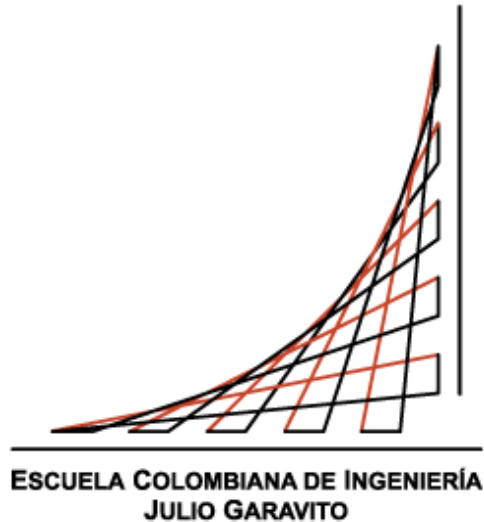


REPÚBLICA DE COLOMBIA
ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERIA JULIO GARAVITO
PROGRAMA DE INGENIERIA ELECTRICA



**VIABILIDAD DE RECARGA DE BATERÍAS DE VEHÍCULOS ELÉCTRICOS
MEDIANTE ENERGÍA CINÉTICA CONSTANTE.**

Trabajo dirigido como opción de grado presentado ante la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.

Cristian Camilo Monroy Laverde
Cristian Alejandro Siachoque Ardila

Director: Ing. IVÁN CAMILO DURAN TOVAR PhD

Bogotá D.C Mayo de 2019

APROBACIÓN

Este director aprueba el Trabajo dirigido como opción de grado titulado **viabilidad de recarga de baterías de vehículos eléctricos mediante energía cinética constante** que Cristian Camilo Monroy Laverde y Cristian Alejandro Siachoque Ardila, presentan ante la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.

Director
Ing. Iván Camilo Duran Tovar PhD

Bogotá D.C Mayo de 2019

Cristian Camilo Monroy Laverde y Cristian Alejandro Siachoque Ardila. **Viabilidad de recarga de baterías de vehículos eléctricos mediante energía cinética constante.** Trabajo dirigido como opción de Grado. Escuela Colombiana de ingeniería Julio Garavito. Programa de Ingeniería Eléctrica. Bogotá D.C, 2019, 46p

RESUMEN

Este documento se encuentra una investigación sobre un sistema de regeneración de energía cinética constante para el aumento de la autonomía de vehículos eléctricos, que a partir de una validación de un modelo matemático que representa el comportamiento en ruta y la cantidad de potencia necesaria en las llantas para lograr su movimiento, que recurre para un análisis de las variables eléctricas del sistema de Freno regenerativo, el cual es llevado al Software Matlab® y programado con la herramienta Script. Posteriormente, se hace una adaptación para el sistema de estudio, bajo una serie de simulaciones sobre diferentes tipos de perfiles de velocidad, abarcando tanto de recorridos urbanos como de carretera y un perfil llamado Caso de Estudio, son comparados los resultados de consumo y estados de carga entre los dos sistemas de recuperación de energía para determinar la viabilidad de implementar el sistema de regeneración de energía cinética constante en un vehículo eléctrico con características similares a un Nissan Leaf, da como resultados más favorables para el sistema convencional de Freno Regenerativo, a excepción del perfil de velocidad Caso de Estudio, poniendo con una baja factibilidad para llevar a cabo pruebas medibles y su posterior implementación.

Palabras Clave: Freno Regenerativo, Autonomía de vehículo Eléctrico, Consumo energético, Baterías para vehículos eléctricos.

cristian.monroy@mail.escuelaing.edu.co

cristian.siachoque@mail.escuelaing.edu.co

DEDICATORIA

Para nuestros padres y hermanos, por su apoyo incondicional y su siempre presente motivación para ser mejores ingenieros y personas cada día.

AGRADECIMIENTO

Valoramos el esfuerzo, apoyo y compromiso de nuestro tutor Ing. Iván Duran Tovar, que bajo su dirección se logró llegar al desarrollo del proyecto, agradecemos al Ing. Sebastián Torres Franco por sus aportes y paciencia al desarrollo de la investigación y uso del Software, al Ing. Agustín Rafael Marulanda por su contribución a la investigación, a nuestro Decano Ing. Hugo Iván Forero y demás ingenieros docentes del programa de Ingeniería Eléctrica por su atención, apoyo y siempre a Dios que nos cubre y guía con su sabiduría.

ÍNDICE

CAPITULO I ESTADO DEL ARTE DE LAS TECNOLOGÍAS	10
I. 1 VEHÍCULOS ELÉCTRICOS	10
I. 2 BATERÍAS DE VEHÍCULOS ELÉCTRICOS	10
I. 2. 1 TIPOS DE BATERÍAS	11
I. 2. 2 CLASIFICACIÓN DE LAS BATERÍAS	12
I. 3 MAQUINAS ELÉCTRICAS	14
I. 3. 1 MOTOR ASÍNCRONO	15
I. 3. 2 GENERADOR ASÍNCRONO	17
CAPITULO II SIMULACIONES DE VEHÍCULOS ELÉCTRICOS	20
II. 1 MATLAB® Y SCRIPT	20
II. 2 MODELAMIENTO DE VEHÍCULO ELÉCTRICO EV	21
II. 2. 1 VALIDACION CON EL MODELO VT-CPEM	23
II. 3 MODELAMIENTO SISTEMA DE RECARGA CON ENERGÍA CINÉTICA CONSTANTE	26
II. 3. 1 CONSIDERACIONES DE LA SIMULACIÓN	28
II. 3. 2 LA ENERGIA CINETICA CONSTANTE RECUPERADA	30
II. 4 RESULTADOS DE LAS SIMULACIONES	31
CAPITULO III ANÁLISIS DE RESULTADOS	39
III. 1 COMPARACIÓN DE CONSUMOS DE ENERGÍA	39
III. 2 BATERÍAS Y ESTADO DE CARGA EN EL CASO DE ESTUDIO	40
III. 3 ENERGÍA APROVECHABLE	41
REFERENCIAS	45

Índice de tablas

Tabla 1 Comparación de consumos en Wh/km.....	26
Tabla 2. Parámetros iniciales de los perfiles simulados.....	32
Tabla 3 Resultados de simulaciones Freno regenerativo y Regeneración constante.....	39

Índice de Figuras

Fig. 1 Ilustración de la batería en un EV.....	11
Fig. 2 Diagrama flujo de potencia de motor asincrónico.....	15
Fig. 3 Circuito equivalente de máquina asíncrona con todas sus pérdidas.....	16
Fig. 4 Gráfica par-velocidad de motor de inducción y como generador.....	16
Fig. 5 Curva par-velocidad y relación a corriente nominal.....	17
Fig. 6 Análisis maquina asincrónica como generador.	18
Fig. 7 Esquemas según tipo de Inversor.....	18
Fig. 8 Lógica del flujo de potencia para validación de Modelo.....	22
Fig. 9 Perfil de velocidad, Potencia en batería y Estado de Carga MWTC Baja velocidad y MWTC completo	23
Fig. 10 Perfil de velocidad, Potencia en batería y Estado de Carga UDDS y HWFET	24
Fig. 11 Perfil de velocidad, Potencia en batería y Estado de Carga NY City Test y US60	24
Fig. 12 Perfil de velocidad, Potencia en batería y Estado de Carga Caso de Estudio.....	25
Fig. 13 Ciclo de entrega de potencia según condiciones del SOC _p y SOC _s	28
Fig. 14 Curva teórica de la eficiencia del generador en función de la velocidad angular. .	29
Fig. 15 Potencia de batería y Estado de Carga en Regeneración Constante MWTC baja velocidad	33
Fig. 16 Potencia de batería y Estado de Carga en Regeneración Constante MWTC completo.....	34
Fig. 17 Potencia de batería y Estado de Carga en Regeneración Constante UDDS	35
Fig. 18 Potencia de batería y Estado de Carga en Regeneración Constante HWFET	36
Fig. 19 Potencia de batería y Estado de Carga en Regeneración Constante NY City Test	37
Fig. 20 Potencia de batería y Estado de Carga en Regeneración Constante US60.....	38
Fig. 21 Comparación de la potencia freno regenerativo y regeneración constante.	40
Fig. 22 Grafica de potencia en batería primaria (azul) y secundaria (naranja) con perfil de velocidad traslapado y perfil de regeneración completo (naranja claro).	41
Fig. 23 Intercambio de Energía de las Baterías.....	42

Abreviaturas

Ni-Cd	Níquel cadmio.
Ni-MH	Níquel-hidruro metálico
PB	Plomo
LIPO	Batería de iones de polímero de litio
LiCoO₂	Óxido de cobalto litio
LiFePO₄	Fosfato de hierro litio
SOH	State Of Health
SOC	State of charge
DOD	Depth of discharge
EV	Electric Vehicle
BP	Batería Principal
BS	Batería Secundaria

CAPITULO I

ESTADO DEL ARTE DE LAS TECNOLOGÍAS

I. 1 VEHÍCULOS ELÉCTRICOS

La entrada de una motorización híbrida, que constituye en un propulsor eléctrico sea en una configuración para ayudar a la entrega de potencia del motor de combustión convencional o como un adicional eje de tracción, dio la entrada en la consecución de un vehículo de cero emisiones, partiendo de la habilidad y principalmente la entrega de torque de una maquina eléctrica rotativa. Actualmente los vehículos con motorizaciones eléctricas 100% han demostrado las ventajas de su funcionalidad y en consecuencia su viabilidad poniéndolos cada día como la respuesta a los actuales problemas de movilidad y de contaminación, para lo cual se necesita un cambio de la infraestructura del mallado vial que asegure su movilidad.

Se estudia entonces con avances tecnológicos el sistema de propulsión y sistema de recarga de baterías, referente a los materiales a usar y las diferentes configuraciones posibles de equipos para lograr (desde una perspectiva técnica) una mejora en la funcionalidad como su entrega de potencia y su autonomía. La autonomía es la capacidad del vehículo (en este caso de propulsión eléctrica) para lograr un recorrido con una sola recarga de sus baterías, el parámetro más importante en el estudio de este trabajo. Es un término que se usa para cualquier tipo de máquina que hace referencia a cuanto uso se puede hacer de ella al consumir el total de la capacidad de su sistema de almacenamiento de energía.

I. 2 BATERÍAS DE VEHÍCULOS ELÉCTRICOS

La energía eléctrica tiene innumerables aplicaciones debido a la facilidad para ser transformada en otras formas de energía, que para nuestro estudio será en la transformación en energía mecánica y viceversa, teniendo claro que en una batería es un camino de ida y de regreso entre energía eléctrica y energía química. Debido a que no siempre se cuenta con disposición de una red eléctrica para el uso de nuestras máquinas, es necesario contar con un sistema de almacenamiento de energía de manera que podamos disponer de ella sin depender de estar cerca y conectado a una red eléctrica, la manera más fiable de lograr este fin es con el uso de baterías.

Con el desarrollo de las nuevas aplicaciones para las baterías en la implementación de sistemas de generación a partir de energías renovables no convencionales como solar-fotovoltaica o eólica, vehículos eléctricos o sistemas de respaldo de alimentación

ininterrumpida han propiciado el desarrollo de nuevas baterías con mayor vida útil, eficiencia, densidad energética [Wh/kg], capacidad [kWh], fiabilidad que ocupen menos espacio y esperanza de un menor costo.

I. 2. 1 TIPOS DE BATERÍAS

La batería es el elemento activo con la capacidad de almacenar energía a partir de la entrada de una señal eléctrica rectificada y con procesos electroquímicos convertirla en energía química y de nuevo regresarla a la maquina o al proceso en forma de energía eléctrica, todo este proceso con un valor de eficiencia casi perfecto, es decir muy cercano al 100%. La vida útil de estos elementos corresponde a los ciclos de carga, que hacen referencia a cuantas veces podemos llevar la carga de la batería de 0% hasta un 100% y de nuevo a 0%, que corresponde principalmente a la composición química de la cual este hecha al igual que su capacidad.

La Capacidad de una batería la cantidad de potencia por unidad de tiempo que se puede almacenar para de nuevo ser utilizada en otro momento. Esto depende de la composición química de la cual se fabricó, dónde se toman elementos de alto grado de conducción eléctrica con un dieléctrico entre ellas quien es el que almacena la energía a lo que le corresponde el nombre de pila, y la conexión de estas sea en paralelo o serie forman la batería. Para los vehículos eléctricos, su sistema de almacenamiento se compone de un conjunto de varias baterías para aumentar la autonomía del mismo, el cual toma el nombre de banco de baterías, como se observa en la Fig. 1.



Fig. 1 Ilustración de la batería en un EV.

I. 2. 2 CLASIFICACIÓN DE LAS BATERÍAS

Existen dos clases de pilas: la primaria, cuya carga no puede renovarse cuando se agota, excepto reponiendo las sustancias químicas de que está compuesta, y la secundaria, que sí es susceptible de reactivarse, pero sometiéndola al paso prolongado de una corriente eléctrica, en sentido inverso a aquel en que la corriente de la pila fluye normalmente. El campo de aplicación de las baterías primarias se enmarca fundamentalmente dentro de las potencias bajas y de ahí que sean generalmente de tamaño pequeño. Las baterías secundarias se comercializan en un amplio margen de capacidades, desde capacidades bajas (algunos cientos de miliamperios-hora) hasta capacidades medias y altas (varias decenas o centenas de amperios-hora)

Este trabajo se enfoca en las baterías secundarias o recargables, debido a que son baterías que trabajan con ciclos de carga, es decir, que van a estar sometidas constantemente a que almacenen energía por los diferentes sistemas de recarga (sea en movimiento o no) y alternadamente que el vehículo consuma esta energía para su recorrido o en otros sistemas, en especial, aire acondicionado, info-entretenimiento, etc. Las baterías típicas usadas en estos vehículos cuentan con capacidades de almacenamiento entre 15 kWh y 100 kWh, intervalo que se ve actualmente en la comercialización de los vehículos eléctricos desde los más económicos hasta vehículos de alta gama y de grandes prestaciones comparados con sus contrapartes de motorizaciones de combustión interna.

