

**UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA**

**MÁSTER UNIVERSITARIO EN AUTOMÁTICA E  
INFORMÁTICA INDUSTRIAL**



**UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA**

**DISEÑO Y EVALUACIÓN DE TÉCNICAS DE  
OPTIMIZACIÓN MULTIOBJETIVO PARA SISTEMAS  
DE GESTIÓN DE REFERENCIAS EN LAZO DE  
CONTROL**

**TESINA FINAL DE MÁSTER**

**AUTOR:**

Pajares Ferrando, Alberto

**DIRECTORES:**

Blasco Ferragud, Francesc Xavier

Reynoso Meza, Gilberto

**Valencia, a 8 de Septiembre de 2014**

# Índice general

Descripción	Página
1.- INTRODUCCIÓN Y JUSTIFICACIÓN .....	4
2.- ANTECEDENTES DEL PROBLEMA .....	6
3.- PROBLEMA DE OPTIMIZACIÓN MULTIOBJETIVO .....	9
4.- CONTROL DE LA PLANTA DE CUATRO TANQUES .....	12
4.1 Introducción .....	12
4.2 Modelo .....	13
4.3 Implementación .....	14
4.4 Problema de optimización multiobjetivo .....	18
4.4.1 Definición del problema de optimización multiobjetivo .....	18
4.4.2 Proceso de optimización multiobjetivo .....	21
4.4.3 Proceso de selección y toma de decisión multi-criterio .....	21
4.5 Evaluación de la solución escogida .....	28
4.6 Resultados .....	30
4.7 Posibles Mejoras .....	31
5.- CONTROL DEL SISTEMA DE GESTIÓN DE LA ENERGÍA DE UN VEHÍCULO HÍBRIDO ELÉCTRICO .....	34
5.1 Introducción .....	34
5.2 Chevrolet Volt .....	36

5.2.1 Tren de potencia.....	38
5.2.2 Planetary gear set .....	39
5.2.3 Modos de funcionamiento.....	41
5.3 Modelo.....	43
5.4 Implementación del sistema de gestión de la energía.....	44
5.5 Problema de optimización multiobjetivo.....	51
5.5.1 Definición del problema de optimización multiobjetivo .....	51
5.5.2 Proceso de optimización multiobjetivo.....	54
5.5.3 Proceso de selección y toma de decisión multi-criterio.....	54
5.6 Evaluación de la solución escogida .....	58
5.7 Resultados.....	65
6.- CONCLUSIÓN Y TRABAJOS FUTUROS .....	68
7.- BIBLIOGRAFÍA .....	70

## 1.- INTRODUCCIÓN Y JUSTIFICACIÓN

Hoy en día, prácticamente en cualquier área y en una gran variedad de contextos, se presentan problemas de optimización con múltiples objetivos que se contraponen entre sí. El diseñador debe formular el problema de manera que cumpla con una serie de requerimientos y especificaciones. Esto es lo que se conoce como *problema de optimización multiobjetivo* (MOP [1] por sus siglas en inglés). Este tipo de optimización difiere de enfoques tradicionales y calcula un conjunto de soluciones, todas ellas óptimas pero con diferente balance entre las prestaciones de diseño. Usualmente no es posible encontrar una solución que optimice simultáneamente todos los objetivos de diseño. El objetivo del proyecto es explorar las mejoras que puede aportar la optimización multiobjetivo en las capas superiores de control conocidas como *Real-Time Optimization* (RTO [2]) que trata de establecer las referencias para los sistemas de control de la capa inferior. Los RTO tratan de llevar el sistema a un punto de operación rentable, seguro y eficiente.

El término RTO se ha extendido rápidamente en la industria, y construye un nivel superior del sistema de control que se encarga de calcular las referencias óptimas en cada instante. Este proceso se puede realizar en línea (on-line) o fuera de ella (off-line). El motivo para realizar este control fuera de línea es el coste computacional, ya que en muchos procesos no es posible realizar este cálculo simultáneamente o es muy costoso computacionalmente.

Un sistema de control suele ser jerárquico. De esta manera se puede incluir en una capa superior el nombrado RTO. Con esta capa, se proporciona al sistema de control inferior un punto óptimo que consiga minimizar los objetivos en ese instante. Esta optimización en tiempo real puede ser utilizada para mejorar el rendimiento del sistema y se está extendiendo rápidamente en la industria. De esta forma se puede informar o realizar cambios sobre el sistema dependiendo del instante en el que se encuentre. El objetivo de este proyecto es incluir un RTO para mejorar el rendimiento del sistema, basándose en técnicas de optimización multiobjetivo.

En el presente proyecto se ha realizado el diseño y evaluación de un RTO para diferentes tipos de procesos. El primero de ellos desarrolla un sistema para el control de la planta de cuatro tanques [3], en el cual se deberá minimizar un índice. Este proceso multivariable consta de cuatro tanques interconectados, y es ideal para ilustrar muchos conceptos de control multivariable. Este proceso se ha utilizado para realizar un primer acercamiento a las técnicas propuestas en el proyecto, las cuales se probarán más en profundidad mediante el segundo proceso. Este segundo y último proceso es el sistema de gestión de la energía (EMS [4] por sus siglas en inglés) de un vehículo híbrido eléctrico (HEV [5]). Este proceso se ha realizado mediante un simulador que intenta imitar el funcionamiento del vehículo híbrido Chevrolet Volt [6].

Esta memoria se organiza del siguiente modo: La sección 2 nos informa de los antecedentes del problema; En la sección 3, se entrará en detalle sobre el concepto de *problema de optimización multiobjetivo*; Más tarde, se realizarán el control de la planta de cuatro tanques, como proceso de acercamiento al proceso principal del proyecto; En la sección 5, se realizará el control principal del proyecto, el sistema de gestión de la energía de un vehículo híbrido eléctrico; Posteriormente se detallaran las conclusiones y trabajos futuros; Por último se realizarán las conclusiones y trabajos futuros.

Hay que añadir que el proyecto se origina en el contexto de los trabajos de un proyecto multidisciplinar de la UPV Programa PAID-05-12, pero ya ha finalizado y los trabajos prosiguen tratando de completar aspectos que se trataron en dicho proyecto.

## 2.- ANTECEDENTES DEL PROBLEMA

Un MOP difiere de enfoques tradicionales. Calcula un conjunto de soluciones, todas ellas óptimas, pero con diferente balance entre las prestaciones de diseño. Normalmente no es posible encontrar una solución que optimice todos los objetivos de diseño simultáneamente, con lo que la solución final se deberá seleccionar de este conjunto de soluciones óptimas. Este concepto se explicará con más detalle en las siguientes secciones.

Se habla de un MOP cuando convergen en la metodología de diseño al menos tres elementos, como se observa en la figura 1. En primer lugar la definición de un problema multiobjetivo; posteriormente la obtención de un conjunto de soluciones óptimas mediante un algoritmo; y por último un proceso de selección y toma de decisiones multi-criterio (MCDM por sus siglas en inglés) para seleccionar la solución que se implementará.

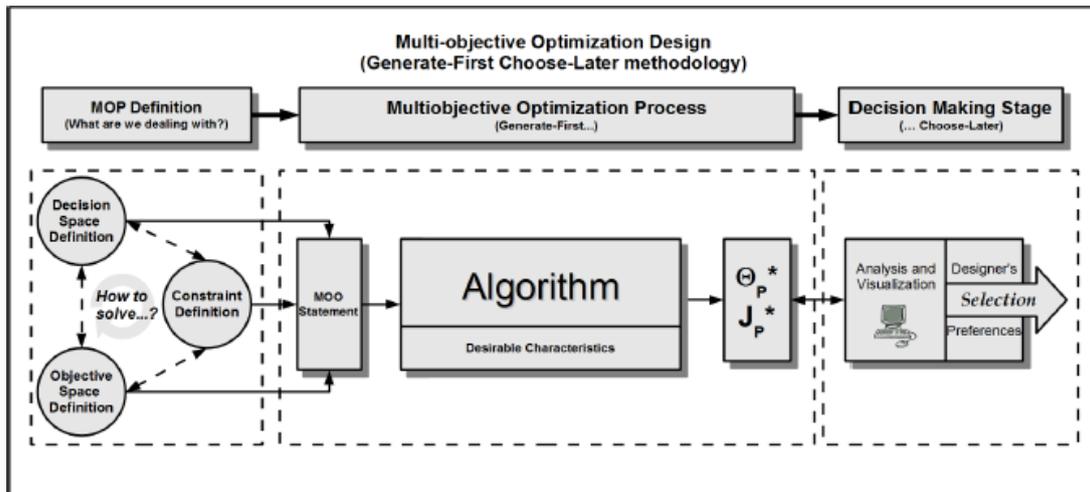


Figura 1: Proceso de optimización multiobjetivo para el diseño en ingeniería [1]

Por lo tanto es necesario emplear algunas herramientas para llevar a cabo un MOP. Primero se necesitará un algoritmo que busque el conjunto de soluciones óptimas del problema y posteriormente herramientas para la elección de la solución más idónea.

