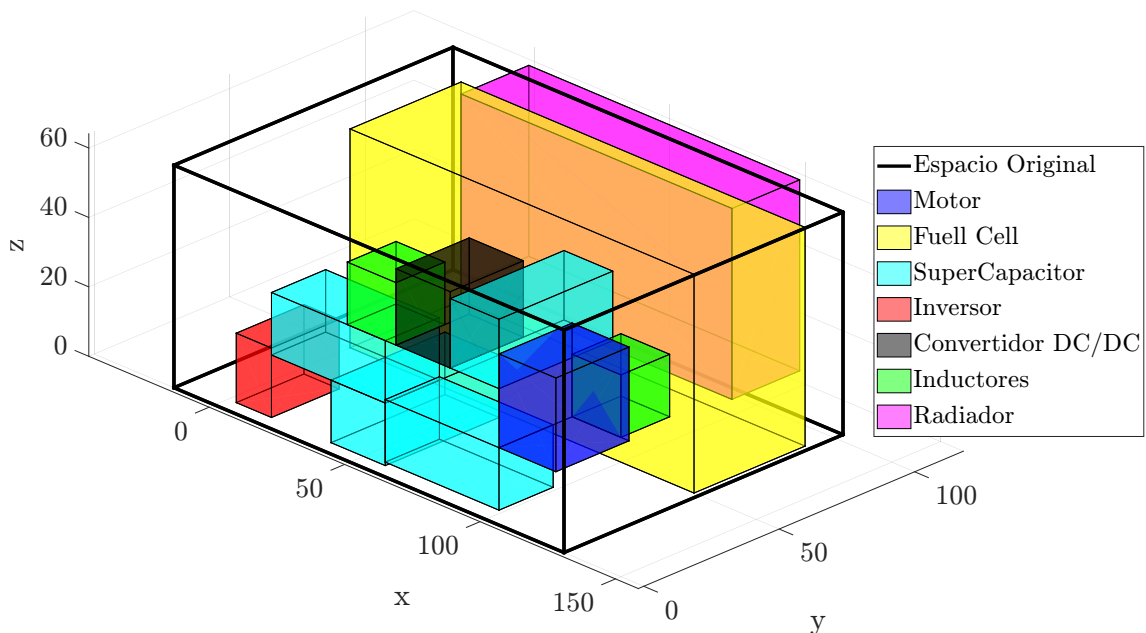
(a) Perspectiva 1.



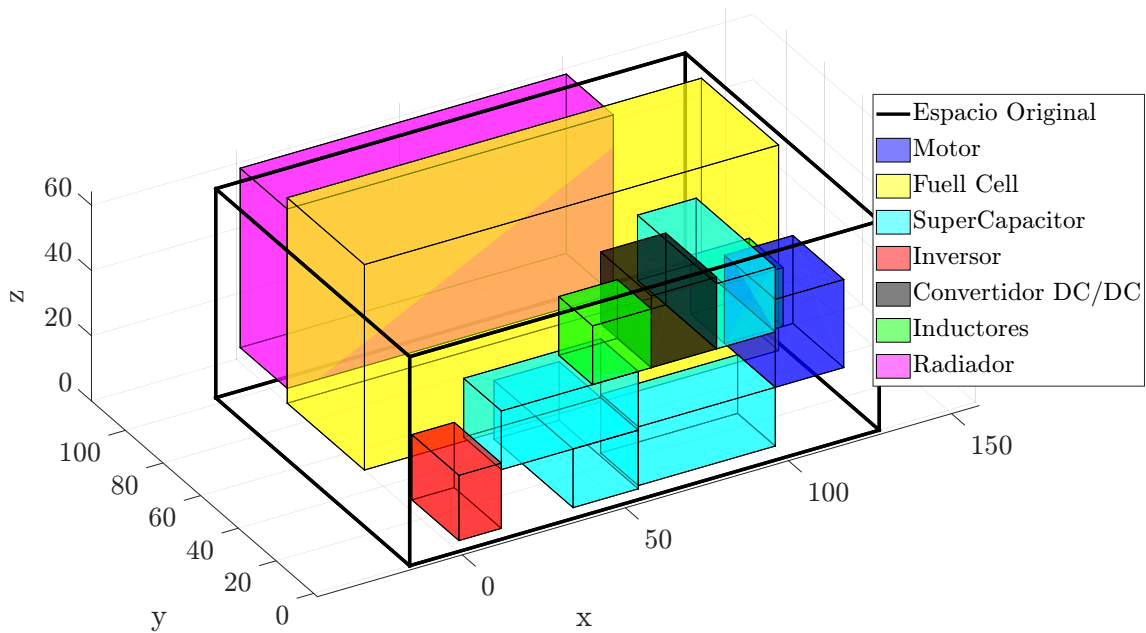
(b) Perspectiva 2.