En la actualidad, se usan varios tipos de baterías para el sistema de almacenamiento de energía de un vehículo eléctrico. El siguiente listado muestra un resumen de los diferentes tipos de baterías desde las más antiguas que quedaron en desuso para los Vehículos Eléctricos (EV) hasta las que se encuentran en estado experimental, cuales varían del uso de diferentes elementos químicos:

- **Batería de plomo-acido.** Diseñadas desde el Siglo XIX, se han usado para funciones de arranque y alimentación de elementos eléctricos como iluminación. Son de bajo costo, pero son de mucho peso y un ciclo de carga bajo por lo cual no son de uso aplicativo para vehículos eléctricos.
- **Batería níquel-cadmio.** Su uso se ha dado más en la industria militar para sus vehículos, helicópteros o aviones, dado por su buen rendimiento bajas temperaturas, pero su alto coste y efecto memoria las han dejado por fuera del uso de los EV.
- **Batería níquel-hierro.** Llamadas también de “*ferroníquel*” diseñadas por el inventor Thomas Edison al principio del siglo XX, con una densidad energética [Wh/kg] similar a las de Plomo-acido por lo que su baja eficiencia y entrega de potencia las deja por fuera del uso aplicativo para EV.

- **Batería níquel-hidruro metálico.** Son un desarrollo a las baterías de níquel-cadmio, principalmente siendo más amigables con el medio ambiente, reducen comparativamente el efecto memoria y aumentando su capacidad. Quedaron fuera de uso en los EV por sus constantes mantenimientos y recalentamientos por altas corrientes de descarga aumentando su prematuro deterioro.
- **Batería Ion-litio: (LiCoO₂).** Actualmente la mejor opción para el uso en EV, aunque todavía está en desarrollo, da un gran margen de mejora, porque has pasado de tener 100 hasta 250[Wh/kg] y en un futuro con ayuda del Grafeno [2] unos 400[Wh/kg]. Tienen desventajas como su necesidad continua de refrigeración y confinamiento por su riesgo a explotar por sobrecalentamiento. Se compone molecularmente de un electrolito de sal de litio, electrodos de litio con cobalto y oxido le confieren alta eficiencia, bajo mantenimiento y principalmente facilidad de reciclaje de sus desechos, son una mejora notable en comparación con las de níquel-cadmio debió a que con solo un tercio de su tamaño logran el doble de la densidad energética y cuentan sin efecto memoria. Por lo tanto, sus características van a ser usadas en las simulaciones de este estudio.
- **Batería LiFePO₄.** En búsqueda de una mejora a las baterías de Ion-Litio, estas baterías no usan cobalto aportándoles mayor seguridad y estabilidad en casos de sobrecalentamiento, pero se sacrifica un poco su densidad energética y aumento de su costo, aunque para aplicaciones de vehículos eléctricos de competencia está aumentando su uso, dado por su mayor entrega de potencia.
- **Batería Polímero de litio.** Son un desarrollo a las baterías de Ion-Litio con un aumento de su densidad energética y entrega de potencia más elevada, tienen las ventajas de sus predecesoras con alta eficiencia y ausencia de efecto memoria, pero su alto costo y un número reducido de ciclos de vida las han dejado fuera de los EV para su uso.
- **Batería ZEBRA.** Batería compleja por su contenido químico, corresponde a un electrolito de cloro-aluminato de sodio triturado, lo que le brinda en comparación las de mayor ciclo de vida, pero no se ha logrado su uso porque su electrolito después de un tiempo sin cargarse no logra entregar toda la potencia debido a que se solidifica y tiene que llegar hasta los 250°C para su funcionamiento óptimo, adicional al gran tamaño que ocupa.
- **Batería Aluminio-aire.** Batería experimental que no ha logrado obtener aceptación en los EV por sus problemas en la recarga y la fiabilidad, aunque con una capacidad de carga supremamente mayor a las de LiCoO₂ por su alta densidad energética. Más conocidas como “*pilas de combustible*”.
- **Batería Zinc-aire.** Seguramente el futuro próximo al mayor uso comercial en los EV, Se encuentran en fase experimental por una compañía suiza. Necesitan obtener el oxígeno de la atmosfera, en un tercio de volumen logran la misma

capacidad de almacenamiento de energía que una batería de Ion-Litio con una fiabilidad aceptable y posiblemente con un costo bastante asequible en comparación.

- **Batería de Estado Sólido.** Se esperan para el 2022 por la marca TOYOTA anunciar este tipo de baterías en sus vehículos, corresponde a una variación de las baterías de Ion-Litio donde su electrolito no está en estado líquido si no sólido, otorgándole una triplicación de su densidad energética y posiblemente lograr autonomías de hasta 1000km por ciclo de carga.

Para el presente trabajo, se tendrán en cuenta las baterías de Ion Litio por ser actualmente, las más utilizadas en vehículos eléctricos.

I. 3 MAQUINAS ELÉCTRICAS

A continuación, se hace el estudio de las diferentes maquinas eléctricas para encontrar la más adecuada para el presente trabajo, teniendo en cuenta cada uno de los parámetros a usar para las simulaciones de los vehículos eléctricos puros. Se sabe que “Una máquina eléctrica es un dispositivo que puede convertir energía mecánica en energía eléctrica o energía eléctrica en energía mecánica. Cuando este dispositivo se utiliza para convertir energía mecánica en energía eléctrica se denomina generador, y cuando convierte energía eléctrica en energía mecánica se llama motor” [4]. Nótese que se puede usar las maquinas eléctricas con las dos funcionalidades por lo tanto tenemos que tener en cuenta el uso y la proporción de energía consumida por los motores y generadores.

A continuación, se habla sobre las partes importantes de las maquinas eléctricas para su simulación.

POTENCIA: Tanto los generadores como los motores generan y consumen diferentes tipos de potencia son la potencia mecánica y la potencia eléctrica, dependiendo de la función que estén desempeñando cambiaran de consumir a suministrar en el caso de los generadores, debido a que las maquinas tienen eficiencias no toda la potencia de entrada se verá en la salida por la cantidad de pérdidas que hay durante el proceso; podemos analizar una maquina si tenemos un análisis segundo a segundo de la máquina.

ENERGÍA: Una de sus definiciones es la capacidad de generar un movimiento, transformar algo. Se desempeña en muchos aspectos, podemos encontrar una utilidad en nuestro trabajo a partir de la comparación de diferentes sistemas energéticos, de esta manera podemos hacer un análisis general del sistema sin tener que entrar de manera muy profunda en cada uno de los equipos a utilizar.

PAR O TORQUE: Existen varios tipos de movimientos como el rotatorio y rectilíneo y en cada uno las fuerzas actúan de manera diferente generando diferentes reacciones o resultados. En el movimiento rectilíneo la fuerza aplicada sobre el objeto ocasiona el cambio en la velocidad de este; en el movimiento rotatorio cambia la velocidad angular a esta fuerza aplicada sobre el objeto que está rotando se le llama *par*, de igual manera entre más par se aplique al objeto mayor y más rápidamente va a tener el cambio de velocidad. El par o acción de torsión sobre un motor depende de:

- La magnitud de la fuerza aplicada.
- La distancia de la fuerza aplicada al eje de rotación.
- La línea de acción de la fuerza.

1.3.1 MOTOR ASÍNCRONO

Dentro de los tipos de motores existentes, este tiene en principio la misma conformación de un transformador trifásico, con la gran diferencia de que los devanados secundarios del motor están en cortocircuito. En la Fig. 2, se muestra el diagrama del flujo de potencia de este tipo de motores, donde se ven claramente las pérdidas en cada una de sus partes; pérdidas que se deben tener en cuenta la hora de simular este tipo de motores.

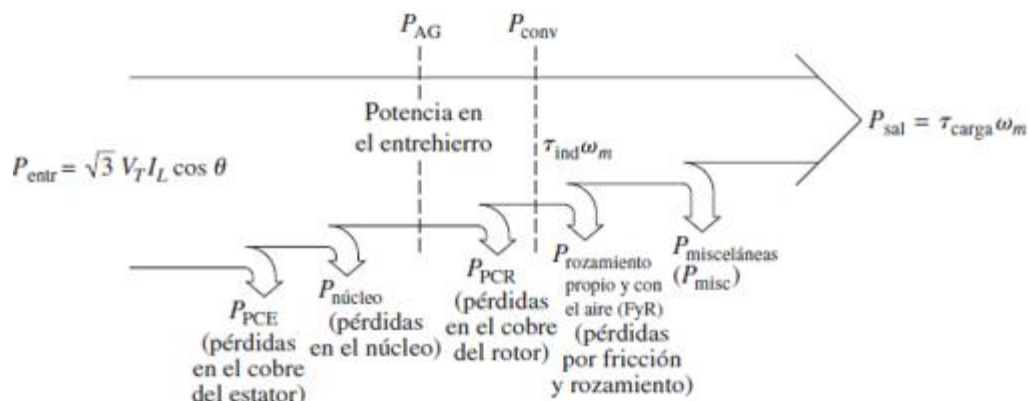


Fig. 2 Diagrama flujo de potencia de motor asíncrono[5]

“La separación de las pérdidas en el cobre del rotor y la potencia convertida en el circuito equivalente de un motor de inducción, parte de la potencia que pasa a través del entrehierro de un motor de inducción se consume en las pérdidas en el cobre del rotor y parte se convierte en potencia mecánica para hacer girar el eje del motor. Es posible separar los dos usos de la potencia del entrehierro y representarlos por separado en el circuito equivalente del motor” [6].

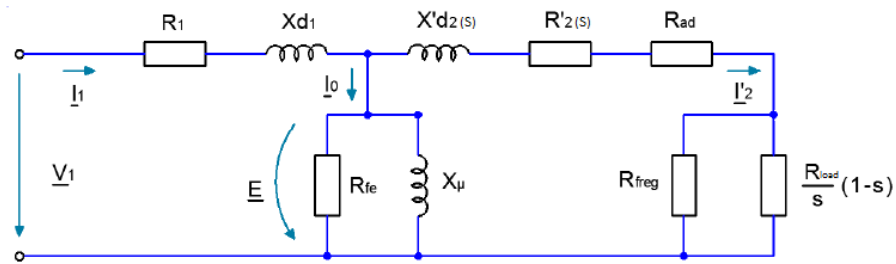


Fig. 3 Circuito equivalente de máquina asíncrona con todas sus pérdidas [7]

La manera más fácil de analizar el comportamiento de un motor y generador cuando trabajan bajo diferentes tipos de carga, el par que puede suministrar, cuanto se reduce la velocidad a medida que aumenta la carga es usar las gráficas de par vs velocidad.

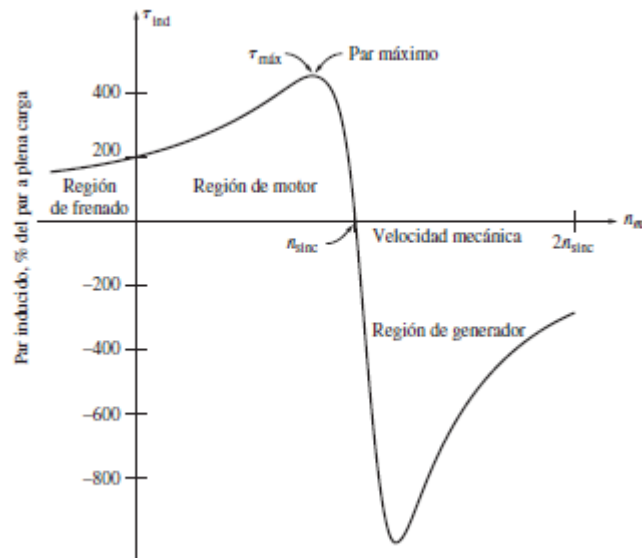


Fig. 4 Gráfica par-velocidad de motor de inducción y como generador [8]

En las tres diferentes partes de la gráfica como se aprecia en la Fig. 4 tiene regiones de frenado, región de motor y región de generador dependiendo de las pérdidas y la cantidad de energía que pueden generar se tiene que analizar si estas máquinas de inducción son las adecuadas para el proyecto o buscar alguna alternativa como generadores de corriente continua (DC).

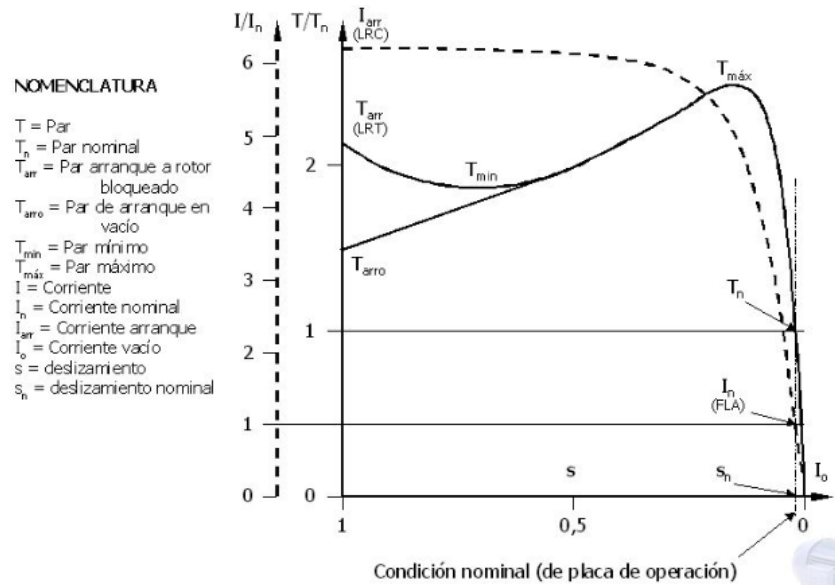


Fig. 5 Curva par-velocidad y relación a corriente nominal [9]

Además de la curva característica del motor de inducción, existen técnicas para controlar la velocidad del mismo. La primera forma mediante la variación de la velocidad de los campos magnéticos, ya que el rotor tiende a seguir de cerca esta velocidad y esta depende de la ecuación (1), donde se encuentran dos variables que pueden variar para controlar la velocidad.

$$N_{sync} = \frac{120f_e}{p} \quad (1)$$

Donde N_{sync} es la velocidad sincrónica, f_e es la frecuencia eléctrica de la red a donde está conectado el motor y P es la cantidad de polos que tiene el motor. Si se varía la frecuencia eléctrica o el número de polos del motor, por supuesto varía la velocidad sincrónica.

Otra forma de variar la velocidad es cambiando el deslizamiento del rotor para una carga dada, modificando la resistencia del rotor o el voltaje en los terminales.