Respecto al algoritmo, un resumen sobre estrategias utilizadas para tal propósito pueden encontrarse en Marler and Arora (2004) [7]. Se ha decidido emplear un algoritmo evolutivo multiobjetivo (MOEAs [8] por sus siglas en inglés) para este cometido, ya que proporciona la posibilidad de obtener, simultáneamente, un conjunto de soluciones óptimas en cada ejecución. El empleo de este tipo de algoritmos [9] como motor de optimización en el anterior proceso de diseño puede resultar beneficioso, pues permite optimizar funciones de coste no-lineales, no-convexas y con restricciones. Este tipo de

técnicas holística ha mostrado ser efectiva para abordar problemas de diseño complejos. En concreto en este proyecto se trabajará con el algoritmo evolutivo multiobjetivo SP-MODE<sup>1</sup> [10], ya que ha mostrado buen desempeño y tiene código abierto. Además es fácil de interpretar para cualquier usuario ajeno a este tipo de algoritmos.

Además del algoritmo a emplear, es necesario utilizar herramientas para la última etapa de los MOP (MCDM). Es ampliamente aceptado que las herramientas de visualización son valiosas y proporcionan a los diseñadores un método significativo para analizar el conjunto de soluciones óptimas, y de este modo seleccionar las mejores soluciones en los diferentes contextos [11]. Para los problemas de dos dimensiones (y, a veces para tres dimensiones) suele ser sencillo realizar un análisis gráfico preciso, pero esto se hace más difícil para dimensiones más altas.

En esta dirección se desarrolló una alternativa, denominada Level Diagrams (LD) [12]. Esta alternativa, permite un análisis más fácil del conjunto de soluciones óptimas y por ello es útil en la toma de decisiones. LD se puede utilizar en una metodología a priori e interactiva para ayudar a la decisión de la mejor solución. Cuando se combina con una metodología de coloración para identificar las preferencias, puede ser una herramienta poderosa para el proceso de MCDM. Éste es el caso de la LD-Tool (Matlab versión)<sup>2</sup>.

Pese a estas ventajas, LD-Tool (versión Matlab) tiene algunas limitaciones respecto a su uso. En primer lugar, su ejecución depende del programa Matlab, una herramienta de software matemático. Esto es una limitación, ya que no permite que su uso se extienda con facilidad. Por otro lado, el acceso a la programación no es sencillo, porque se requieren unos conocimientos previos de programación en el entorno de Matlab.

Es por ello que se diseñó otra herramienta con este propósito, llamada LD-Tool<sup>3</sup>. Esta aplicación es de libre utilización y tiene mayores prestaciones para el graficado. Además ya no depende del entorno Matlab. Sin embargo, con LD-Tool se pierden prestaciones de scripting<sup>4</sup> de la versión original.

En lo que se refiere a los procesos elegidos para el presente proyecto, se han elegido sistemas que forman parte de un concurso, lo que proporciona grandes ventajas. Por un lado, mayor detalle en el enunciado del mismo, y por otro, y más importante, la posibilidad de comparar resultados con los participantes del concurso. De esta forma se pueden comparar los objetivos obtenidos con los de otros sistemas propuestos, para verificar de una forma más veraz los resultados obtenidos. Es por este motivo, por el

---

<sup>1</sup> Disponible en Matlab central

<sup>2</sup> Disponible en <http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/24042>

<sup>3</sup> Disponible en <http://cpoh.upv.es/es/investigacion/software.html>

<sup>4</sup> Posibilidad de utilizar un lenguaje de programación de alto nivel para realizar el análisis y filtrado de datos.

que se decide basar el proyecto en modelos que se encuentren dentro del marco de un concurso, ya que reúne las mejores características para el proyecto.

El primero proceso propuesto es la planta de cuatro tanques ya que es un modelo que se ha utilizado para una gran cantidad de sistemas. La implementación de este proceso fue propuesta por Karl H. Johansson [3], y ha sido muy utilizada por su interés como problema de control y su sencillez de uso. Consta de cuatro tanques de agua interconectados, y es ideal para ilustrar muchos conceptos de control multivariable. Este proceso se utiliza en el concurso de ingeniería de control 2014 [13].

El segundo proceso es el sistema de gestión de la energía de un vehículo híbrido eléctrico. Se ha escogido este proceso ya que los vehículos híbridos son una realidad desde hace muchos años, y poco a poco empiezan a hacerse populares en el marco de la crisis económica actual, por el alza de los precios de los combustibles, abaratamiento de la tecnología y concienciación ambiental. Pese a ello, estos vehículos todavía están en fase de investigación, sobre todo en lo que se refiere al diseño de su gestor de la energía.

### 3.- PROBLEMA DE OPTIMIZACIÓN MULTI OBJETIVO

El objetivo de este proyecto es utilizar técnicas de optimización multiobjetivo para la resolución de la etapa de gestión de la energía de los vehículos híbridos. Emplear este tipo de técnicas para este cometido, puede ofrecer muchas ventajas al control de los sistemas con diferentes objetivos. Este tipo de problemas, con múltiples objetivos de diseño, son conocidos como MOP. Un planteamiento habitual es establecer un único índice de coste en el problema de optimización, buscando reflejar el rendimiento e intercambio de prestaciones deseado entre los objetivos de diseño.

Es usual plantear un problema de diseño como un problema de optimización. Así mismo, es común determinar un conjunto de objetivos, requerimientos y especificaciones para dicho problema. Generalmente, los objetivos de diseño especificados entran en conflicto entre sí, por ejemplo la mejora en el rendimiento de uno de ellos es a expensas de empeorar algún otro. Un MOP, sin pérdida de generalidad<sup>5</sup> puede definirse como se observa en las ecuaciones siguientes.

$$\min_{\theta \in \mathbb{R}^n} J(\theta) = [J_1(\theta), \dots, J_m(\theta)] \in \mathbb{R}^m \quad (1)$$

Sujeto a:

$$g(\theta) \leq 0 \quad (2)$$

$$h(\theta) = 0 \quad (3)$$

$$\underline{\theta}_i \leq \theta_i \leq \bar{\theta}_i, i = [1, \dots, n] \quad (4)$$

donde  $\theta \in \mathbb{R}^n$  se define como el vector de decisión,  $J(\theta) \in \mathbb{R}^m$  como el vector de objetivos y  $g(\theta), h(\theta)$  como los vectores de restricción de desigualdad e igualdad, respectivamente;  $\underline{\theta}_i, \bar{\theta}_i$  representa las cotas inferiores y superiores en el espacio de decisión. Además m es el número de objetivos y n el de variables de decisión.

Al plantear un *problema de optimización multiobjetivo*, no se obtiene (probablemente) una única solución, sino un conjunto de soluciones potenciales, describiendo diferentes grados de compromiso entre los objetivos. Dicho conjunto de soluciones conforma lo que se denomina conjunto de Pareto  $\Theta_P$ , y su imagen en el espacio de objetivos se conoce como frente de Pareto  $J_P$ . Cada solución en el frente de Pareto se dice que es una solución Pareto-óptima y no-dominada (ver figura 2).

---

<sup>5</sup> Un problema de maximización puede ser traducido en un problema de minimización. Para cada uno de los objetivos que deben ser maximizados, puede ser aplicado la transformación:  $\text{máx } J_i(\theta) = - \text{mín } (- J_i(\theta))$

**Definición I:** optimalidad de Pareto (Miettinen (1998) [14]): Un vector objetivo  $J(\theta^1)$  es Pareto-óptimo si no existe otro vector objetivo  $J(\theta^2)$  tal que  $J_i(\theta^2) \leq J_i(\theta^1)$  para toda  $i \in [1, 2, \dots, m]$  y  $J_j(\theta^2) < J_j(\theta^1)$  para al menos un  $j, j \in [1, 2, \dots, m]$ .

**Definición II:** Dominancia (Miettinen (1998) [14]): Un vector objetivo  $J(\theta^1)$  es dominado por otro vector objetivo  $J(\theta^2)$  sí y solo sí  $J_i(\theta^2) < J_i(\theta^1)$  para toda  $i \in [1, 2, \dots, m]$ .