Figura 6.23: Posicionamiento de los elementos del tren de propulsión cuando el primer elemento iterado es el convertidor DC/DC desde distintas perspectivas.

6.1.5. Iteración con inductor como primer objeto



(a) Perspectiva 1.



(b) Perspectiva 2.

Figura 6.24: Posicionamiento de los elementos del tren de propulsión cuando el primer elemento iterado es el inductor desde distintas perspectivas.

El radiador en este tren de propulsión cumple con el propósito de refrigerar la pila de combustible. Se opta por colocarlo en la parte superior del espacio. Esto se debe porque en la parte más cercana al origen del eje x de la FC , se encuentra la entrada de todo

el sistema de tuberías y cableado. Por lo tanto, es conveniente dejar espacio adicional en ese sector debido a la curvatura que podrían requerir estos. En Huang et al. [54], crean un sistema de refrigeración para un auto eléctrico con un ventilador acoplado al radiador, dado que el vehículo puede estar trabajando sin desplazarse, en este caso se va a usar lo mismo para forzar la ventilación. Al tener un ventilador en la parte superior, no solo va a ayudar a enfriar la pila de combustible, sino que también va a ayudar a mover la masa de aire caliente producto del trabajo del resto de los componentes.

Se puede apreciar en la Tabla 6.7 que el volumen de la *bounding box* de todas las configuraciones posibles es de $0,544[m^3]$, excepto cuando el primer objeto a iterar es el inductor, cuyo valor de *bounding box* aumenta a $0,688[m^3]$. De las 4 opciones que tienen el menor volumen, el convertidor *DC/DC* es el que tiene un centro masa más cercano al original con una diferencia de $146,461[cm]$. Por lo que esta va a ser la opción elegida para ubicar los elementos en el tren de propulsión. Cabe mencionar que el volumen de la *bounding box* es mayor que la suma de todos los elementos del tren de propulsión que se encuentran en la Tabla 6.6. Esto porque estos componentes no se encuentran en ningún orden, por lo que se deberá considerar como el volumen de la *bounding box* como el volumen final del sistema. Aunque para hacer comparaciones de forma correcta con otros trenes de propulsión es mejor utilizar el volumen que es la suma de los distintos componentes.

Capítulo 7

Conclusiones

En esta sección, se presentan las conclusiones derivadas del trabajo realizado en este proyecto de diseño de un tren de propulsión para una retroexcavadora basado en hidrógeno verde, utilizando dos procesos de optimización. Estos procesos han permitido la selección de componentes que minimizan tanto el volumen total como el tamaño de los elementos dentro de un espacio específico, representado por el capó del vehículo.

Se logro estudiar la operación y restricciones físicas de la retroexcavadora que para este proyecto fue el modelo WB146-5 de Komatsu, que cuenta con un motor de potencia bruta de $69[kW]$, una velocidad de $2200[rpm]$ y un torque máximo de $407[Nm]$. Se han definido dos ciclos de trabajo para la máquina, uno cuando opera como excavadora y otro cuando trabaja como cargadora frontal. En el primer caso, se considera solo la potencia hidráulica necesaria, mientras que en el segundo, se incluye tanto la potencia hidráulica como la requerida para el desplazamiento del vehículo y la carga. Con esto se pudo realizar un modelo simple para ver la energía y potencia para poder seleccionar los elementos del tren de propulsión.