1.3.2 GENERADOR ASÍNCRONO

En la Fig. 6 se aprecia una máquina sincrónica funcionando como generador y como motor. De este funcionamiento se puede analizar lo siguiente, si la velocidad del rotor es mucho mayor a la velocidad sincrónica la máquina empezara a funcionar como generador. De igual manera si aumenta la velocidad en su eje generara mucha más potencia que no deberá superar su par máximo y, si se supera este umbral, se generara una velocidad excesiva pudiendo dañar la máquina.

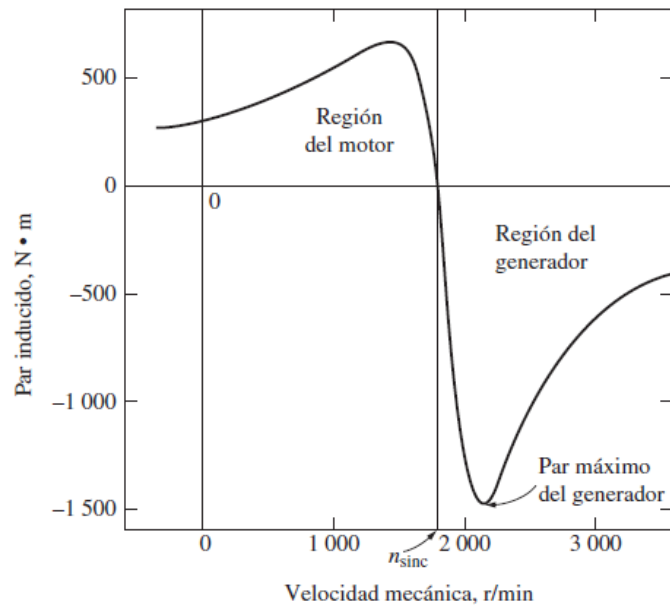


Fig. 6 Análisis maquina asincrónica como generador.[8][8]

I. 3. 3 INVERSORES RECTIFICADORES

Los inversores son equipos usadas en electrónica de potencia para hacer la conversión de energía de corriente continua a corriente alterna (DC/AC); existen bastantes clases de inversores gracias a la evolución de la tecnología en términos de: materiales, las velocidades de conmutación, perdidas de conducción. Una de sus utilidades más importantes es la facilidad con la que se pueden controlar la velocidad de estos lo que genera un sistema de control muy eficiente y rápido sobre los equipos que estén conectados aguas abajo lo que también controlaría el par de los equipos.

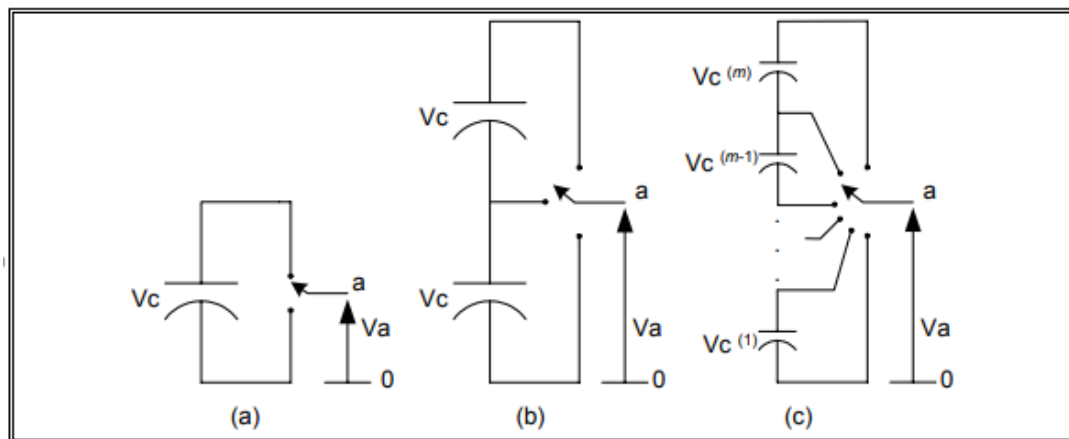


Fig. 7 Esquemas según tipo de Inversor [13]

La eficiencia de los inversores va mejorando a medida que aumenten los niveles o etapas de estos a continuación en la Fig. 7 se muestran los diagramas esquemáticos de los inversores con diferente número de niveles, donde el semiconductor está representado como un interruptor con varias posiciones.

CAPITULO II

SIMULACIONES DE VEHÍCULOS ELÉCTRICOS

Actualmente se encuentran una serie de artículos de institutos de movilidad sostenible en Virginia Tech Transportation Institute donde se realizan análisis de la eficiencia energética en función de los límites de distancia alcanzados por los vehículos eléctricos puros con freno regenerativo teniendo en cuenta los diferentes fabricantes. Este modelo permite la utilización de datos disponibles por cada fabricante. Es interesante ver que resaltan que los vehículos eléctricos pueden recuperar mayor cantidad de energía en un entorno de conducción urbana haciendo una comparación con vehículos en conducción por carreteras. De esta manera podemos proponer una generación específica según la necesidad del vehículo como camiones de carga, debido a que el objeto de estudio del presente trabajo es la regeneración constante.

Este modelo de simulación tiene en cuenta la velocidad del tráfico promedio en una ciudad así encuentran el consumo energético del vehículo. Así como la generación obtenida partiendo de la velocidad instantánea y niveles de desaceleración del vehículo. La primera etapa consistió en la investigación de programas de simulación de modelos matemáticos existentes, teniendo en cuenta su practicidad y lenguaje de programación, los tipos de programación y la necesidad de análisis en cada una de las maquinas propuestas en el análisis general del vehículo eléctrico. El programa elegido es el MATLAB®.

II.1 MATLAB® Y SCRIPT

La palabra Matlab proviene de “*matrix laboratory*” (laboratorio de matrices) es uno de los programas de cálculo matricial más avanzados es una matriz que no requiere dimensionamiento, esto permite resolver problemas matemáticos de una manera más fácil que en otros programas tiene un gran énfasis en aplicaciones de control o procesamiento de señales, tiene también una serie de herramientas llamadas “TOOLBOXES” son conjuntos de funciones de Matlab para resolver clases particulares de problemas o hacer más fácil la programación o elaboración de algoritmos de solución para diferentes problemas.

El SCRIPT en MATLAB® Corresponde a un lenguaje de programación en el cual se ingresan programan línea por línea los comandos en lenguaje propio de MATLAB, también permite importar archivos para ser ejecutados como función de MATLAB y adiciona un entorno computacional interactivo. Cuenta con un tipo de archivo llamado función, el cual acepta unas variables internas para lograr su operación recibiendo argumentos de entrada y dando como resultado unos argumentos de salida.

¿Por qué Script y no SimuLink? A principio de este estudio se pensó en el uso de la herramienta SimuLink de MATLAB®, pero como ya no se analiza los elementos y maquinas que componen el EV en su características internas, se evidencio un mejor desarrollo de este estudio con uso de SCRIPT debido a que se centra más el alcance de esta modelación teórica de los consumos de un EV y un sistema de regeneración de energía para una batería secundaria dados como funciones del mismo, en efecto, dando como resultado una clase modelación más robusta a la parametrización de los componentes y posibles cambios en la simulaciones, además de un archivo MATLAB para fututos estudios.

II. 2 MODELAMIENTO DE VEHÍCULO ELÉCTRICO EV

El modelamiento de consumo de energía de un vehículo eléctrico puro consta de una serie de variables como, por ejemplo: potencia a la rueda, peso, aceleración, resistencia aerodinámica, resistencia a la rodadura, densidad del aire que depende de la humedad y temperatura del ambiente que golpea el frente del EV, eficiencia de la transmisión, eficiencia del motor eléctrico. Este modelamiento se llevará a cabo a partir de un análisis de la potencia a la rueda y a través de los diferentes elementos del ciclo de potencia llegar a la potencia que entrega la batería la cual es mayor debido a las eficiencias de los equipos como inversores y GearBox.

El resultado esperado de este estudio de ciclos de potencia corresponde a los resultados dados por las simulaciones en MATLAB, de los cuales se obtendrán una serie de graficas como el Estado de Carga (SOC), potencia entregada a la rueda, potencia entregada por la batería, potencia entregada por los generadores de energía cinética constante y principalmente el consumo de energía del EV evaluadas a uno perfil de velocidad y su correspondientes aceleraciones de un recorrido de un vehículo por carretera principalmente a velocidades constantes donde no es efectivo un sistema de recarga como los frenos regenerativos.

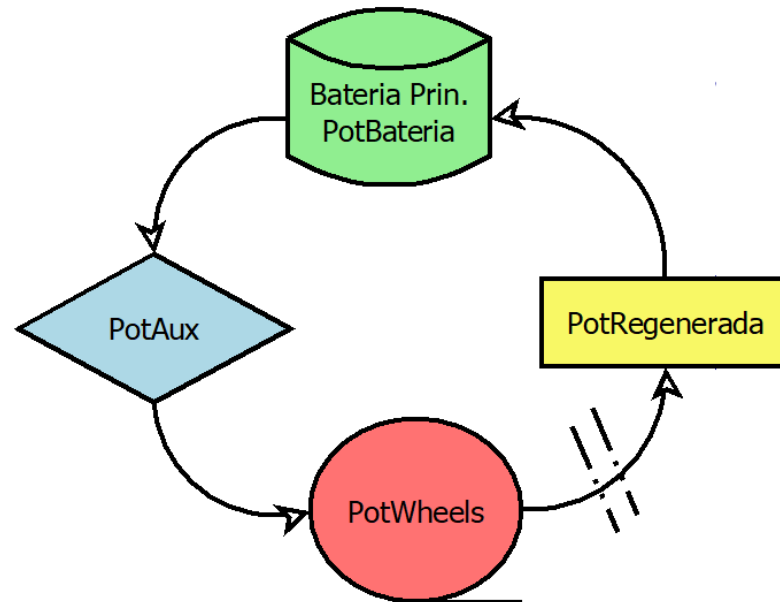


Fig. 8 Lógica del flujo de potencia para validación de Modelo

La Fig. 8 representa en qué sentido se analiza el flujo de potencia, donde *PotAux* corresponde al valor de la energía consumida por segundo por los diferentes elementos adicionales del vehículo como: Aire acondicionado, iluminación exterior e interior, computadora abordo, etc. En este caso de estudio, se tomará un valor de 700W. La *PotWheels* hace referencia a la potencia instantánea que pide el vehículo para moverse a determinada velocidad, potencia que se rige bajo la ecuación (2).

$$PotWheels(t) = [ma(t) + mg * \cos \theta * \frac{C_r}{1000} (c_1 v(t) + c_2) + \frac{1}{2} \rho_{Air} A_f C_D v^2(t) + mg * \text{sen}(\theta)] * v(t) \quad (2)$$

Esta ecuación contempla las variables y valores del Nissan Leaf [8] de masa del vehículo $m = 1521 \text{ kg}$, la aceleración de la gravedad $g = 9,8066 \text{ m/s}^2$, la inclinación de la vía θ , parámetros adimensionales del tipo de compuesto de la rueda, condición de la vía y tipo de superficie: $c_2 = 4,575$, $c_1 = 0,0328$ y $C_r = 1,75$ respectivamente, más variables de consideración dadas por las propiedades físicas del vehículo en interacción con el entorno como: densidad del aire $\rho_{Air} = 1,2256 \text{ kg/m}^3$, el área frontal de contacto con el aire del vehículo $A_f = 2,3316 \text{ m}^2$ y el coeficiente aerodinámico del Nissan Leaf $CD = 0,28$.

II. 2. 1 VALIDACION CON EL MODELO VT-CPEM

Para la utilización del modelo teórico, es necesario su previa verificación mediante la programación en MATLAB-SCRIPT, para luego ser simulado con resultados previos, y así obtener resultados muy cercanos a los arrojados en otras simulaciones. Se hace una validación con el modelo de consumo de energía instantánea para un vehículo eléctrico (VT-CPEM) [28], el cual consta de comparar resultados de consumo del modelo con simulaciones realizadas por la United States Environmental Protection Agency (EPA) [4]. En la primera parte, se obtiene los resultados de consumo de potencia, estado de carga de la batería de 27 kWh y su correspondiente perfil de velocidad de la Fig. 9, 10 y 11.

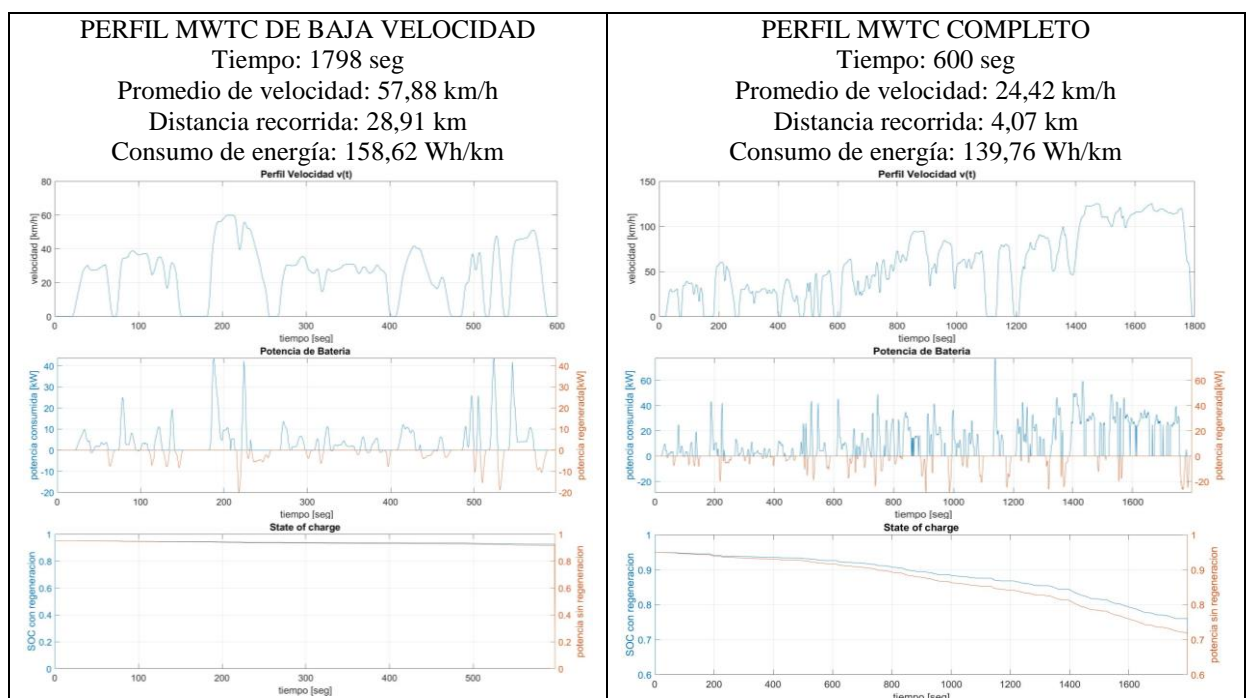


Fig. 9 Perfil de velocidad, Potencia en batería y Estado de Carga MWTC Baja velocidad y MWTC completo

En la fig.9 se aprecia el perfil de velocidad MWTC completo en el lateral derecho el cual está dividido en dos partes una parte de baja velocidad imitando un perfil de velocidad urbano en los primeros 600seg el cual está en lado izquierdo con el que se hace la principal validación del modelo con el consumo promedio de energía y por último se hace el análisis con el perfil de velocidad completo para verificar el comportamiento y comparar el modelo con el artículo “Power-based electric vehicle energy consumption model” [27].