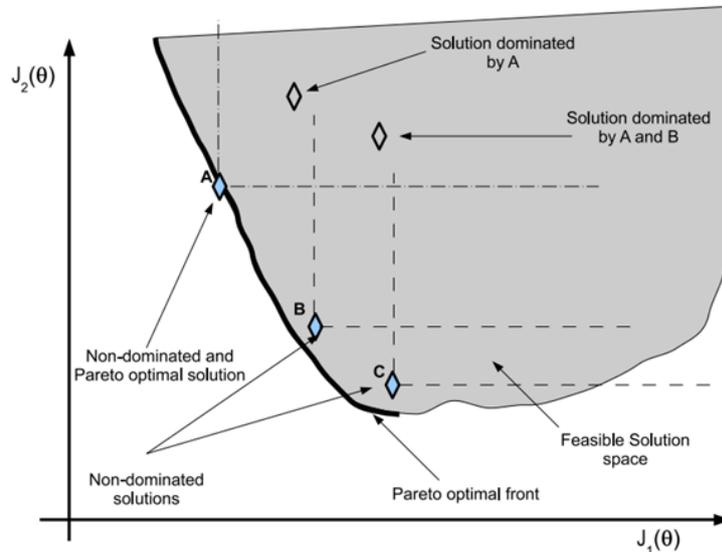


Figura 2: Concepto de dominancia

Se habla de un proceso de diseño mediante optimización multiobjetivo (MOOD por sus siglas en inglés) cuando convergen en la metodología de diseño al menos tres elementos [15], como se observa en la figura 3. En primer lugar la definición de un problema multiobjetivo; posteriormente una optimización simultánea de todos los objetivos para obtener un conjunto de soluciones Pareto-óptimas; y por último un proceso de selección y toma de decisiones multi-criterio (MCDM por sus siglas en inglés) para seleccionar la solución que se implementará. Este último proceso de selección es tan importante como el de optimización y en algunos casos puede llevar más tiempo [16].

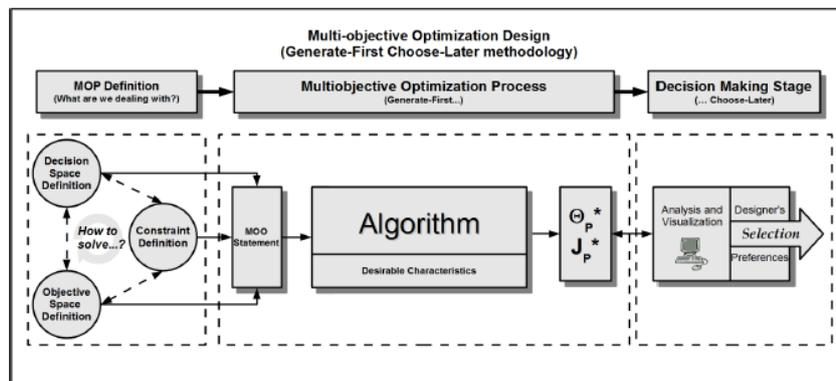


Figura 3: Proceso de optimización multiobjetivo para el diseño en ingeniería

La primera etapa, planteamiento del problema multiobjetivo, se definirán los objetivos de diseño, variables de decisión y restricciones si las hay. En la segunda, habrá que resolver este problema usando un algoritmo multiobjetivo para obtener un conjunto de soluciones óptimas. En la tercera y última etapa, habrá que analizar el conjunto aproximado y posteriormente seleccionar una única solución. Interactivamente se observará en un visualizador, las soluciones obtenidas, para obtener una información gráfica y así seleccionar la más idónea.

Todas las etapas anteriores son importantes para el MOOD. Si la definición del MOP no es la adecuada o si el algoritmo es malo, no se garantiza un adecuado conjunto de soluciones. Finalmente, no contar con adecuados mecanismos para la etapa MCDM, provoca la selección de soluciones que no satisfacen las preferencias de diseño, y en cualquier caso implican un menor grado de involucramiento del diseñador en el proceso de selección.

## 4.- CONTROL DE LA PLANTA DE CUATRO TANQUES

En esta sección se describirá de manera más detallada el control de la planta de cuatro tanques, con el que se pretende realizar un primer acercamiento a las técnicas a emplear posteriormente en el EMS de un HEV. Este sistema se ha propuesto para el concurso en ingeniería de control 2014 [13] organizado por el departamento en Ingeniería de Sistemas y Automática de la Universidad de Sevilla.

### 4.1- Introducción

En este apartado se expone el desarrollo de un sistema para el control de la planta de cuatro tanques. Este proceso multivariable consta de cuatro tanques de agua interconectados, y es ideal para ilustrar muchos conceptos de control multivariable. La implementación de este proceso fue propuesta por Karl H. Johansson, y ha sido muy utilizada por su interés como problema de control y su sencillez de uso.

El sistema tiene como objetivo minimizar dos indicadores dados. Un sistema de control suele ser jerárquico: en la capa superior se ejecuta el denominado RTO, que proporciona el punto óptimo en cada instante. Este punto óptimo se proporciona al sistema de control avanzado que debe lograr que la planta evolucione con el menor coste posible y se mantenga en el punto de operación óptimo. En este trabajo se ha decidido utilizar un Control Predictivo Generalizado (GPC [17]). Por otro lado, un algoritmo puede ser útil en distintas fases del sistema. En primer lugar puede ser importante para el cálculo de puntos óptimos. Además puede emplearse para definir los parámetros del controlador.

En la figura 4, se observa el esquema de la planta de los 4 tanques. Ésta, consta de 4 depósitos, 2 inferiores (tanques 1 y 2) y 2 superiores (tanques 3 y 4) que desaguan en los tanques inferiores. Los tanques se llenan con 2 bombas que impulsan sendos caudales y desde el depósito colector situado en la parte baja de la planta. Estos caudales entran en sendas válvulas de 3 vías que dividen el caudal entre 2 ramas, de forma que una fracción (denominadas  $\gamma_a$  y  $\gamma_b$ ) se envía por una de las ramas y el resto por la otra. Las fracciones se indican en tanto por uno y se fijan manualmente mediante la apertura de dichas válvulas.

De esta forma, la válvula  $\gamma_a$  enviará un caudal al tanque 1 y el resto al tanque 4. Del mismo modo, la válvula  $\gamma_b$  enviará un caudal al tanque 2 y el resto entrará en el tanque 3. El tanque 3 se descarga sobre el tanque 1 y este sobre el depósito colector. El tanque 4 se descarga sobre el 2 y este en el tanque colector.

Esta planta es multivariable ya que presenta dos variables manipulables  $q_a$  y  $q_b$ . Normalmente, las variables que se desean controlar son el nivel de líquido en los depósitos inferiores. Asimismo, la planta presenta una dinámica no lineal, ya que las ecuaciones que describen un depósito no son lineales. La planta se describe bien mediante un modelo de orden 4 basado en primeros principios, que se describirán en la

sección siguiente. Además la planta presenta restricciones en las actuaciones (caudales máximos y mínimos) y en las variables del proceso (niveles máximos y mínimos en los depósitos).

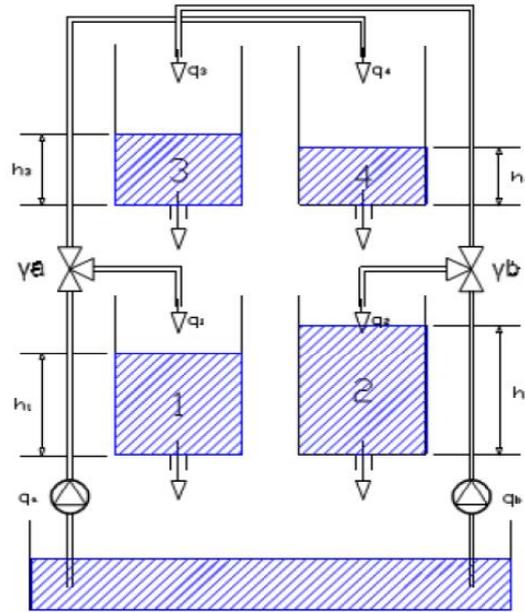


Figura 4: Planta de Johansson.

La finalidad de este control es incluir dos etapas principales: una superior, que debe proporcionar el punto óptimo al que llegar en cada instante; y otra de control avanzado que debe llevar a la planta con el menor coste posible.

## 4.2- Modelo

El modelo de la planta de Johansson se puede expresar como se observa en las ecuaciones diferenciales 1-4.

$$A \frac{dh_1}{dt} = -a_1 \sqrt{2gh_1} + a_3 \sqrt{2gh_3} + \gamma_a \frac{q_a}{3600} \quad (1)$$

$$A \frac{dh_2}{dt} = -a_2 \sqrt{2gh_2} + a_4 \sqrt{2gh_4} + \gamma_b \frac{q_b}{3600} \quad (2)$$

$$A \frac{dh_3}{dt} = -a_1 \sqrt{2gh_3} + (1 - \gamma_b) \frac{q_b}{3600} \quad (3)$$

$$A \frac{dh_4}{dt} = -a_1 \sqrt{2gh_4} + (1 - \gamma_a) \frac{q_a}{3600} \quad (4)$$

En estas ecuaciones se denota el nivel de líquido en el tanque \$h\_i\$. Este nivel se mide en metros. Los caudales de cada rama \$q\_z\$, medidos en metros cúbicos por hora, son variables manipulables.

El parámetro \$a\_i\$ es la sección equivalente del orificio de descarga del depósito \$h\_i\$ y la sección de todos los tanques es igual y se denota por \$A\$. Las secciones se miden en metros cuadrados. Los parámetros \$\gamma\_a\$ y \$\gamma\_b\$ indican la apertura de la válvula de 3 vías. La unidad de tiempo del modelo es segundos. La actualización del valor de las variables

manipulables que se aplicarán y la actualización de las medidas de los sensores se realiza cada 5 segundos.