El proceso de selección de componentes en el mercado incluyó la búsqueda de un motor que se asemejara a las características del motor original, con un enfoque en la minimización del volumen. El motor seleccionado es el Emrax 268, junto con el inversor correspondiente DTI HV-550AC. Se optó por los tanques de hidrógeno Iljin Hysolus de $115[L]$ debido a su capacidad de almacenamiento. Para las *FC*, *BAT* y *SC*, se realizó una lista de candidatos reales disponibles en el mercado.

La elección de los componentes se basó en los ciclos de trabajo específicos, lo que indica que una selección diferente de ciclos de trabajo podría llevar a una configuración de componentes diferente. Por lo tanto, la elección de un ciclo de trabajo adecuado es fundamental para lograr un dimensionamiento óptimo de los componentes del tren de propulsión.

El tren de propulsión finalmente seleccionado consiste en una *FC* Toyota Gen 2 Horizontal, 4 *SC* LSMtron: 066F EA DC, 2 tanques de hidrógeno Iljin Hysolus de $115[L]$ y 2 inductores. Este tren de propulsión tiene una masa de $546[kg]$ y un volumen de $0,869[m^3]$. El consumo máximo de hidrógeno en una hora fue de $1,6121[kg]$, lo que permite que el vehículo funcione de manera continua durante 5 horas y 42 minutos en el primer ciclo de trabajo, en cambio, en el segundo ciclo de trabajo, el hidrógeno dura 6 horas y 16 minutos.

En cuanto a la ubicación de los componentes dentro del vehículo, se utilizo un método

de optimización "voraz" con el fin de disminuir el volumen de la *boundign box* que generen los distintos elementos dentro del espacio. Con ello se lograron introducir todos los componentes a excepción de los tanque de hidrógeno, que se ubicaron en el techo.

Es importante mencionar que en el proceso de optimización no se consideró la masa que se agrega o elimina en comparación con el tren de propulsión original. Esto solo afecta cuando la retroexcavadora funciona como cargadora frontal o cuando se desplaza sin carga. En futuros trabajos, sería relevante incluir este factor en el análisis. También se debe considerar el diseño del piping y la curvatura de los cables dentro del espacio disponible, ya que esto puede tener un impacto en la disposición de los componentes.

Para estrategias de escalamiento es importante tener perfiles de ciclos de trabajo lo más parecidos al funcionamiento real del vehículo. Entre más real sea el ciclo de trabajo más apto va a estar el tren de propulsión para el trabajo que sea necesario. Esta metodología se puede expandir a distintos vehículos tanto *off-road* como *on-road* haciendo que sea muy versátil.

En resumen, este proyecto ha demostrado la importancia de seleccionar ciclos de trabajo adecuados y ha proporcionado una configuración de tren de propulsión eficiente y optimizada para una retroexcavadora basada en hidrógeno verde, la cual cumple con los requisitos de potencia y energía necesarios para su funcionamiento.