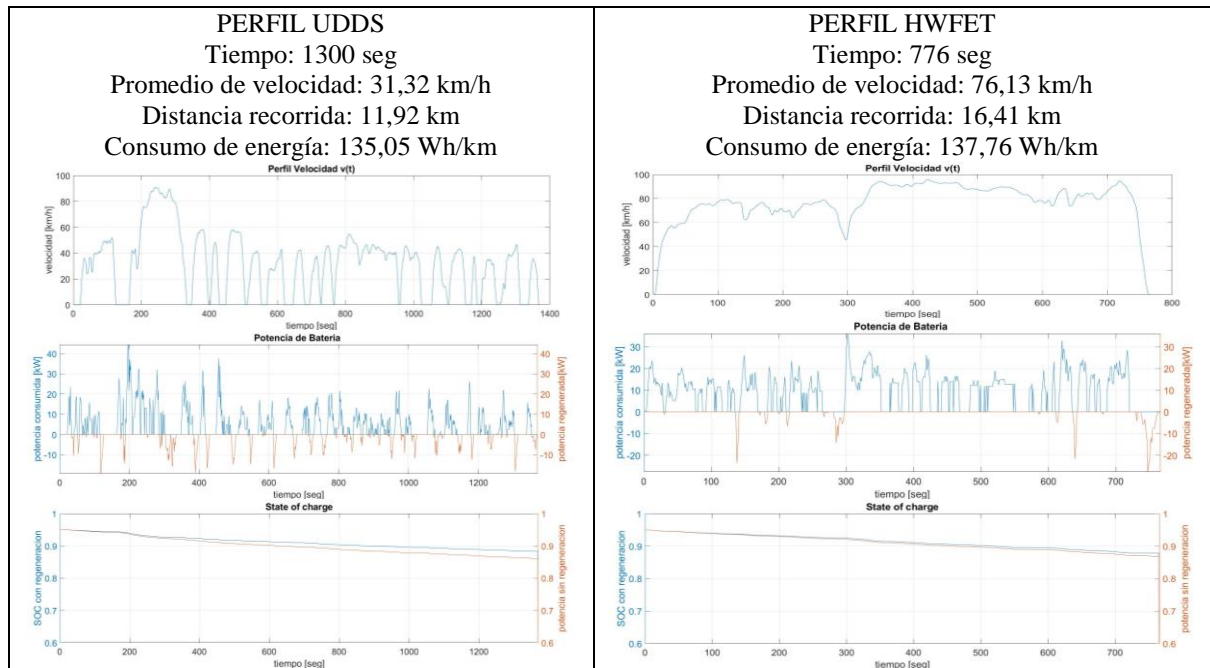


Fig. 10 Perfil de velocidad, Potencia en batería y Estado de Carga UDDS y HWFET

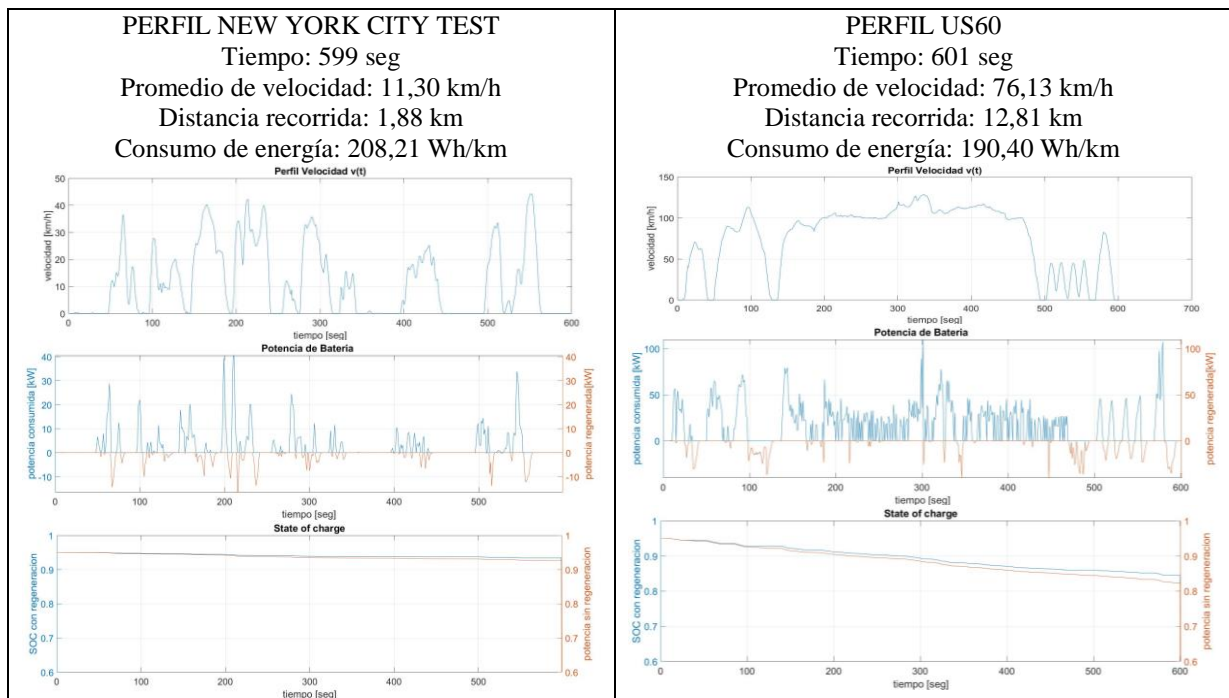


Fig. 11 Perfil de velocidad, Potencia en batería y Estado de Carga NY City Test y US60

En parte izquierda de la Fig. 10 está un perfil de velocidad completamente urbano con una duración total de 1300 segundos el cual beneficia mucho al freno regenerativo por los rápidos cambios de aceleración, en el costado derecho se aprecia un perfil de velocidad de carretera en el cual el freno regenerativo no se usa por lo tanto no es tan útil; se colocan uno al lado del otro para hacer la comparación entre los dos perfiles rápidamente y exponer claramente el análisis anterior.

En la fig. 11 al costado izquierdo se aprecia un perfil de velocidad que representa el tráfico denso en ciudad, evaluando los frenados fuertes se observa una gran generación, al costado derecho hay un perfil de velocidad con un tráfico denso al inicialmente y finalizando, en el mismo perfil en la parte central hay alta velocidad y constante donde la generación es menor por el poco frenado.

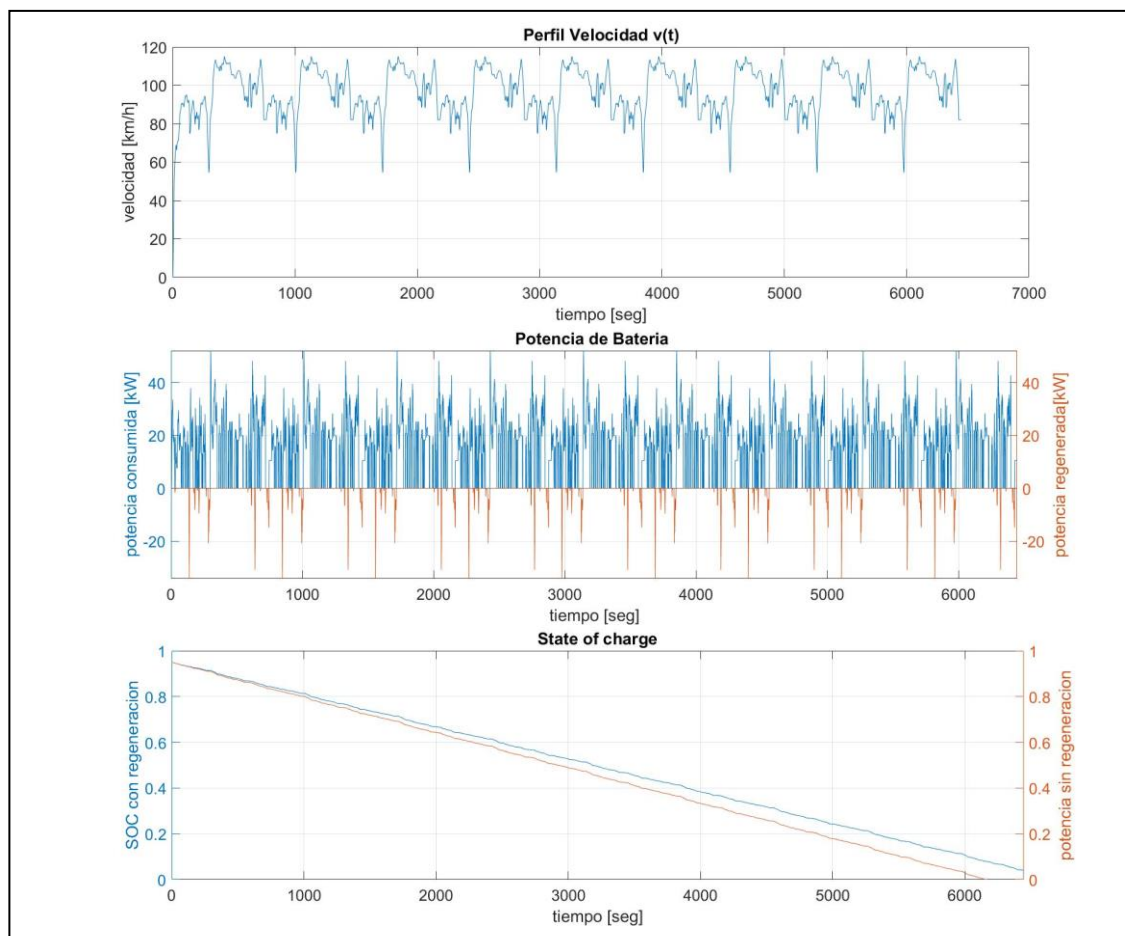


Fig. 12 Perfil de velocidad, Potencia en batería y Estado de Carga Caso de Estudio

La segunda tarea es crear el perfil del caso de estudio, el cual toma como base el perfil de carretera de HWFET [14]. Este perfil es replicado nueve veces para recrear un recorrido

en distancia comparable entre Bogotá y Tunja. Este perfil tiene un tiempo total de 6446 segundos (1:47:26), una velocidad promedio de 96,48 km/h, una distancia recorrida de 172,75 km y un consumo de energía de 142,67 Wh/km.

Este perfil tiene la característica de que no es el apropiado para el empleo del frenado regenerativo, lo que permite ser el caso ideal para la utilización de un sistema de regeneración de energía cinética constante, condición ideal para maximizar las posibilidades, debido a sus altas velocidades de carretera. Con dicho perfil, se hace el análisis de cómo funciona con el freno regenerativo, donde se aprecia su alta velocidad y sus constantes de desaceleraciones las cuales llevan al 1% la batería del vehículo.

La Tabla 1 contiene la comparación y el porcentaje de error obtenido después de la comparación de los perfiles de velocidad usados para la validación del modelo.

Tabla 1 Comparación de consumos en Wh/km

$v(t)$	VT-CPEM [Wh/km]	Modelo	Error [%]	Tiempo [seg]	distancia [km]	promedio de $v(t)$ [km/h]
WMTC Low	142,4	139,76	1,9%	600	4,07	24,42
WMTC	182,3	158,62	13,0%	1798	28,91	57,88
UDDS	145,3	135,05	7,1%	1370	11,92	31,32
HWFET	150,2	137,00	9,6%	776	16,41	76,12
US06	216,2	190,39	11,9%	601	12,81	76,73
Caso de Estudio		142,67		6446	172,75	96,47
NY		208,25		599	1,88	11,29

II. 3 MODELAMIENTO SISTEMA DE RECARGA CON ENERGÍA CINÉTICA CONSTANTE

Dado que el sentido de flujo de potencia de batería puede en un momento entregar potencia al sistema motriz del EV, lo cual se toma como potencia positiva, o solo recibir sea por el sistema de recarga o de regeneración, tomado como potencia negativa, no es posible que un sistema de regeneración de energía cinética constante este suministrando a la batería del vehículo, la energía obtenida por el generador adjunto al eje no motriz, al mismo tiempo que el vehículo obtiene tracción por los motores eléctricos, Debido a esto se opta de una Batería Secundaria, encargada de almacenar toda la energía recuperada por el movimiento del vehículo, sea por la entrega de potencia del motor o de la energía del vehículo debido a su inercia por la velocidad de lleva por un impulso previo o energía potencial liberada en un desnivel de la vía.

Se toman a consideración tres casos diferentes donde el sistema aprovecha la regeneración de energía, es decir, tres casos diferentes donde la batería del sistema común de tracción del vehículo (la cual se nombrará como Batería Principal) podrá aprovechar la energía almacenada de la batería secundaria o trabajar en conjunto.

Caso 1. Paralelo a la entrega de potencia del sistema de frenos regenerativos. Dada una aceleración negativa (freno) suficiente para que haya un flujo de potencia negativo hacia la batería principal debido a la energía adquirida por los frenos regenerativos y paralelo a ese flujo de potencia adicionar la energía almacenada por la batería secundaria. Caso no eficiente para el sistema de regeneración de energía cinética constante a causa de que él puede regenerar aun el vehículo este en una situación de desaceleración y ocasionaría un desaprovechamiento del movimiento que aun lleva.