Los parámetros presentes en el modelo de la planta toman los siguientes valores:

- Sección de los depósitos:

$$A = 0.03 \text{ m}^2$$

- Sección equivalente de los orificios de descarga:

$$a_1 = 1.3104 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$a_2 = 1.5074 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$a_3 = 9.2673 \times 10^{-5} \text{ m}^2$$

$$a_4 = 8.8164 \times 10^{-5} \text{ m}^2$$

- Apertura de las válvulas de 3 vías:

$$\gamma_a = 0.3$$

$$\gamma_b = 0.4$$

- Restricciones de operación de las variables:

$$0.2 \text{ m} \leq h_i \leq 1.2 \text{ m} \quad i = 1,2,3,4$$

$$0 \text{ m}^3/h \leq q_z \leq 2.5 \text{ m}^3/h \quad z = a, b$$

- Tiempo de muestreo mínimo

$$Tm = 5s$$

### 4.3- Implementación

Para la realización de este control, el concurso en ingeniería de control 2014 proporciona unos puntos de funcionamiento óptimos para unos determinados valores de precios ( $c$  y  $p$ ). En primer lugar se deberá comprobar si estos puntos de funcionamiento proporcionados son realmente los óptimos, teniendo en cuenta las restricciones que existen en el sistema (ver tabla 1).

Tabla 1: Puntos Óptimos de Operación

Precios	$h_1$	$h_2$	$h_3$	$h_4$	$q_a$	$q_b$
$c=1, p=20$	0.5955	0.6616	0.5384	0.7682	1.7602	1.8072
$c=1, p=30$	0.7293	0.8102	0.6594	0.9408	1.948	2
$c=1, p=10$	0.4211	0.4678	0.3807	0.5432	1.4802	1.5197
$c=1.5, p=20$	0.4675	0.6793	0.3015	1.0493	2.0573	1.3525
$c=1, p=40$	0.8421	0.9356	0.7614	1.0863	2.0933	2.1491
$c=0.5, p=10$	0.6391	0.4601	0.8473	0.2649	1.0337	2.2671

Para este cometido se pueden emplear diferentes algoritmos. Se ha decidido emplear un algoritmo evolutivo multiobjetivo, ya que proporciona todas las características deseables para este proceso. El empleo de este tipo de algoritmos puede resultar beneficioso, pues permite optimizar funciones de coste no-lineales, no-convexas y con restricciones. Este tipo de técnicas holística ha mostrado ser efectiva para abordar problemas de diseño complejos.

En concreto en este trabajo se trabajará con el algoritmo evolutivo multiobjetivo SP-MODE, para realizar este cálculo, porque ha mostrado buen desempeño y tiene código abierto. Además es fácil de interpretar para cualquier usuario ajeno a este tipo de algoritmos.

Para la comprobación de los puntos óptimos se fijan los parámetros  $c$  y  $p$  (precios), y se fijan los valores topes de las entradas  $q_a$  y  $q_b$  (variables de decisión). Una vez definido esto, se intenta minimizar los dos indicadores que se describen en la sección 4.4.1. Al introducirlo en el algoritmo, se obtienen el conocido como Conjunto de Pareto, en el cual, minimizando la suma de los dos objetivos, índice propuesto por el concurso, se obtienen los mismos puntos óptimos que se proporcionan en el concurso. Por lo tanto se concluye que estos puntos, son los puntos óptimos para cada uno de los precios dados, teniendo en cuenta las restricciones a cumplir, que se detallan en la sección anterior.

El sistema de control suele ser jerárquico: en la capa superior se ejecuta un módulo, RTO, que proporciona el punto de operación óptimo en cada instante. El punto de operación óptimo calculado se proporciona a la capa inferior, en la que el sistema de control debe lograr la planta evolucione con el menor coste posible y se mantenga en el punto de operación óptimo proporcionado. El tiempo de cálculo del RTO suele ser mucho mayor que el tiempo de muestreo del control avanzado.

El concurso propone un ensayo tipo sobre el cual poder realizar pruebas. Este ensayo sigue los siguientes pasos:

- Se parte de un punto de equilibrio  $c=1$  y  $p=20$ .
- El ensayo empieza variando los precios unitarios a  $c=1.5$  y  $p=20$ .
- Transcurridos 1200 segundos, los precios unitarios cambian a  $c=1$  y  $p=40$ .
- Transcurridos 1200 segundos, los precios unitarios cambian a  $c=0.5$  y  $p=10$ .
- Transcurridos 1200 segundos, los precios unitarios cambian a  $c=1$  y  $p=20$ .
- Transcurridos 1200 segundos, se finaliza el ensayo.

Una vez comprobados los puntos óptimos, podemos centrarnos en el control. El sistema de control, ver figura 5, se compone de cinco zonas diferentes. En la primera de ellas se define el ensayo a realizar. La segunda y tercera pertenecen al control propiamente dicho, y se comentarán más detalladamente a continuación. La zona cuarta es en la cual se calcula el índice de desempeño del ensayo introducido. Por último la última zona es en la cual se muestran los resultados obtenidos, tanto respecto al índice a minimizar como respecto a los niveles y caudales de la planta.

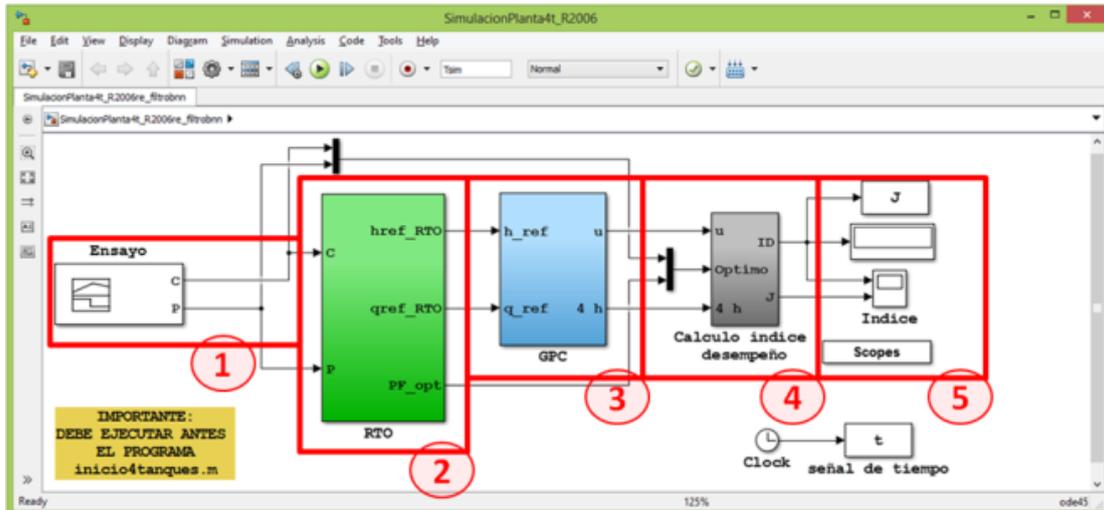


Figura 5: Sistema de Control.

En lo que respecta al control, primero se definirá la etapa inferior del sistema, zona 3. Para esta etapa, se proporcionan dos posibles problemas de control en el concurso, control PID o control multivariable. Se ha decidido utilizar un control multivariable, ya que estos trabajan más cerca de los límites de operación de la misma, por lo que optimizan más los recursos proporcionados por la planta.

Para el control multivariable se ha optado por realizar el control mediante un Control Predictivo Generalizado. Los GPCs son la clase de controladores más general de los denominados Controladores Predictivos Basado en Modelos (MBPC [18]). Estos, necesitan de un modelo de predicción que predice la salida del proceso para cualquier instante futuro. El modelo de Predicción que sirve de base para el diseño de un GPC se deduce a partir del modelo de proceso lineal con perturbación, ambas definidas en f.d.t.

Para el esquema de control elegido, se deberá linealizar el sistema alrededor del punto óptimo previamente calculado por la etapa superior (RTO). Una vez linealizado recalculamos los polinomios que componen el GPC que se detallan posteriormente teniendo en cuenta el punto de funcionamiento en el que se encuentra el sistema. Para definir un GPC es necesario definir los siguientes parámetros de ajuste:

- $N_1$ : mínimo horizonte de predicción: Si el retardo del proceso es conocido  $N_1 = d + 1$ , en caso contrario  $N_1 = 1$ .
- $N_2$ : máximo horizonte de predicción: Grande, para que contenga toda la información dinámica de la planta.
- $N_u$ : horizonte de control: Determina los grados de libertad disponibles.  $N_u$  pequeños produce acciones de control más pequeñas y salidas más lentas.