Bibliografía

- [1] A. Rufer, “The dream of efficient energy storage—from bess, kers & co to the hybrid power plant,” in *2017 19th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'17 ECCE Europe)*. IEEE, 2017, pp. P–1.
- [2] R. Flores, “Optimización de costos con restricción de confiabilidad en diseño de tren de propulsión de vehículo eléctrico en ambiente minero,” 2021.
- [3] *Shop Manual: WB146-5 Backhoe Loader*, Komatsu America Corp., USA, March 2010.
- [4] F. E. Mendes, D. I. Brandao, T. Maia, and J. C. Braz de Filho, “Off-road vehicle hybridization methodology applied to a tractor backhoe loader,” in *2019 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC)*, 2019, pp. 1–6.
- [5] F. Y. Wang, J. Zhang, R. F. Sun, and F. Yu, “Analysis on the performance of wheel loader in typical work cycle,” *Applied Mechanics and Materials*, vol. 148, pp. 526–529, 2012.
- [6] Maquinac. (2016) Maquinac. 17-10-2023. [Online]. Available: <https://maquinac.com/2016/06/michigan-presento-la-pala-retro-10020-4wd/>
- [7] EMRAX. (2023) Emrax 268 technical data. Recuperado el 10-07-2023. [Online]. Available: https://emrax.com/wp-content/uploads/2022/11/EMRAX_268_datasheet_A00.pdf
- [8] Hyfindr. (2023) Technical specifications. Recuperado el 10-07-2023. [Online]. Available: <https://hyfindr.com/marketplace/components/hydrogen-tanks/hydrogen-type-4-cylinder-700-bar-115l/>
- [9] O. Bethoux, “Hydrogen fuel cell road vehicles: state of the art and perspectives,” *Energies*, vol. 13, no. 21, p. 5843, 2020.
- [10] DTI. (2023) Hv-500 series high power inverter: User manual for hv-500. Recuperado el 10-07-2023. [Online]. Available: <https://drive.google.com/file/d/1YmuKWoceJfPi1yLu9l6GSZ0Io05rac8O/view>
- [11] Anónimo, “Italia registra temperaturas récord de hasta casi 47 grados centígrados,” *sputniknews*, Julio 2023. [Online]. Available: <https://sputniknews.lat/20230719/italia-registra-temperaturas-record-de-hasta-casi-47-grados-centigrados-1141697389.html>

- [12] Anónimo, “China rompe récord de temperatura: Alcanzó los 52°C,” *futuro360*, Julio 2023. [Online]. Available: https://www.futuro360.com/ciencia-en-ti/china-record-temperatura-cambio-climatico_20230717/
- [13] H. Lee, K. Calvin, D. Dasgupta, G. Krinner, A. Mukherji, P. Thorne, C. Trisos, J. Romero, P. Aldunce, K. Barrett *et al.*, “Ar6 synthesis report: Climate change 2023,” *Summary for Policymakers*, March 2023.
- [14] Anónimo, “Gobierno entrega la actualización de su compromiso de reducción de emisiones y medidas para enfrentar el cambio climático,” *Ministerio del medio Ambiente*, Abril 2020.
- [15] F. García, “El coche causa el 13
- [16] U. S. E. P. Agency. Tailpipe greenhouse gas emissions from a typical passenger vehicle. Recuperado el 9-05-2023. [Online]. Available: <https://www.epa.gov/greenvehicles/tailpipe-greenhouse-gas-emissions-typical-passenger-vehicle>
- [17] B. Heidari and L. C. Marr, “Real-time emissions from construction equipment compared with model predictions,” *Journal of the air & waste management association*, vol. 65, no. 2, pp. 115–125, 2015.
- [18] L. Gallardo, “En 2020 las ventas de autos nuevos cayeron un 30,6
- [19] E. Construcción. Importaciones de maquinaria en Chile enero-octubre de 2020. Recuperado el 10-05-2023. [Online]. Available: <https://www.emb.cl/construccion/articulo.mvc?xid=4496&ni=importaciones-de-maquinaria-en-chile-enero-octubre-de-2020>
- [20] U. S. E. Departmen. Fact 861 february 23, 2015 idle fuel consumption for selected gasoline and diesel vehicles. Recuperado el 9-04-2023. [Online]. Available: <https://www.energy.gov/eere/vehicles/fact-861-february-23-2015-idle-fuel-consumption-selected-gasoline-and-diesel-vehicles>
- [21] G. Fraine, S. G. Smith, L. Zinkiewicz, R. Chapman, and M. Sheehan, “At home on the road? can drivers’ relationships with their cars be associated with territoriality?” *Journal of environmental psychology*, vol. 27, no. 3, pp. 204–214, 2007.
- [22] C. power systems services. Types of gas for your rental construction vehicle. Recuperado el 9-04-2023. [Online]. Available: <https://cpower.com/2021/11/16/types-of-gas-for-your-rental-construction-vehicle/>
- [23] F. Dagnino, “Por qué Chile será una potencia en generación y exportación de hidrógeno verde,” *La Tercera*, diciembre 2021. [Online]. Available: <https://www.latercera.com/laboratoriodecontenidos/formando-para-crear/por-que-chile-sera-una-potencia-en-generacion-y-exportacion-de-hidrogeno-verde/>
- [24] E. de prensa e información de la Delegación de la UE en Chile, “Chile acelera la industria del hidrógeno verde con apoyo del banco mundial,” *Banco mundial*, Junio 2023. [Online]. Available: <https://www.bancomundial.org/es/news/press-release/2023/06/29/chile-to-accelerate-its-green-hydrogen-industry-with-world-bank-support>