Caso 2. Energía cinética igual a cero ($E_k=0$). Corresponde a los momentos cuando el vehículo tiene una velocidad igual a cero ($v(t)=0$), es decir no existe un flujo de potencia de la batería principal hacia el motor y la batería secundaria tampoco tiene un flujo de potencia desde los generadores, momento preciso para una transferencia de energía eléctrica de la batería secundaria a la batería primaria, aumentando la autonomía del vehículo sin estar conectado a un punto de carga o sometido a una regeneración de los frenos. Caso práctico en la espera de un semáforo o estacionamiento sin punto de carga de EV, pero con desventaja de una situación de un recorrido donde no incluye paradas momentáneas, desaprovechando la energía almacenada de la BS y más si se encuentra en su SOC del 100%.

Caso 3. Intercambio de banco de baterías. Al igual que en el caso 2. El sistema de regeneración de energía cinética constante aprovecharía en todo momento cuando el vehículo tiene movimiento, almacenando energía en la BS. En este caso se pueden presentar 2 situaciones diferentes con los SOC de ambas baterías:

- SOC 100% de la BS: Dado que el banco de baterías secundario se encuentre en su totalidad cargado, sería eficiente para el uso de la energía almacenada, hacer un cambio de posición entre la BP y la BS, en efecto la batería principal queda encargada de almacenar la energía del sistema de regeneración de energía cinética constante hasta que la batería secundaria llegue a un mínimo de carga debido al flujo de potencia entre entrega de potencia al motor y al sistema de frenos regenerativos.
- SOC 10% de la BP: Presentada la situación de que la batería principal del EV llegue a un nivel muy bajo, se hace el intercambio con la batería secundaria, al igual que en la situación anterior precisamente la BS se encargaría de aumentar la autonomía del vehículo gracias a la energía almacenada con anterioridad.

Para este estudio se opta para la simulación un modelamiento del sistema de regeneración de energía cinética constante y del EV en cuestión, con el uso del Caso 3. Ya que corresponde al aprovechamiento y uso más eficiente de la recarga de energía para aumentar la autonomía del EV en un recorrido.

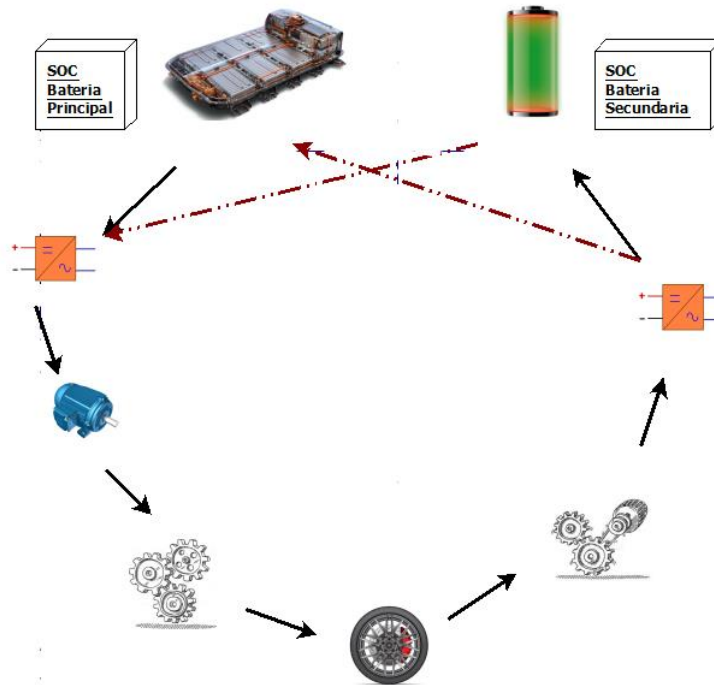


Fig. 13 Ciclo de entrega de potencia según condiciones del SOC_p y SOC_s

II. 3. 1 CONSIDERACIONES DE LA SIMULACIÓN

Para la simulación, y debido a la carencia de información de mediciones para el presente trabajo, se van a tener las siguientes consideraciones:

- *Velocidad nominal del generador estandarizada:* Dado que no se cuentan con datos de un Generador usado en un prototipo para obtención de datos reales, se asume el valor de la velocidad nominal del generador como la más habitual en el mercado de máquinas rotativas, para este estudio y validación del modelo se toma el valor de 3600rpm.
- *La eficiencia común de una maquina como generador:* Al igual que en la velocidad nominal, se asume un valor de 85% como la eficiencia máxima de un generador, la cual depende de la velocidad mecánica aplicada en su eje, en este estudio se relaciona la velocidad mecánica del generador con la velocidad lineal del EV, inscrita en los perfiles de velocidad a evaluar.

- *Curva teórica de la eficiencia del generador:* La eficiencia de las maquinas eléctricas rotativas describe un compartimiento de una curva al inverso de una exponencial con argumento fraccionado.

$$\eta(t) = [e^{\frac{585}{n(t)}}]^{-1} \quad (3)$$

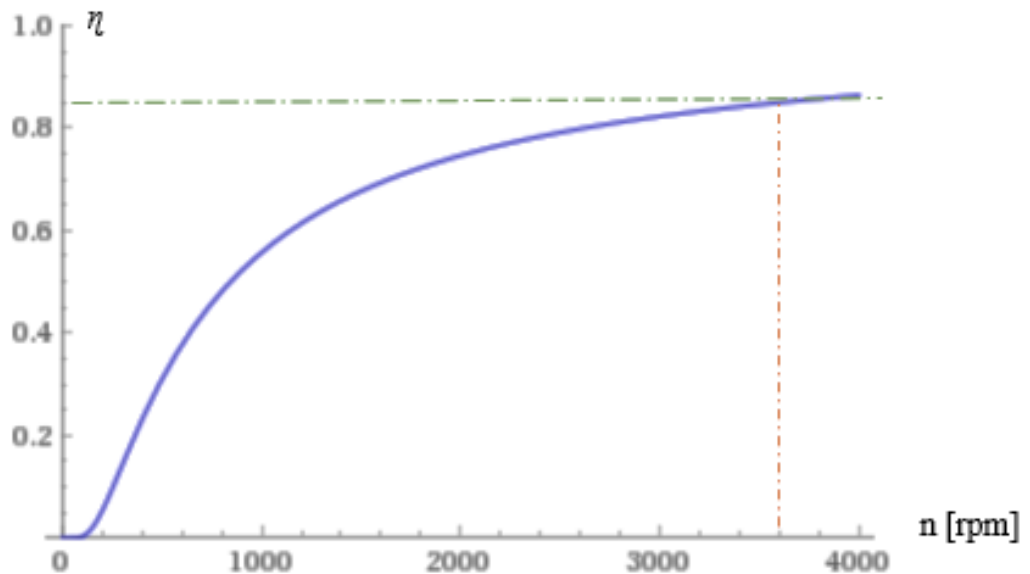


Fig. 14 Curva teórica de la eficiencia del generador en función de la velocidad angular.

Para el estudio, se debe dejar programado en la simulación de manera que, si la velocidad del vehículo supera este límite de velocidad máxima planteado, se debe parar la recuperación de energía desacoplando mecánicamente el generador al eje de la GearBox, ya que pondría al generador en un valor de eficiencia irreal y a una velocidad mecánica superior a la nominal, que provocaría en una prueba real, superar valores de su curva de daño por esfuerzos mecánicos.

- *Relación de transformación del perfil de velocidad $v(t)$ a velocidad angular w al eje del generador:* Debido a que se toma como velocidad nominal del generador como 3600rpm y la máxima velocidad permitida en carretera en Colombia y en la mayoría de países es de **120Km/h**, por lo tanto, no tiene sentido poner una relación de transformación de velocidad que lleve la velocidad máxima de carretera por encima de la velocidad angular nominal del generador, es decir, el EV en un viaje de carretera intentara mantenerse a los topes de velocidad lo que pondría al generador lo más cercano a sus valores nominales donde obtiene su mayor eficiencia.

El valor de la relación de transformación de velocidad lineal vista como la velocidad angular del eje de la llanta al eje del generador para que pase de 120km/h a 3600rpm es de $r_1/r_2 = 2,78$.

- *Masa adicional al EV por los equipos y elementos del sistema de regeneración de energía cinética constante:* Es evidente que el EV debe aumentar su consumo de energía por unidad de distancia, debido a un peso agregado correspondiente a varios elementos que son necesarios para un sistema de regeneración de energía partiendo desde la GearBox, el generador, equipos de electrónica de potencia y conexión entre los mismos, pero principalmente a la *batería Secundaria*, por lo tanto se aumenta de 1521kg del Nissan Leaf a 2000kg en el modelo para el *sistema de regeneración de energía cinética constante*, una diferencia de 479kg tomada como un valor correcto a la suma de estos elementos y equipos.

II. 3. 2 LA ENERGIA CINETICA CONSTANTE RECUPERADA

El balance energético obedece la situación a que la energía entregada por la batería que va al motor también tiene que suministrar al generador, es decir que en la situación donde la potencia eléctrica de entrega de la batería, para este estudio en la programación de MATLAB es p_{elect} , sea mayor a cero, no existe una energía aprovechable por el sistema de regeneración de energía cinética constante, pero si obedece a los momentos donde se deja de acelerar, es decir, en los instantes donde el EV no recibe potencia de la batería pero va a una velocidad debida a la energía almacenada por el impulso dado por el motor, esta energía se puede expresar como la Inercia del EV que consiste en querer mantener la cantidad de momento que lleva, pero que es reducida por la interacción que tiene el EV con el ambiente.

La manera que se plantea para conocer cuánto de la energía en forma de inercia que lleva el vehículo es aprovechable para el sistema de regeneración de energía cinética constante corresponde a cuanta potencia del eje del motor es para mover el mismo y la sobrante es para nuestro sistema de regeneración, corresponde a la siguiente ecuación:

$$\text{Energía del EV} = P_{oteje} * t + Pot_{Wheels} * t \quad t = 1 \text{ seg} \quad (4)$$

Donde P_{oteje} es la energía instantánea que queda en el eje del EV donde no se encuentra el sistema motriz, que es la aprovechable para nuestro sistema.

$$P_{oteje} = \text{Energía del EV} * t - Pot_{Wheels} * t \quad t = 1 \text{ seg} \quad (5)$$

Por ecuaciones de energía cinética:

$$\text{Energía del EV} = \frac{1}{2} m(v(t))^2 = \frac{1}{2} J(\dot{\theta})^2 = \frac{1}{2} I(\omega)^2 \quad (6)$$

$$J = I = \sum_j m_j r_j^2 \quad (7)$$

La expresión $\sum_j m_j r_j^2$ corresponde $a I = m r^2$, siendo m la masa del EV y r el radio de la llanta la cual es de 0,2578m [8] propia de las características del Nissan Leaf. Además, $\omega = v(t)/r$

Remplazando (7) en (6) y la velocidad angular ω :

$$\text{Energía del EV} = \frac{1}{2} I(\omega)^2 = \frac{1}{2} m r^2 \left(\frac{v(t)}{r}\right)^2 = \frac{1}{2} m(v(t))^2 \quad (8)$$

Por lo tanto, la energía aprovechable para el sistema de regeneración de energía cinética constante en forma de inercia se puede expresar de manera simple con la ecuación de energía cinética de velocidad lineal $v(t)$.

Finalmente,

$$\text{Poteje} = \frac{1}{2} m(v(t))^2 * t - \text{PotWheels} * t \quad t = 1 \text{ seg} \quad (9)$$

La ecuación (9), describe cual es la energía que si es aprovechable cumpliendo con el balance energético. En los instantes de $p_{elect}=0$ y que se será la potencia a la entrada del generador.

II. 4 RESULTADOS DE LAS SIMULACIONES

Contando con los mismos perfiles de velocidad, se realiza la simulación del sistema de regeneración de energía cinética constante, sin contar el freno regenerativo, para hacer una comparación del consumo Wh/km y los Estado de carga. Los datos de los perfiles simulados se observan en la

Tabla 2. Parámetros iniciales de los perfiles simulados

NOMBRE DEL PERFIL	TIEMPO [seg]	VELOCIDAD PROMEDIO [km/h]	DISTANCIA RECORRIDA [KM]	CONSUMO DE ENERGÍA [Wh/km]
WMTC BAJA VELOCIDAD	600	24,42	4,07	234,59
MWTC COMPLETO	1798	57,88	28,91	226,59
UDDS	1370	31,32	11,92	215,48
HWFET	776	76,13	16,41	148,86
NEW YORK CITY TEST	599	11,30	1,88	354,07
US60	601	76,73	12,81	278,53

Se realiza análisis inicial del perfil de validación MWTC en velocidad (Fig. 15), teniendo en cuenta que este es un perfil urbano y teniendo en cuenta que la regeneración depende de la velocidad.

Para el caso de regeneración constante se puede apreciar lo siguiente resultados: El estado de carga de las baterías demuestra la descarga de la batería principal y la carga de la secundaria debido a que no llega a los umbrales establecidos del estado del estado de carga no hay “*switcheo*”; en la gráfica de potencia de batería se aprecia el perfil de velocidad en naranja segmentado, la potencia consumida en azul, la potencia regenerada útil en naranja y por último la potencia regenerada total en naranja claro línea segmentada, teniendo en cuenta que tenemos la regeneración constante se puede apreciar la regeneración total a lo largo de todo el perfil, la potencia útil es aquella que carga la batería secundaria y que no está siendo suministrada por la batería principal, para hacer la comparación en el promedio de energía consumida hay que tener en cuenta el tiempo en el que se hace debido a que para usar esa energía disponible hay que tener en cuenta el tiempo en el que se va a usar.