- $\alpha_i, \lambda_j$ : Factores de ponderación: Permiten dar diferentes pesos a cada uno de los factores del índice, es decir mayor o menor importancia relativa de unos sobre otros.
- $T$ : Prefiltro polinomio

Para definir estos parámetros del GPC, se ha optado por introducirlos como variables de decisión en un algoritmo genético, en el que se tiene como objetivo la minimización del índice dado (ecuación 7), para un ensayo tipo como el proporcionado en el enunciado del presente concurso (detallado anteriormente). De esta forma el algoritmo nos calculará los parámetros óptimos del controlador para dicho ensayo. Para ello, se definen las siguientes variables de decisión:

- $N_2$   $30 < N_2 < 150$
- $N_u$   $1 < N_u < 6$
- $\alpha_i$   $0 < \alpha_i < 2$
- $\lambda_j$   $0 < \lambda_j < 2$
- $T = (1 - TTz^{-1})^2$   $0.85 < TT < 0.95$
- El mínimo horizonte de precisión se fija a la unidad.

Con ello, obtenemos los siguientes parámetros del GPC que minimizan el indicador propuesto:

- $N_1 = 1$
- $N_2 = 60$
- $N_u = 2$
- $\alpha_i = 1$
- $\lambda_j = 0$
- $T = (1 - 0.9z^{-1})^2$

Una vez definidos estos parámetros, ya se pueden calcular cada uno de los polinomios que componen el GPC, tal y como se observa en la figura 6, estos son H, T, R y S.

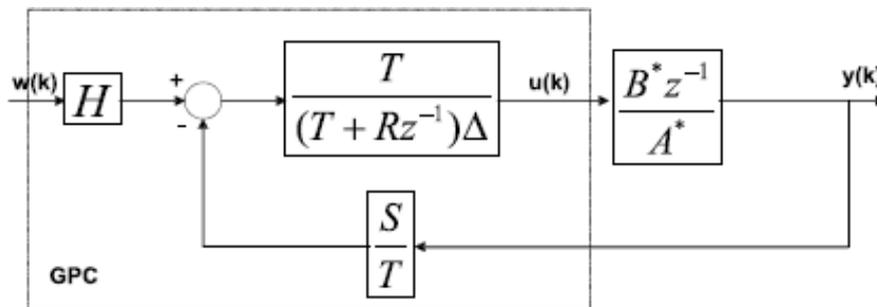


Figura 6: Diagrama de bloques GPC.

Estos polinomios se recalcularán en torno al punto de funcionamiento cada vez que este cambie de posición, es decir, si varían las variables de entrada del sistema  $c$  y  $p$ . Debido

a que las variaciones entre los GPCs de diferentes puntos óptimos varían poco, no es necesario interpolar entre ellos, ya que estos pequeños cambios no producen respuestas indeseadas.

Una vez definida la capa inferior, se debe definir la capa superior del control, el RTO, zona 2 de la figura 5. Esta etapa deberá, con la información de entrada del sistema, obtener los niveles y los caudales de entrada óptimos que se introducirán en el sistema de control. Para este cálculo y para reducir el coste computacional, se introduce al optimizador un punto cercano al óptimo. Este punto cercano se calcula mediante una tabla previamente calculada fuera de línea (off-line). El cálculo se realiza mediante la función “fmincon” de Matlab. Fmincon es un algoritmo que encuentra un mínimo de una función multivariable no lineal restringida, y por defecto se basa en el (programación cuadrática secuencial) algoritmo SQP [19]. Se ha elegido este algoritmo porque su cálculo es bastante rápido. Tiene como inconveniente que se puede estancar en mínimos locales, por este problema se soluciona incluyendo inicialmente un punto cercano al óptimo.

Más tarde se calcularán los caudales que provocan estos niveles. Finalmente estos niveles y caudales calculados serán la salida del RTO. De esta manera se consigue alcanzar antes el punto óptimo y con ello penalizar menos al indicador dado.

En la etapa de cálculo de índice de desempeño, zona 4 de la figura 5 se necesitará como entradas, las acciones de control ( $q_a$  y  $q_b$ ), y los niveles, ( $h_1$  a  $h_4$ ). Además se deberá conocer el punto óptimo en cada momento, ya que es necesario para restarlo al índice de cada instante ( $J^*$  en la ecuación 8), que se explicará en la siguiente sección. Esta etapa también se encarga de penalizar con 1000 unidades monetarias por segundo en los instantes que se infrinja alguna restricción del sistema.

Por último en la zona 5 (ver figura 5), se observa la zona de resultados, en la cual se podrá ver el resultado del índice propuesto por el concurso (ver sección 4.4.1), así como las gráficas pertenecientes a las acciones de control y las salidas obtenidas.

#### **4.4- Problema de optimización multiobjetivo**

En esta sección, se va a realizar un MOP para la elección de la solución mejor para el sistema. Como ya se explicó en la sección 3: en primer lugar se define el MOP; posteriormente se realiza una optimización simultánea de todos los objetivos para obtener un conjunto de soluciones Pareto-óptimas; y por último se realiza la etapa de MCDM para seleccionar la solución que se implementará.

##### **4.4.1- Definición del MOP**

Para la definición del MOP es necesario tener definidos los objetivos y variables de decisión del mismo.

El objetivo principal del sistema de control a diseñar será la operación óptima de la planta conforme a un determinado coste de operación, teniendo en cuenta los límites de operación que presenta la planta.

Por lo tanto los objetivos del MOP son:

1. Minimización del consumo energético de la planta. Esto se cuantifica mediante el coste de la impulsión del agua a los tanques, que es una función cuadrática de los caudales. Así este término normalizado tendrá la forma de:

$$J_{ce} = q_a^2 + cq_b^2 \quad (5)$$

siendo  $c$  el precio unitario de la impulsión del agua.

2. Minimización del índice en relación al volumen acumulado en los depósitos inferiores. Este término se cuantifica mediante la función de coste que depende inversamente del volumen acumulado:

$$J_{va} = p \frac{V_{min}}{A(h_1+h_2)} \quad (6)$$

siendo  $p$  el precio unitario de la función de coste de volumen acumulado y  $V_{min}$  el mínimo volumen de líquido que se puede acumular en los depósitos inferiores, de acuerdo a los límites de operación. En este caso  $V_{min} = 0.012 m^3$ . Nótese que esta función asigna un coste  $p$  cuando el volumen de líquido es el mínimo, y el coste disminuye a medida que el volumen acumulado aumenta. Por tanto minimizar este coste implica una maximización del volumen.

En el concurso de ingeniería de control 2014, la función de coste final es la suma de estos dos índices (ecuación 7), donde además se penaliza la violación de las restricciones y se tiene en cuenta el coste óptimo en cada instante (ecuación 8). Este es el índice con el que posteriormente se compararan los resultados obtenidos con los demás participantes del concurso (sección 4.6).

$$J(h, q, c, p) = q_a^2 + cq_b^2 + p \frac{V_{min}}{A(h_1+h_2)} \quad (7)$$

$$ID(t) = \int_0^t (J(h(\tau), q(\tau), c(\tau), p(\tau)) + J_r(c(\tau), p(\tau)) - J^*(h(\tau))) d\tau \quad (8)$$

siendo  $J^*(h(\tau))$  el coste de operación óptimo para los parámetros  $c$  y  $p$ . El término  $J_r(c(\tau), p(\tau))$  representa el coste asociado a la violación de restricciones. Por cada centímetro que se viola la restricción, el coste aumenta en 1000 unidades monetarias por segundo. El objetivo del concurso es diseñar controladores avanzados de la planta que minimicen el coste económico medio de la evolución del sistema controlado en un ensayo en el que los parámetros podrían variar. En este proyecto se separa este objetivo,

según las ecuaciones 5 y 6, para su inclusión en un MOP, y así tener más de un objetivo a analizar.

Por otro lado, se ha observado mediante diferentes ensayos, que resulta beneficioso con respecto al indicador del sistema, introducir escalones de diferentes magnitudes en las zonas de transición. Con estos escalones se consigue alcanzar con mayor rapidez el óptimo, con lo que minimizamos el coste (ver figura 7).