- [25] “Gobierno de Chile y la Unión Europea lanzan dos nuevas iniciativas de cooperación en materia de hidrógeno renovable por un valor de 225 millones de euros,” *Delegación de la Unión Europea*, Junio 2023. [Online]. Available: <https://www.eeas.europa.eu/delegations/chile/gobierno-de-chile-y-la-uni%C3%B3n-europea-lanzan-dos-nuevas-iniciativas-de-cooperaci%C3%B3n-es?s=192>
- [26] J. Kast, G. Morrison, J. J. Gangloff Jr, R. Vijayagopal, and J. Marcinkoski, “Designing hydrogen fuel cell electric trucks in a diverse medium and heavy duty market,” *Research in Transportation Economics*, vol. 70, pp. 139–147, 2018.
- [27] C. C. del Cobre, “Descarbonización e hidrógeno verde en la minería chilena: estado del arte y principales desafíos,” Ministerio de Minería, Santiago, Chile, Tech. Rep., 2022.
- [28] C. Bordons, M. A. Ridao, A. Pérez, A. Arce, and D. Marcos, “Model predictive control for power management in hybrid fuel cell vehicles,” in *2010 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*. IEEE, 2010, pp. 1–6.
- [29] P. Thounthong, S. Raël, and B. Davat, “Control strategy of fuel cell/supercapacitors hybrid power sources for electric vehicle,” *Journal of Power Sources*, vol. 158, no. 1, pp. 806–814, 2006.
- [30] J. Snoussi, S. B. Elghali, M. Benbouzid, and M. F. Mimouni, “Optimal sizing of energy storage systems using frequency-separation-based energy management for fuel cell hybrid electric vehicles,” *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 67, no. 10, pp. 9337–9346, 2018.
- [31] P. Thounthong, V. Chunkag, P. Sethakul, B. Davat, and M. Hinaje, “Comparative study of fuel-cell vehicle hybridization with battery or supercapacitor storage device,” *IEEE transactions on vehicular technology*, vol. 58, no. 8, pp. 3892–3904, 2009.
- [32] D. Feroldi, M. Serra, and J. Riera, “Design and analysis of fuel-cell hybrid systems oriented to automotive applications,” *IEEE transactions on vehicular technology*, vol. 58, no. 9, pp. 4720–4729, 2009.
- [33] J. Han, M. Kokkolaras, and P. Papalambros, “Optimal design of hybrid fuel cell vehicles,” in *International Conference on Fuel Cell Science, Engineering and Technology*, vol. 42479, 2006, pp. 273–282.
- [34] I. Park and S. Kim, “A sliding mode observer design for fuel cell electric vehicles,” *Journal of Power Electronics*, vol. 6, no. 2, pp. 172–177, 2006.
- [35] P. Thounthong, “Fuel cell/battery powered electric vehicle system,” *EECON-29*, pp. 361–364, 2006.
- [36] W. F. Maarouf, A. M. Barbar, and M. J. Owayjan, “A new heuristic algorithm for the 3d bin packing problem,” pp. 342–345, 2008.
- [37] S. Erbayrak, V. Özkır, and U. M. Yıldırım, “Multi-objective 3d bin packing problem with load balance and product family concerns,” *Computers & Industrial Engineering*, vol. 159, p. 107518, 2021.
- [38] P. Bratley and G. Brassard, “Fundamentos de algoritmia,” 1997.