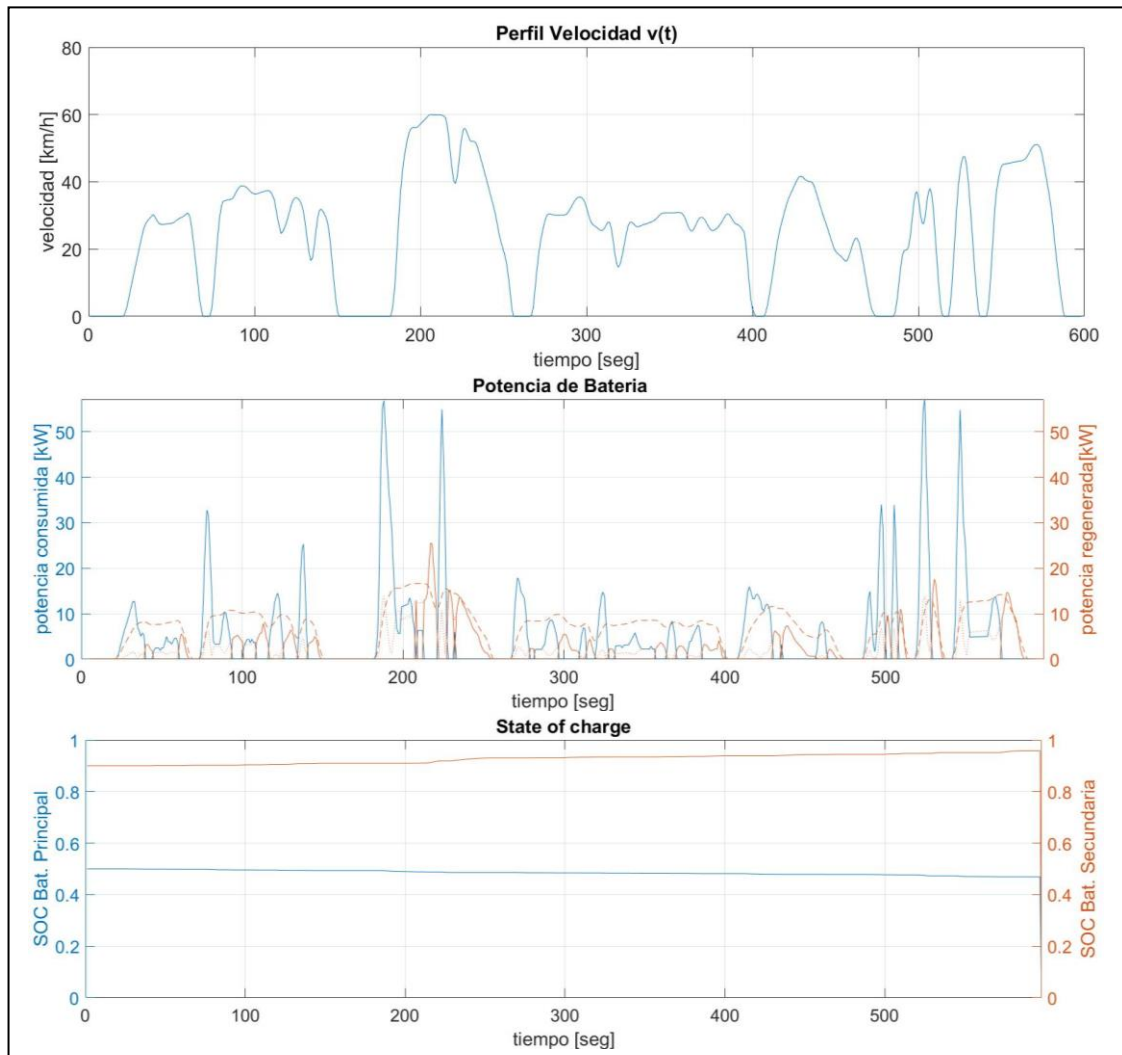


Fig. 15 Potencia de batería y Estado de Carga en Regeneración Constante MWTC baja velocidad

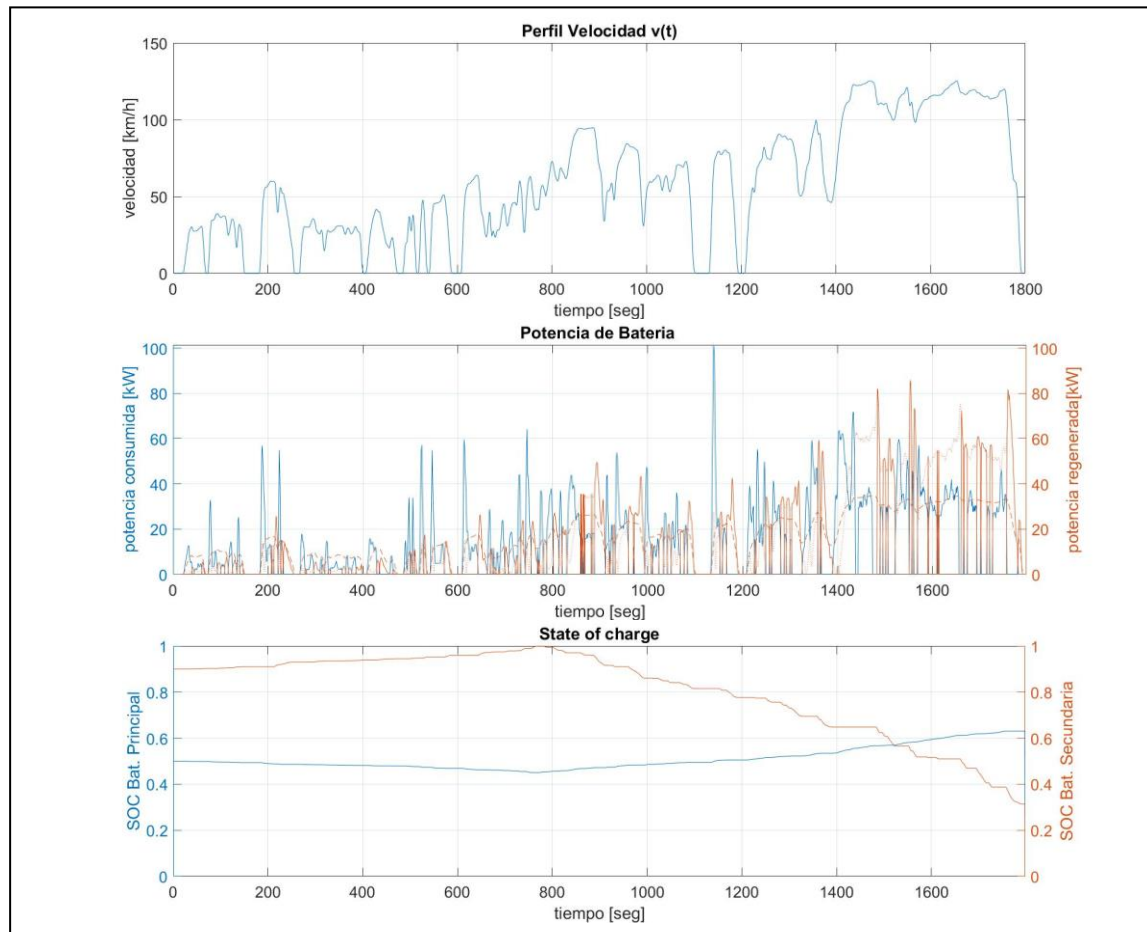


Fig. 16 Potencia de batería y Estado de Carga en Regeneración Constante MWTC completo

En la Fig.16 en la parte urbana se aprecia poca generación, en la última parte donde hay alta velocidad hay una alta generación, el SOC la batería secundaria cargo totalmente se realizó el “*switcheo*”, empieza a cargar la batería principal, donde se aprecia una mayor generación y descarga de la batería en la parte final del vector.

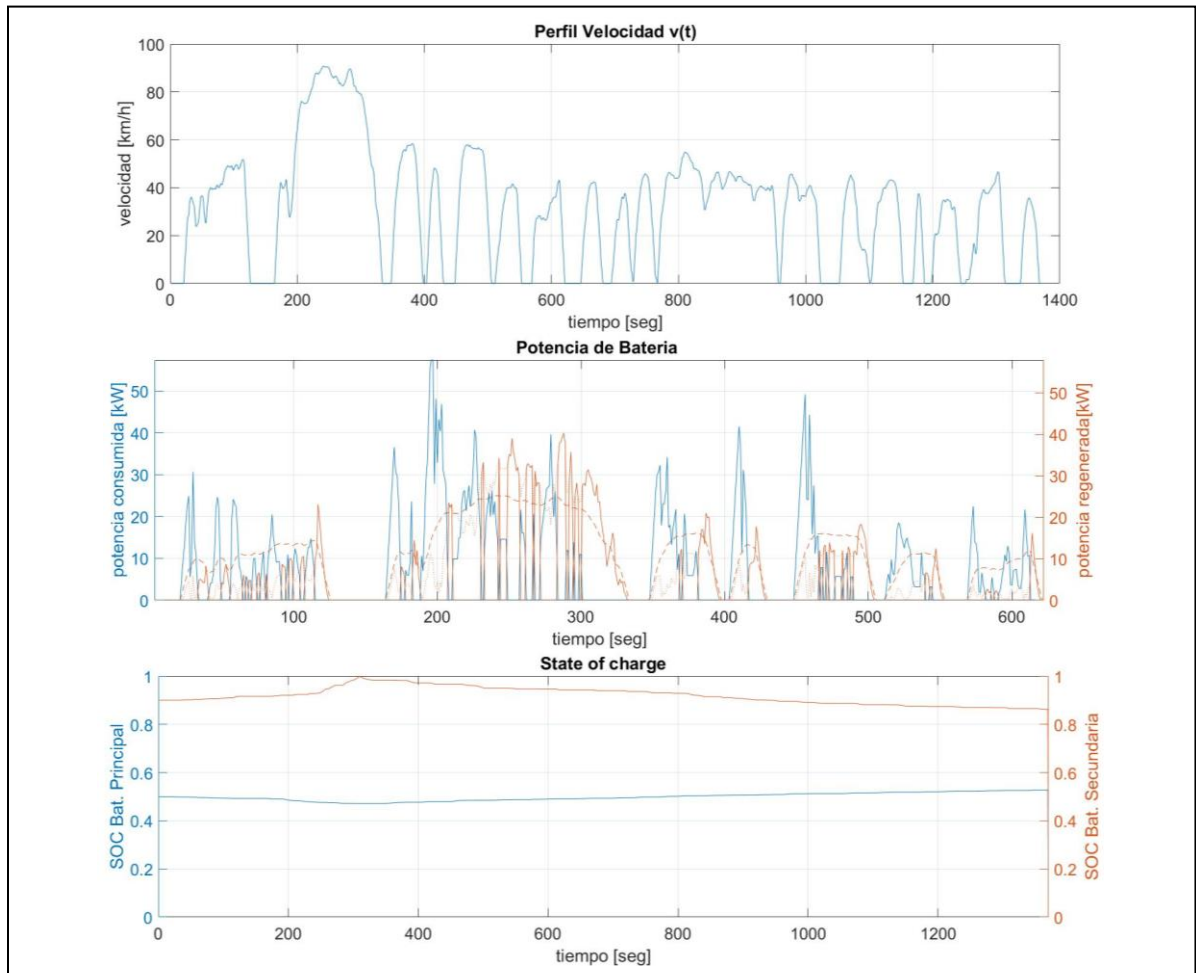


Fig. 17 Potencia de batería y Estado de Carga en Regeneración Constante UDDS

En el perfil de velocidad de la Fig.17 se aprecia en los primeros 600 segundos una velocidad alta lo que genera una recarga alta a la batería secundaria, desencadenado el switcheo de las baterías, en la última parte del perfil de velocidad disminuye las altas velocidades lo que baja mucho la generación el mismo.

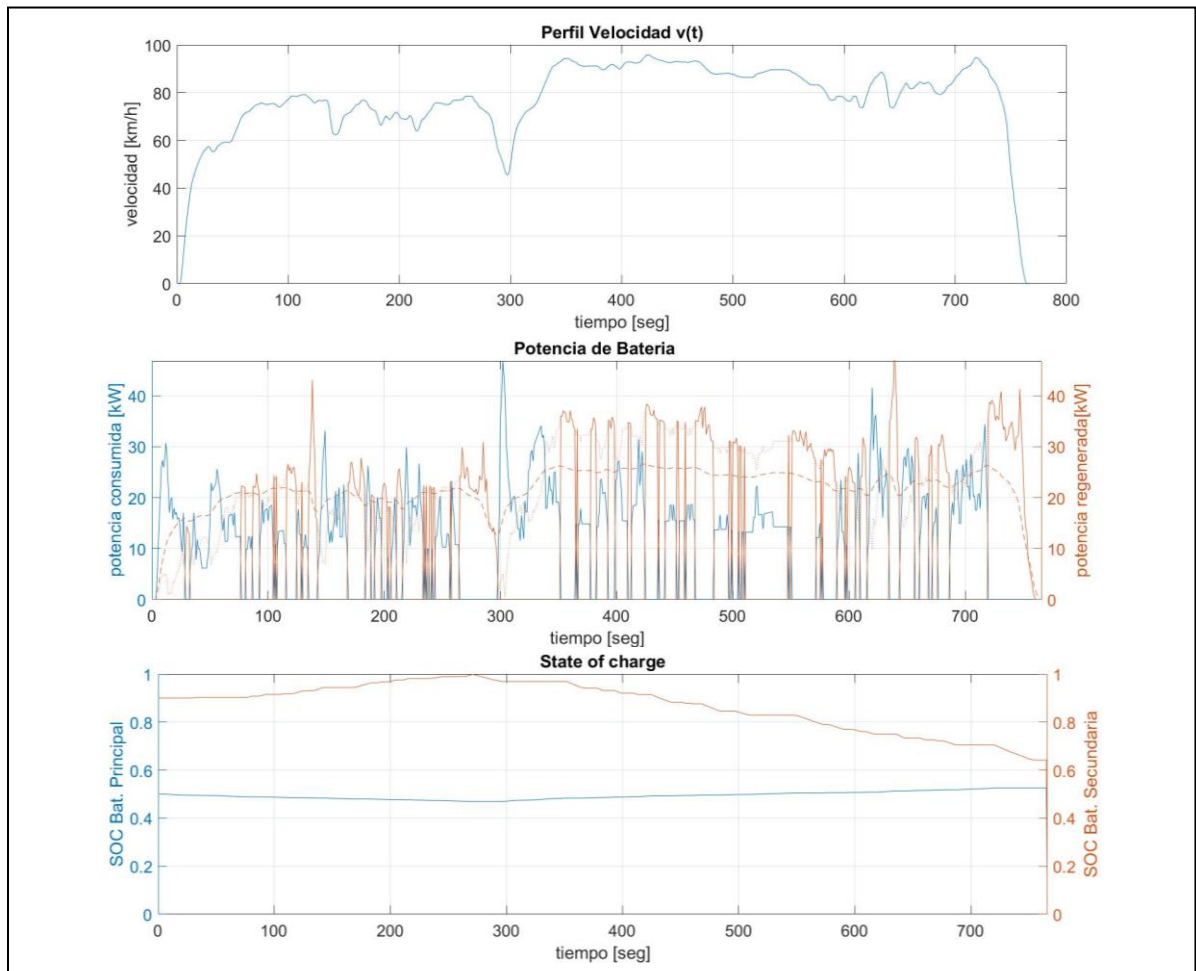


Fig. 18 Potencia de batería y Estado de Carga en Regeneración Constante HWFET

El perfil de velocidad HighWay Fuel Economy Test [14] que se aprecia en la Fig. 18 potencia una alta regeneración de energía en el cual el EV tiene varios segundos de recorrido con alta velocidad, pero sin aceleración, lo que resulta muy favorable para el *sistema de regeneración de energía cinética constante*.