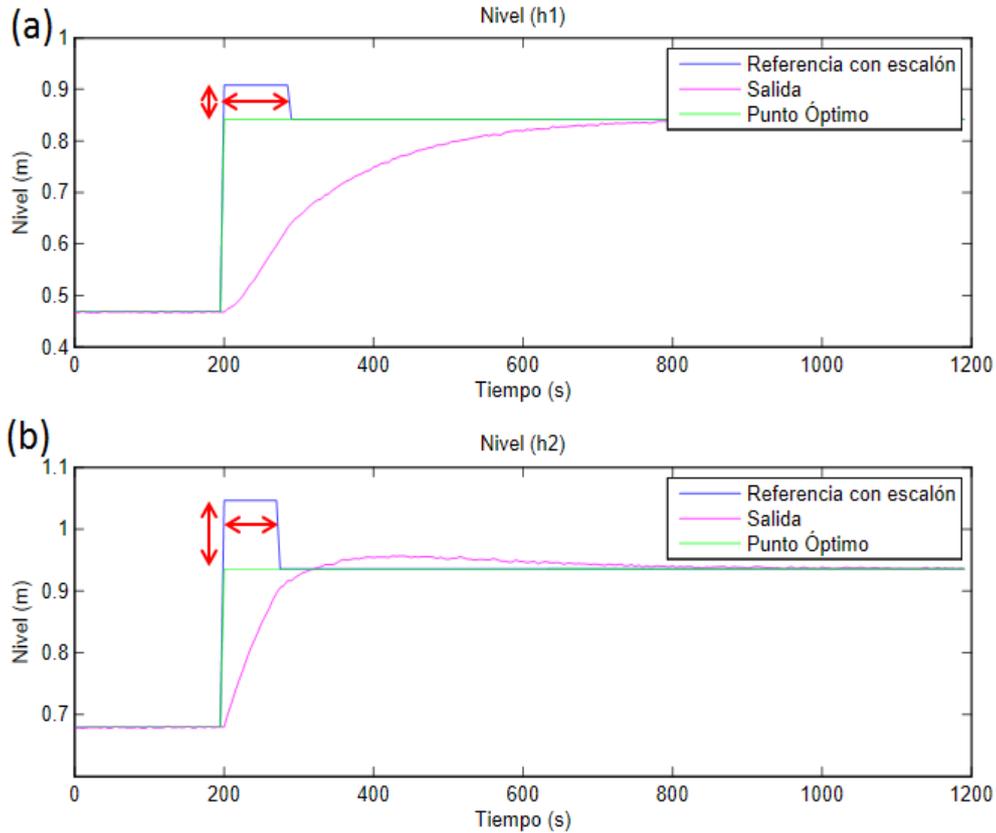


Figura 7: Escalones óptimos de  $h_1$  (a) y  $h_2$  (b).

Es por ello por lo que se decide definir como variables de decisión las variaciones de los niveles y tiempos de cada uno de los escalones. Es decir, que las variables de decisión serán los tiempos que se mantengan cada uno de los dos escalones a introducir y los dos incrementos de los escalones. Debido a la poca relación entre cada uno de los escalones óptimos para cada transición, se ha decidido introducir una tabla en la cual elegir el escalón a introducir dependiendo de la semejanza del nivel que se tiene y al que se desea llegar.

De esta forma se introducirá en el algoritmo cada uno de los escalones que relacionan los puntos óptimos propuestos por el concurso (tabla 1), introduciendo como objetivos y variables de decisión las mencionadas anteriormente. Posteriormente se elegirá la solución que se considere mejor para cada uno de ellos. Finalmente se introducirán estas soluciones en el sistema mediante una tabla. Así, cada vez que se introduzca un escalón

similar a uno de los introducidos previamente mediante la tabla, el sistema introducirá el escalón óptimo que se calculó fuera de línea previamente al ensayo.

#### **4.4.2- Proceso de Optimización Multiobjetivo**

Para el proceso de optimización multiobjetivo se ha introducido un algoritmo evolutivo multiobjetivo, que proporciona la posibilidad de obtener, simultáneamente, un conjunto de soluciones óptimas en cada ejecución. El empleo de este tipo de algoritmos puede resultar beneficioso, ya que permite optimizar funciones de coste no-lineales, no-convexas y con restricciones. Este tipo de técnicas holística ha mostrado ser efectiva para abordar problemas de diseño complejos. Como ya se ha comentado, en este proyecto se trabajará con el algoritmo evolutivo multiobjetivo SP-MODE, ya que ha mostrado buen desempeño y tiene código abierto. Además es fácil de interpretar para cualquier usuario ajeno a este tipo de algoritmos.

#### **4.4.3- Proceso de selección y toma de decisiones multi-criterio**

En esta sección analizaremos como se ha realizado la elección de tres de los escalones óptimos aleatorios, ya que los demás se han obtenido de forma similar.

En primer lugar, por ejemplo, se realizará el análisis de la solución escogida para el escalón que se encuentra inicialmente el punto óptimo 1 y llega hasta al punto 4 (tabla 1). Los resultados obtenidos por el algoritmo para este escalón son los que se muestran en la figura 8 y 9. Estos resultados se han visualizado mediante LD, detallado anteriormente. En la figura 8 se observan las variables de decisión del sistema, los tiempos en los que habrá que mantener los escalones óptimos y los valores a incrementar de las dos alturas del sistema (ver figura 7).

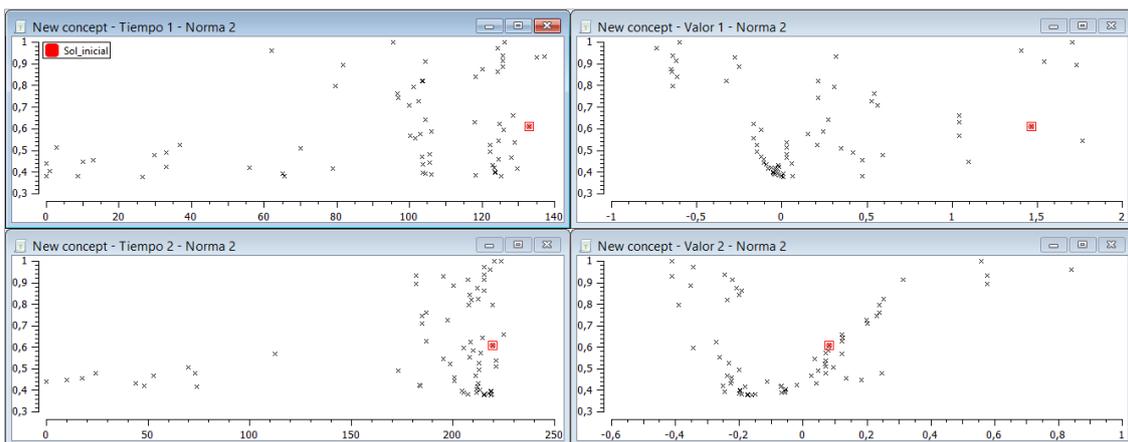


Figura 8: Variables de decisión

Por otro lado en la figura 9 se observan los objetivos del sistema, que son los índices asociados al consumo energético y al volumen acumulados, ambos objetivos a minimizar.

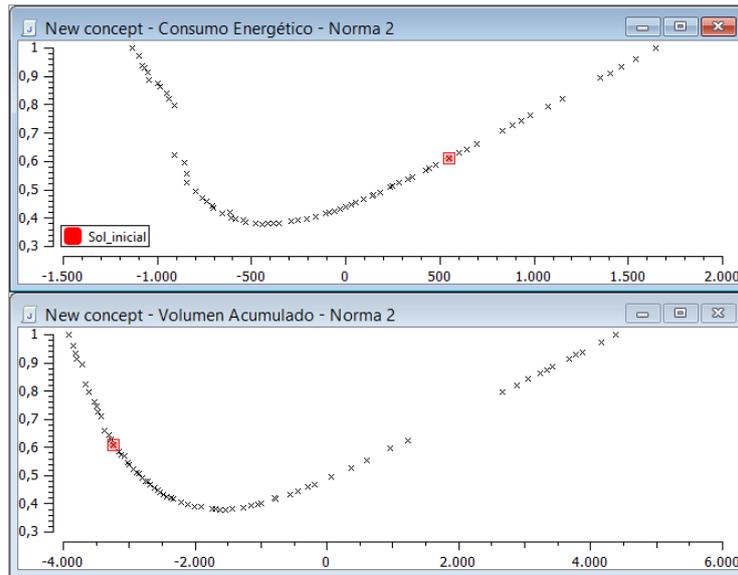


Figura 9: Objetivos

En los resultados se observa en color rojo la solución que minimiza el índice total, es decir, la suma de los dos objetivos (ecuación 7). En principio esta sería la solución óptima, ya que es este valor el que se contabilizará en el concurso de ingeniería de 2014. Sin embargo, a continuación vamos a analizar los resultados obtenidos para dotar de mayor robustez al sistema. En la figura 10 se observa cómo se pueden dividir las soluciones en cuatro zonas diferentes basándonos en la variable de decisión “valor 2”, el incremento de  $h_2$ . Se ha decidido basarse en esta variable porque con ella se separan claramente cuatro zonas bien diferenciadas en los objetivos de diseño. La zona que incluye la solución que minimiza el índice total es la zona de color azul (zona 3).