- [39] H. Hu, X. Zhang, X. Yan, L. Wang, and Y. Xu, "Solving a new 3d bin packing problem with deep reinforcement learning method," *arXiv preprint arXiv:1708.05930*, 2017.
- [40] H. Zhao, Q. She, C. Zhu, Y. Yang, and K. Xu, "Online 3d bin packing with constrained deep reinforcement learning," in *Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence*, vol. 35, no. 1, 2021, pp. 741–749.
- [41] J. de Castro Silva, N. Soma, and N. Maculan, "A greedy search for the three-dimensional bin packing problem: the packing static stability case," *International Transactions in Operational Research*, vol. 10, no. 2, pp. 141–153, 2003.
- [42] X. Zhao, J. A. Bennell, T. Bektaş, and K. Dowsland, "A comparative review of 3d container loading algorithms," *International Transactions in Operational Research*, vol. 23, no. 1-2, pp. 287–320, 2016.
- [43] D. Lazarević, M. Petrović, A. Trifunović, and M. Dobrodolac, "Solving the 3d bin packing problem to improve transport efficiency," *IETI Transactions on Engineering Research and Practice*, vol. 4, no. 2, pp. 28–40, 2020.
- [44] A. F. Burke, "Batteries and ultracapacitors for electric, hybrid, and fuel cell vehicles," *Proceedings of the IEEE*, vol. 95, no. 4, pp. 806–820, 2007.
- [45] D. Feroldi, M. Serra, and J. Riera, "Design and analysis of fuel-cell hybrid systems oriented to automotive applications," *IEEE transactions on vehicular technology*, vol. 58, no. 9, pp. 4720–4729, 2009.
- [46] P. Thounthong, V. Chunkag, P. Sethakul, B. Davat, and M. Hinaje, "Comparative study of fuel-cell vehicle hybridization with battery or supercapacitor storage device," *IEEE transactions on vehicular technology*, vol. 58, no. 8, pp. 3892–3904, 2009.
- [47] M. Alvarez, "Hidrógeno como alternativa sustentable a los combustibles fósiles," *DEC Antofagasta*, Julio 2021. [Online]. Available: <https://enlinea.santotomas.cl/actualidad-institucional/hidrogeno-como-alternativa-sustentable-a-los-combustibles-fosiles/219573/>
- [48] h2chile. (2022) Cadena de valor: Almacenamiento. Recuperado el 15-07-2023. [Online]. Available: <https://h2chile.cl/cadena-valor-almacenamiento/>
- [49] Apilados. Almacenamiento de hidrógeno comprimido: tipos de tanques. Recuperado el 15-07-2023. [Online]. Available: <https://apilados.com/blog/almacenamiento-hidrogeno-comprimido-tipos-tanques/>
- [50] F. Sergi, A. Arista, G. Agnello, M. Ferraro, L. Andaloro, and V. Antonucci, "Characterization and comparison between lithium iron p hosphate and lithium-polymers batteries," *Journal of Energy Storage*, vol. 8, pp. 235–243, 2016.
- [51] A. Kumar, K. Singh, and D. Bhattacharya, "Ultra capacitor: Alternative energy storage systems," *International Journal of Scientific Engineering and Technology*, vol. 2, no. 12, pp. 1208–1210, 2013.
- [52] C. Buisson, D. Villegas, and L. Rivoirard, "Using polar coordinates to filter trajectories data without adding extra physical constraints," in *Transportation Research Board 95th Annual Meeting*, vol. 16, 2016.

-
- [53] R. A. Bixel, G. J. Heydinger, N. J. Durisek, D. A. Guenther, and S. J. Novak, “Developments in vehicle center of gravity and inertial parameter estimation and measurement,” *SAE transactions*, pp. 716–726, 1995.
 - [54] J. Huang, S. S. Naini, R. Miller, D. Rizzo, K. Sebeck, S. Shurin, and J. Wagner, “A hybrid electric vehicle motor cooling system—design, model, and control,” *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 68, no. 5, pp. 4467–4478, 2019.