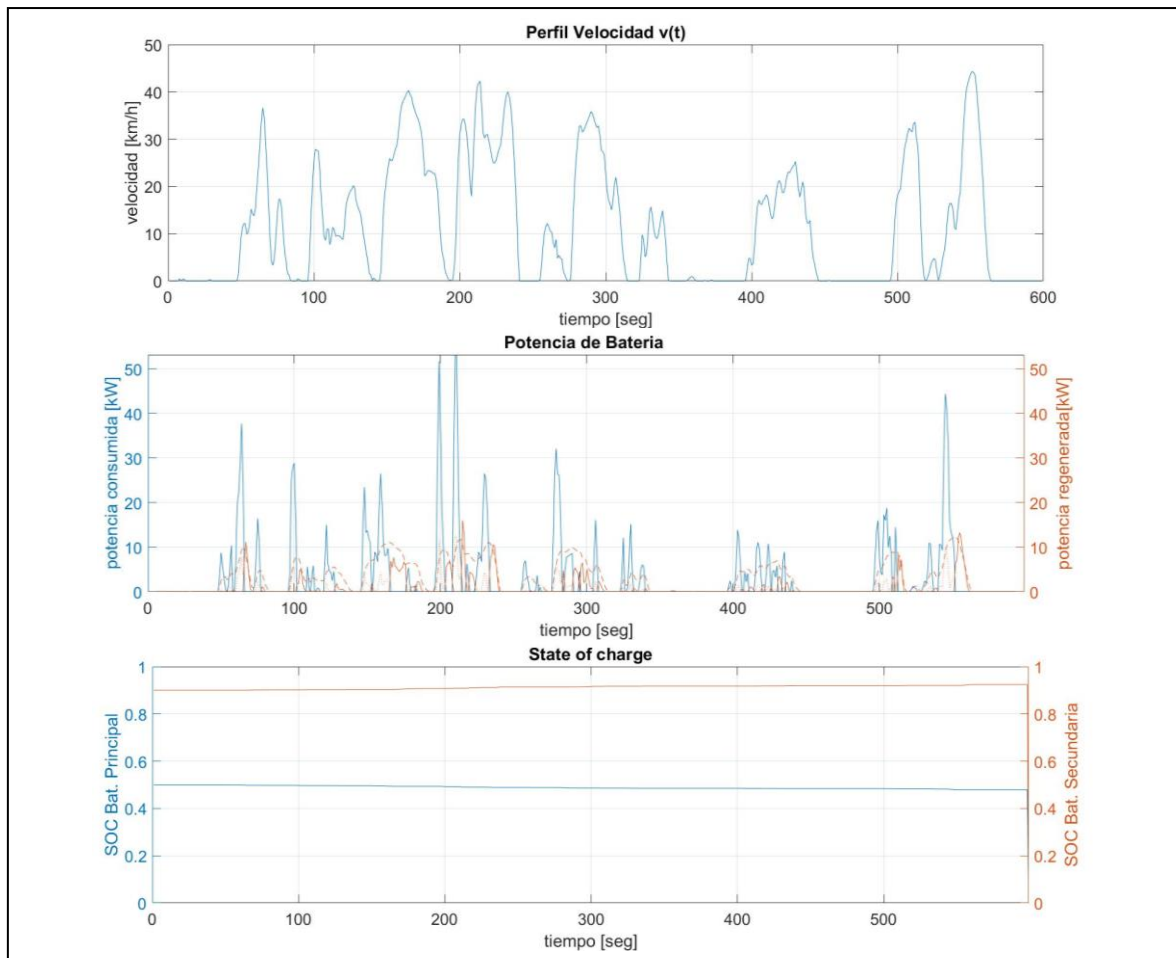


Fig. 19 Potencia de batería y Estado de Carga en Regeneración Constante NY City Test

Al contrario del perfil de velocidad HWFET de la Fig. 18, el perfil que se aprecia en la Fig. 19 de un recorrido de 10min en la ciudad de New York resulta muy desfavorable para el sistema en estudio, sucede a la gran cantidad de momentos de frenado y muy bajas velocidades.

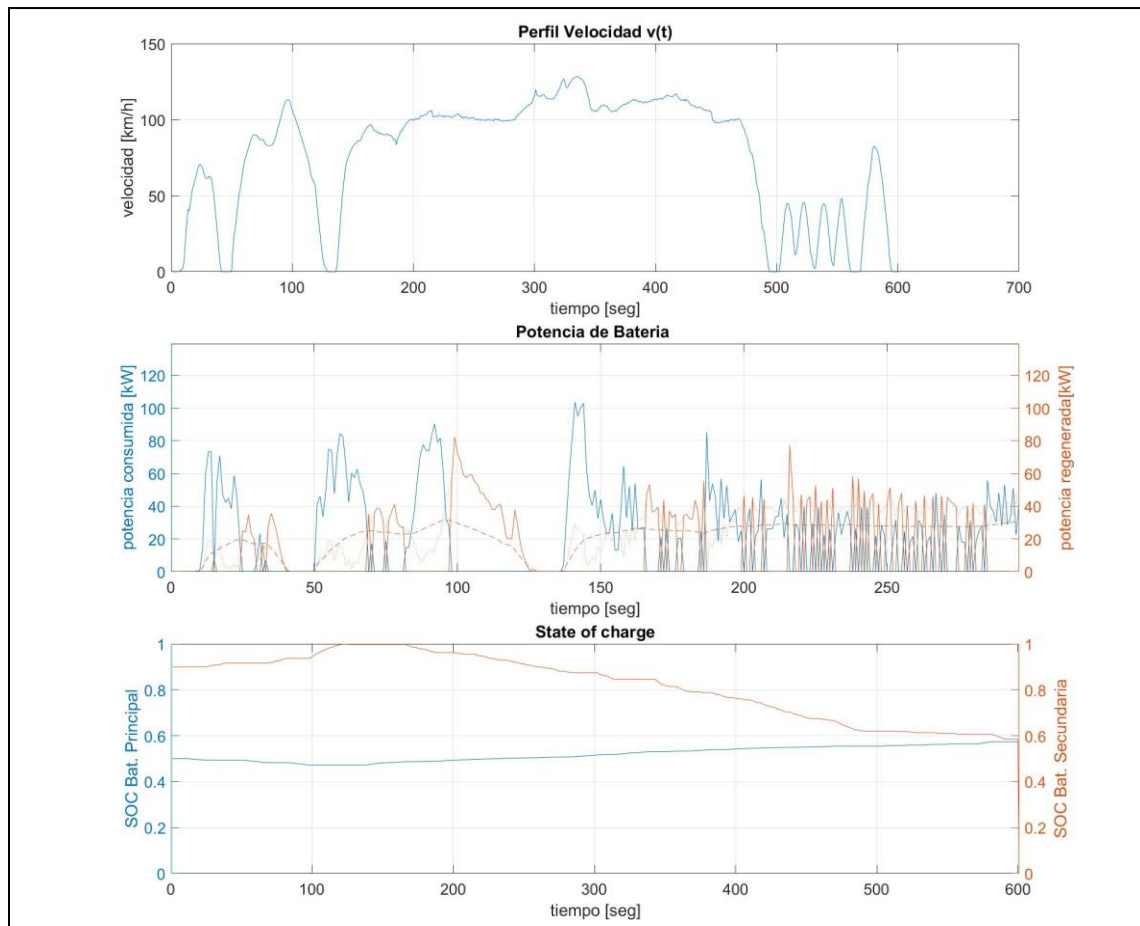


Fig. 20 Potencia de batería y Estado de Carga en Regeneración Constante US60

La gráfica de Potencia en Batería del perfil de velocidad US60 de la Fig. 20 corresponden solo a los primeros 300 segundos del recorrido, se trabajó de esta manera para ser apreciable los momentos de aceleración leves al principio del recorrido, dentro de los cuales la generación constante útil es muy baja, finalmente la generación útil aumenta gradualmente cuando la velocidad también aumenta, se aprecia en la diferencia de la pendiente de la gráfica de Estado de Carga de la batería principal.

CAPITULO III

ANÁLISIS DE RESULTADOS

III. 1 COMPARACIÓN DE CONSUMOS DE ENERGÍA

A continuación, se muestra una tabla comparativa con los consumos [Wh/km] de los dos sistemas de recuperación de energía, con su diferencia porcentual entre los mismos y una relación del *sistema de regeneración de energía cinética constante* sobre el sistema de Freno Regenerativo por los perfiles de velocidad urbanos y de carretera estudiados.

Tabla 3 Resultados de simulaciones Freno regenerativo y Regeneración constante.

$v(t)$	Freno Regenerativo [Wh/km]	Energía cinética constante	Diferencia porcentual de consumo [%]	Relación de consumo	Tiempo [seg]	distancia [km]	promedio de $v(t)$ [km/h]
WMTC Low	139,76	234,49	67,8%	1,68	600	4,07	24,42
WMTC	158,62	226,59	42,9%	1,43	1798	28,91	57,88
UDDS	135,05	215,48	59,6%	1,60	1370	11,92	31,32
HWFET	137,00	148,86	27,2%	1,27	776	16,41	76,13
US06	190,39	278,53	46,3%	1,46	601	12,81	76,73
Caso de Estudio	142,67	114,49	19,8%	0,80	6446	172,75	96,48
NY	208,25	354,97	70,5%	1,70	599	1,88	11,30

Se evidencia un aumento del consumo de energía promedio por kilómetro para el *sistema de regeneración de energía cinética constante*. Debida principalmente a la masa adicional de los elementos del sistema, [12].

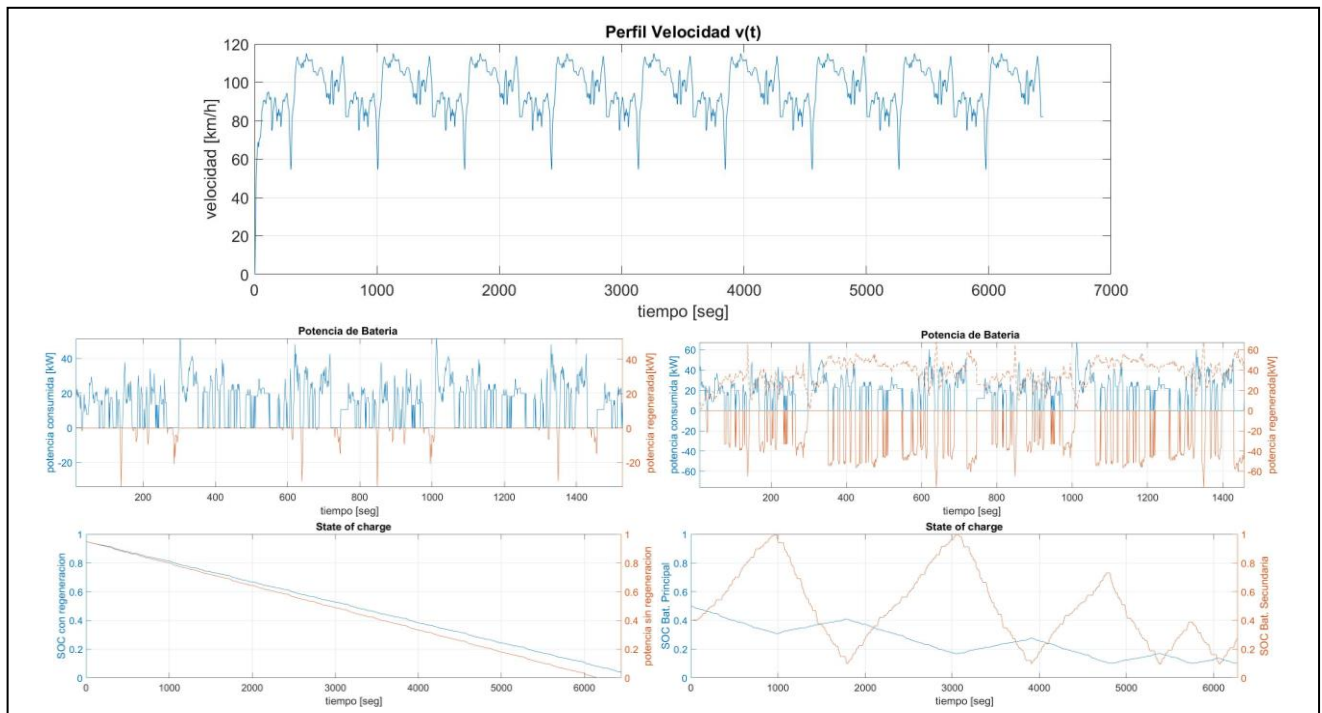


Fig. 21 Comparación de la potencia freno regenerativo y regeneración constante.

III. 2 BATERÍAS Y ESTADO DE CARGA EN EL CASO DE ESTUDIO

El estado de carga para el perfil de velocidad Caso de estudio, representa la cantidad de energía eléctrica que todavía almacena la batería por cada segundo del recorrido del EV, solo para el Caso de estudio se encontró un resultado favorable en el nivel final de la BP, donde para el Freno Regenerativo termina el recorrido con menos de un 5%, (se evidencia que sin el sistema de Freno Regenerativo el EV no hubiera podido completar el recorrido) y para el *sistema de regeneración de energía cinética constante* termina con un 10% aproximadamente, aclara que para los otros perfiles de velocidad que se estudiaron siempre son estados de carga favorables para el sistema de Freno Regenerativo y solo para el de Caso de estudio se logró maximizar su viabilidad.