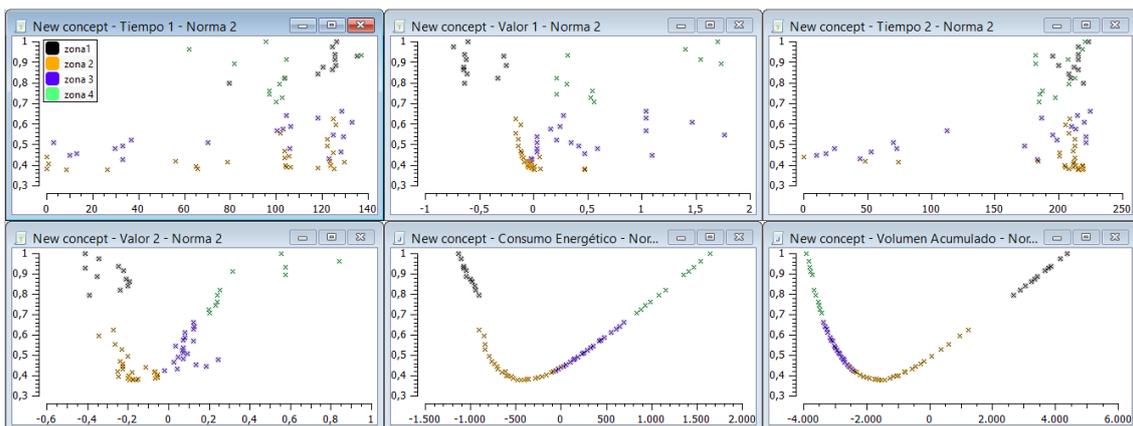


Figura 10: Resultados obtenidos divididos en diferentes zonas

Con ello, ahora elegimos una solución que se encuentre integrada dentro de la zona elegida, y por lo tanto que tenga un gran número de soluciones cercanas que se encuentren cerca de la solución ideal. De esta manera dotamos al sistema de mayor robustez ante posibles cambios ajenos, como la implementación real del sistema, que difiere de la simulación. La solución elegida inicialmente, se encuentra cerca de los

límites de la zona elegida en algunas variables, como se observa en la figura 11. Esto podría provocar que pequeños cambios en el valor de estas variables provocaran grandes cambios en los objetivos del sistema, y con ello no se lograra el resultado esperado. Es por ello por lo que se elige la solución que se encuentra en color rojo y seleccionada (ver figura 11). Esta solución se encuentra rodeado de soluciones muy cercanas a la solución óptima, es decir, sub-óptimas y esto se consigue sin penalizar apenas el valor de los dos objetivos del sistema. Esto se puede ver tanto en las variables de decisión como en los objetivos. De esta forma, si cualquiera de las variables variara ligeramente por cualquier motivo, el sistema debería encontrarse en una solución que obtuviera prestaciones, muy cercanas a las de la solución escogida.

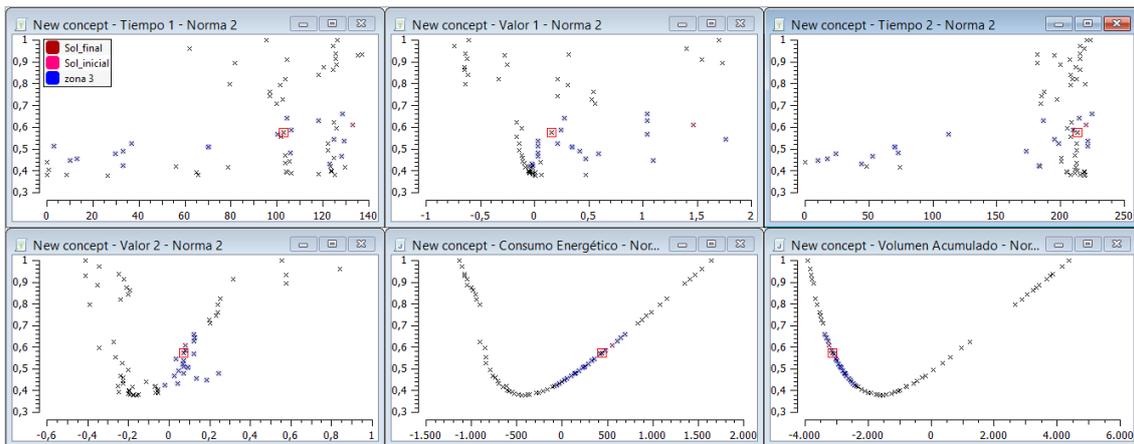


Figura 11: Solución escogida

En segundo lugar se realizará el análisis de la solución escogida para el escalón que se encuentra inicialmente el punto óptimo 1 y llega hasta al punto 5 (tabla 1). Los resultados obtenidos por el algoritmo para este escalón son los que se muestran en la figura 12 y 13. Estos resultados también se han visualizado mediante LD. En la figura 12 se observan las variables de decisión del sistema, los tiempos en los que habrá que mantener los escalones óptimos y los valores a incrementar de las dos alturas del sistema.

Por otro lado, en la figura 13 se observan los objetivos del sistema, que son los índices asociados al consumo energético y al volumen acumulados, ambos objetivos a minimizar.

En los resultados se observa en color rojo la solución que minimiza el índice propuesto por el concurso, que es la suma de los dos objetivos. En principio esta sería la solución óptima, pero a continuación vamos a analizar los resultados obtenidos para dotar de mayor robustez al sistema.

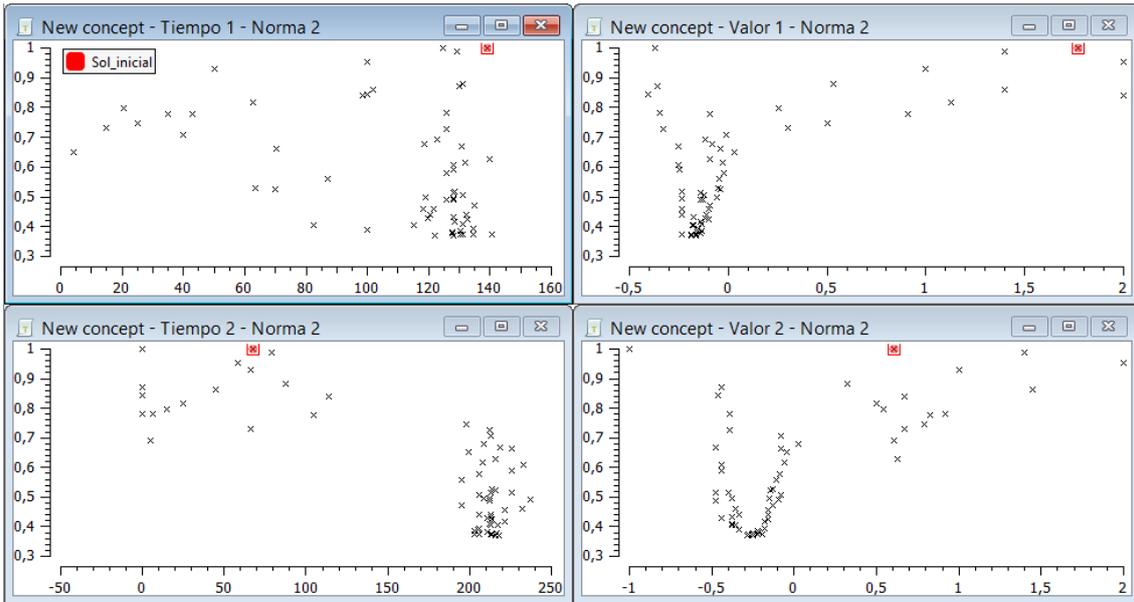


Figura 12: Variables de decisión

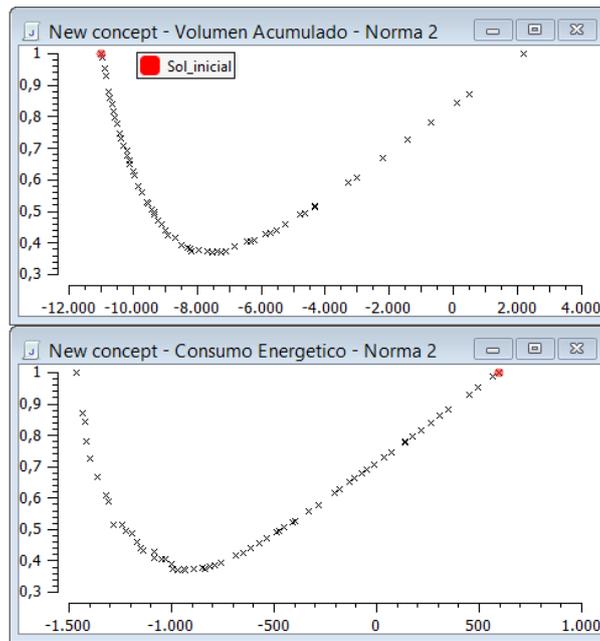


Figura 13: Objetivos

En la figura 14 se observa cómo se pueden dividir las soluciones en dos zonas diferentes basándonos en la variable de decisión “valor 1”, incremento de  $h_1$ . Se ha decidido basarse en esta variable porque con ella se separan claramente cuatro zonas bien diferenciadas en los objetivos de diseño. La zona que incluye la solución que minimiza el índice total es la zona de color oscuro (zona 1). Con ello, ahora elegimos una solución que se encuentre integrada dentro de la zona elegida, y además que tenga un gran número de soluciones que se encuentren cerca de la solución ideal. De esta manera dotamos al sistema de mayor robustez ante posibles cambios ajenos, como la implementación real del sistema, que difiere de la simulación.