Se evidenció un aumento de la entrega de potencia de la *Batería principal* para alcanzar la misma velocidad, que a términos prácticos y en casos reales podrían provocar a las baterías sobrecalentamientos y deterioros prematuros, para la programación de este estudio, se planteó el uso de baterías de Ion-Litio (LiCoO₂) sin un límite de entrega máxima de potencia, ya que no está en el alcance de esta investigación el comportamiento físico y la salud de las baterías, pero se considera que a largo plazo tendría sus implicaciones a la vida útil de las baterías.

III. 3 ENERGÍA APROVECHABLE

Se obtiene una gran cantidad de energía que teóricamente existe y está disponible si se hace un análisis matemático, este puede aumentar la viabilidad del dispositivo (regeneración constante); el único problema es que de manera física no podemos usar esa energía, ya que se necesitan dos baterías: la secundaria para recibir energía y la principal para suministrar energía al motor, por lo tanto es necesario hacer un switcheo para el cambio de la batería secundaria con la primaria, seguidamente hacer el análisis de manera adecuada en la misma cantidad de tiempo con el freno regenerativo para esto es necesario usar los estados de carga de la batería ya que se necesita hacer el switcheo en un tiempo apropiado para usar esta energía disponible finalmente así aseguramos la comparación correcta de los dos tipos de generación.

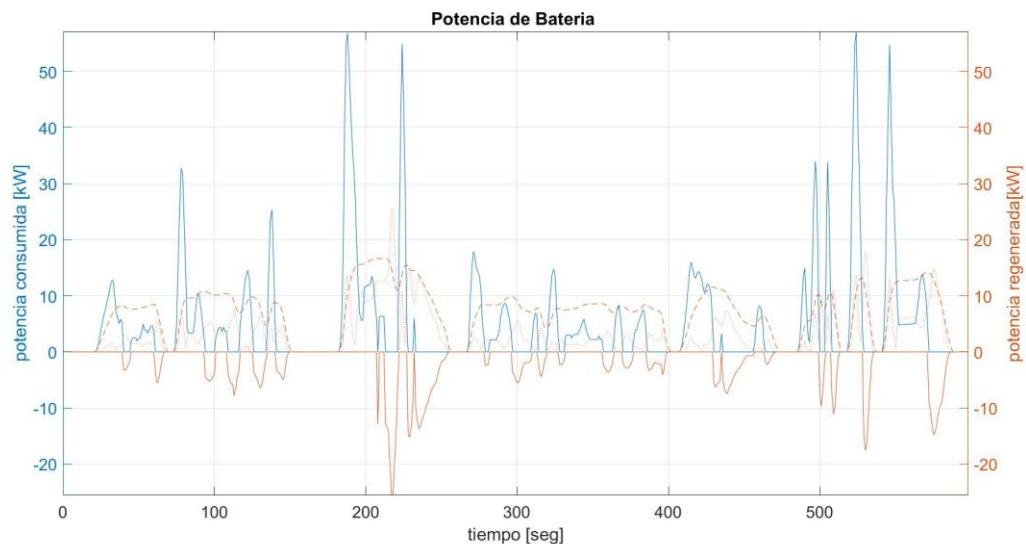


Fig. 22. Gráfica de potencia en batería primaria (azul) y secundaria (naranja) con perfil de velocidad traslapado y perfil de regeneración completo (naranja claro).

El encontrar un aumento del consumo de energía del EV con el *sistema de regeneración de energía cinética constante* en un mismo recorrido comparativo con un sistema de Freno regenerativo, representa una poca viabilidad al mismo, en virtud de que un sistema de recuperación de energía busca que a un mismo perfil de velocidad se logren consumos [Wh/km], lo que lleva a un dimensionamiento de baterías de menor capacidad sin sacrificar la autonomía.

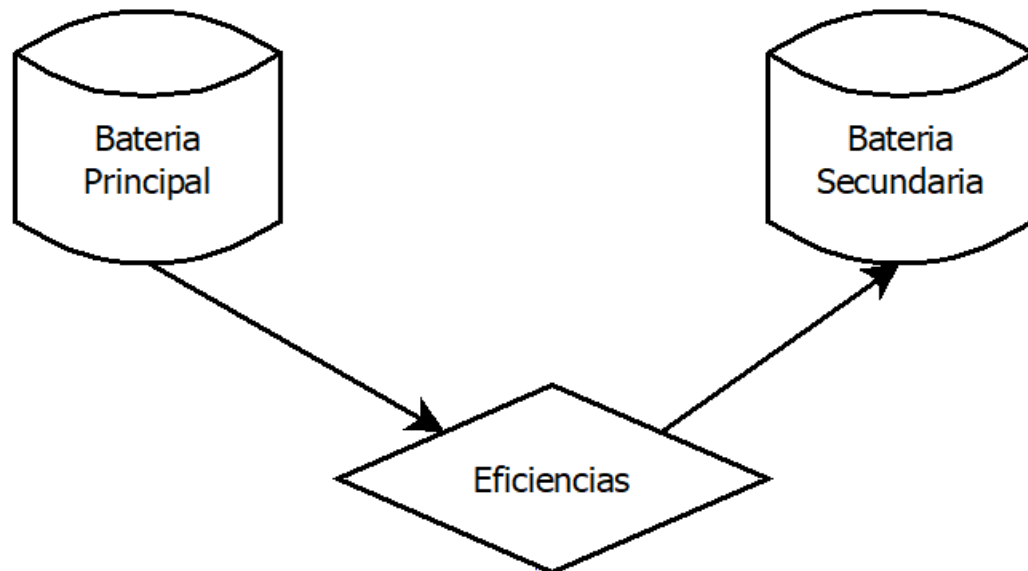


Fig. 23 Intercambio de Energía de las Baterías

Los resultados de los valores máximos de la potencia entregada por la BP son mayores a los encontrados en las simulaciones con el sistema de Freno Regenerativo, esto se debe a que, cuando el EV se encuentra acelerando la energía que debe entregar la BP debe suplir con la carga que pide el EV para su movimiento y también para hacer un intercambio de energía a la BS, es decir, no es aprovechable la energía que lleva el EV cuando el conductor está obturando el acelerador, por que va desde de la batería que entrega potencia al motor, pasando por los diferentes elementos de los sistemas con sus correspondientes eficiencias, hasta la batería que está en trabajo de almacenar la potencia convertida del generador.

El análisis de balance energético resulta como: solo es aprovechable la inercia que lleva el EV por el impulso que deja el motor eléctrico al momento que se termina de acelerar pero que aún conserva una velocidad, que trasforma una velocidad angular al eje del generador como energía útil para ser almacenada en la batería (que según sea el caso del intercambio de baterías) se encuentre en posibilidad de hacerlo.

CONCLUSIONES

- Con los datos empleados y resultados obtenidos se observa una baja viabilidad para implementar este tipo de recuperación de energía, más si el recorrido se constituye más como de ciclo urbano, donde se reducen las oportunidades a que el *sistema de regeneración de energía cinética constante* tenga momentos de aprovechamiento de la inercia del vehículo, poniendo al sistema de Freno Regenerativo como más adecuado a EV que su naturaleza de viajes se desempeñe dentro de una ciudad, donde se tiene mayor presencia de desaceleraciones en tráfico.
- Se observa que una opción para lograr viabilidad del *sistema de regeneración de energía cinética constante*, teniendo claro que, el EV solo genera energía útil cuando la batería principal no está entregando potencia, momento en el que el vehículo se mueve por su inercia adquirida por el impulso del motor eléctrico, por lo tanto en velocidades altas sin pisar el acelerador como en aceleraciones debidas a pendientes se tiene la posibilidad de mejorar el aprovechamiento de energía factible a usar.
- Se encontró con el *sistema de regeneración de energía cinética constante* un aumento del consumo promedio de la energía en las baterías, se debe a que el EV tiene que recurrir a mas potencia de entrega de la batería y debido a que para aprovechar la energía almacenada en la batería secundaria se debe hacer un switcheo y para hacerlo se deben cumplir con restricciones de carga y descarga de las dos baterías, si se hace el análisis en un tiempo reducido estas condiciones pueden no alcance a cumplir por lo cual la batería principal estaría supliendo en totalidad el movimiento del vehículo.
- Para verificar una viabilidad o no viabilidad definitiva del *sistema de regeneración de energía cinética constante* es necesario hacer un estudio detallado de los diferentes configuraciones y elementos que componen el sistema, debido a que en este estudio solo se contempló una configuración basada en las eficiencias de las máquinas y no sus características internas.
- Es necesario hacer un estudio detallado de posibles conexiones y desconexiones de elementos específicos que componen el sistema como la transmisión y motor principal como parte de la verificación total del *sistema de regeneración de energía cinética constante*, para poder descartar cualquier variable de peso que no se haya analizado en este estudio.

TRABAJOS FUTUROS

- Estudiar la posible conexión y desconexión de la caja de transmisión cuando el vehículo realiza cambios de aceleración para minimizar el intercambio de energía entre las baterías y reducir el consumo total.
- La máquina rotativa como generador, se debe estudiar sus características internas y demás variables, es decir, un estudio de las diferentes configuraciones de generadores para determinar en un caso real cual es la máquina más adecuada, con el mejor manejo de su eficiencia y velocidades mecánicas.
- Es importante estudiar la programación de manejo de velocidad crucero del vehículo para energizar y desenergizar el motor de tracción para lograr momentos de inercia a velocidades altas de esta manera optimizar al máximo la regeneración del EV.
- Contar con diferentes perfiles de velocidad con información de la inclinación que lleva en la ruta, para un estudio en viajes con inclinación negativa que beneficien la recuperación de energía que adquiere el EV por diferencia de alturas.
- Estudiar para diferentes tipos de vehículos y sistemas de transporte, con diferentes características de peso, rodadura, carga aerodinámica etc. Que permitan en un mismo recorrido tener una mayor recuperación de energía o una reducción de consumo.

REFERENCIAS

- [1]. Electro movilidad, <http://electromovilidad.net/tipos-de-bateria-para-coche-electrico/>
- [2]. <https://www.xataka.com/automovil/esto-sera-lo-proximo-en-baterias-para-coches-electricos-mas-de-650-km-de-autonomia-real>
- [3]. <https://www.xataka.com/automovil/cuanta-autonomia-real-tiene-un-coche-electrico>.
- [4]. Stephen J. Chapman, Máquinas eléctricas, McGRAW-HILL, pág. 2,2012
- [5]. Stephen J. Chapman, Máquinas eléctricas, McGRAW-HILL, pág. 241,2012
- [6]. Stephen J. Chapman, Máquinas eléctricas, McGRAW-HILL, pág. 244,2012
- [7]. Patricio Concha, Circuito equivalente del motor de inducción, ubb, <http://patricioconcha.ubb.cl/maquinas/paginas/mom.vel.materia.html>
- [8]. Stephen J. Chapman, Máquinas eléctricas, McGRAW-HILL, pág. 253,2012
- [9]. Stephen J. Chapman, Máquinas eléctricas, McGRAW-HILL, pág. 255,2012
- [10]. Stephen J. Chapman, Máquinas eléctricas, McGRAW-HILL, cap5. 2012
- [11]. Stephen J. Chapman, Máquinas eléctricas, McGRAW-HILL, cap6. 2012
- [12]. Stephen J. Chapman, Máquinas eléctricas, McGRAW-HILL, cap7. 2012
- [13]. Jorge Luis Díaz Rodríguez, Inversor de Potencia PWM Didáctico, laccei.
- [14]. vehicle-and-fuel-emissions-testing, epa, https://www.epa.gov/vehicle-and-fuel-emissions-testing/dynamometer-drive-schedules?fbclid=IwAR3_7ppiDwNmJ10NH5uP7hHj5oQCzvj4nFOfNoeK7Htt4GoBanCwfe-LLLM
- [15]. KM 77, Ficha técnica y precios de Modelos tesla, <https://www.km77.com/coches/tesla/model-s/2016/estandar/estandar/model-s-p100d/datos>
- [16]. De Gennaro M, Paffumi E, Martini G, Manfredi U, Vianelli S, Ortenzi F, et al. Experimental test campaign on a battery electric vehicle: laboratory test, 2016 results (Part 1). SAE Int J Altern Powertrains 2015; 4:100–14.
- [17]. Experimental test campaign on a battery electric vehicle: laboratory test, 2016

- [18]. Department of Energy (DOE). Advanced vehicle testing activity (AVTA) of the Idaho Nation Laboratory (INL); 2013.
- [19]. Nissan Leaf. Nissan Leaf characteristics; 2015.
- [20]. Jesús García, Vehículos Eléctricos nuevas tecnologías, 2015
- [21]. Cristian De Angelo, Guillermo Bossio, implementación de un convertidor reductor-elevador bidireccional para vehículos eléctricos.2016
- [22]. Daniel Rubio Soto, caracterización de motores de inducción trifásicos en aplicaciones de tracción, universidad de katalunya.2014
- [23]. Carlos Peña Ordoñez, estudio de baterías para vehículos eléctricos, escuela politécnica superior,2011
- [24]. C. Martínez-Peñalver, Modelado y Simulación de una Batería de Ion-Litio Comercial Multicelda, 2006
- [25]. S. Zoroofi, "Modeling and Simulation of Vehicular Power Systems." M.S. Thesis, Dept. Eng. Envmt., Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden, 2008.
- [26]. Chuanpu Zhang, Method for evaluating the real-world driving energy consumptions of electric vehicles, energy,2017
- [27]. Kyoungho Ahn, Hesham A. Rakha, Power-based electric vehicle energy consumption model: Model development and validation Applied Energy, 2016.
- [28]. J.M.G. Arevalo, Carga de una batería y electricidad, dos términos de utilizaicon confusa 2011
- [29]. Gao Y, Chu L, Ehsani M. Design and control principles of hybrid braking system for EV, HEV and FCV. In: Vehicle power and propulsion conference, 2007 VPPC 2007 IEEE. IEEE; 2007. p. 384–91.
- [30]. Chevy Volt. Chevy Volt tech watch: regenerative braking; 2011.
- [31]. UNECE. Worldwide harmonized light vehicles test procedure (WLTP); 2014.