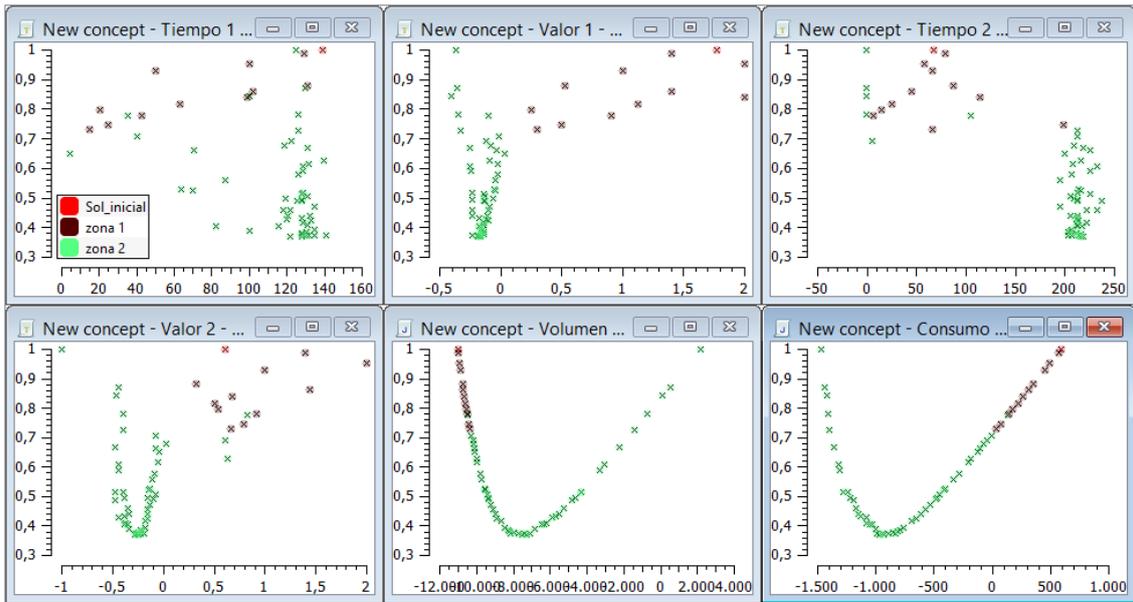


Figura 14: Resultados obtenidos divididos en diferentes zonas

La solución elegida inicialmente, se encuentra cerca de los límites de la zona elegida en algunas variables, como se observa en la figura 15. Esto podría provocar que pequeños cambios en el valor de estas variables provocaran grandes cambios en los objetivos del sistema. Es por ello por lo que se elige la solución que se encuentra rodeado de soluciones muy cercanas a la solución óptima, es decir, sub-óptimas. De esta forma, si cualquiera de las variables variara ligeramente, el sistema debería encontrarse en una solución que obtuviera prestaciones (objetivos) muy cercanas a las de la solución escogida.

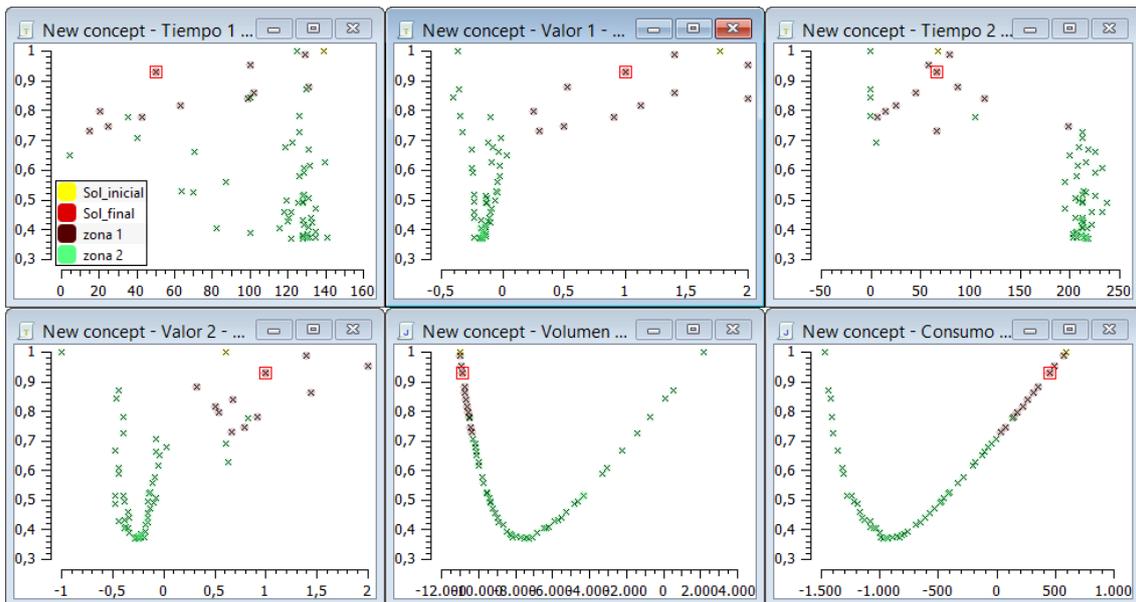


Figura 15: Solución escogida

En tercer lugar se realizará el análisis de la solución escogida para el escalón que se encuentra inicialmente el punto óptimo 2 y llega hasta al punto 6 (tabla 1). Los resultados obtenidos por el algoritmo para este escalón son los que se muestran en la figura 16 y 17. Estos resultados se han visualizado también mediante LD. En la figura 16 se observan las variables de decisión del sistema, los tiempos en los que habrá que mantener los escalones óptimos y los valores a incrementar de las dos alturas del sistema.

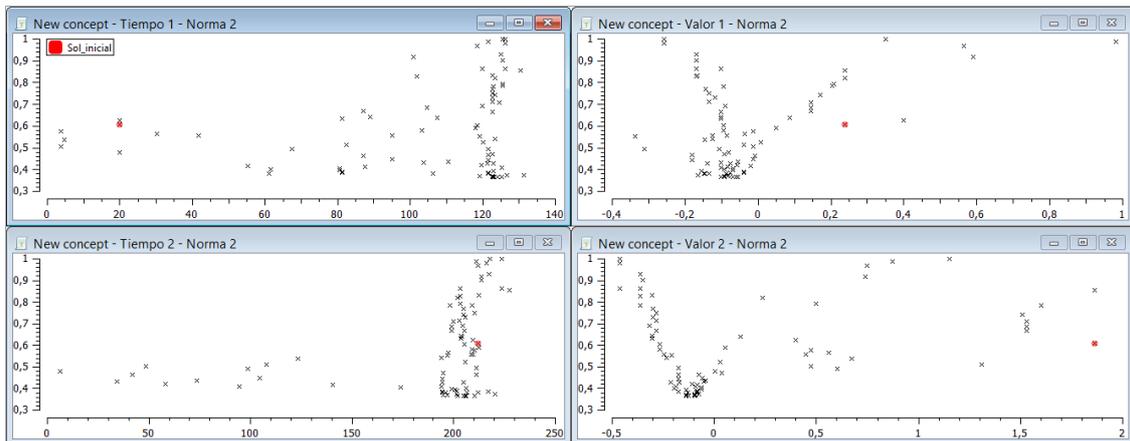


Figura 16: Variables de decisión

Por otro lado en la figura 17 se observan los objetivos del sistema, que son los índices asociados al consumo energético y al volumen acumulados, ambos objetivos a minimizar.

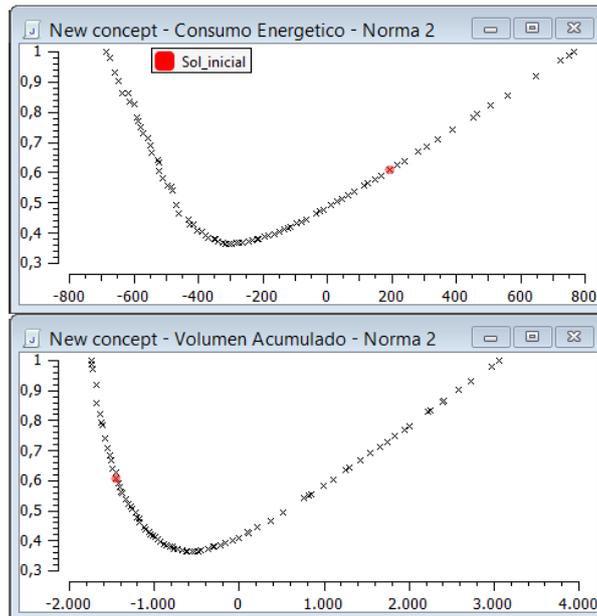


Figura 17: Objetivos

En los resultados se observa en color rojo la solución que minimiza el índice propuesto por el concurso, que es la suma de los dos objetivos. En principio esta sería la solución óptima, pero a continuación vamos a analizar los resultados obtenidos para dotar de mayor robustez al sistema. En la figura 18 se observa cómo se pueden dividir las soluciones en diferentes zonas basándonos en la variable de decisión “tiempo 1”, tiempo en el que se debe mantener el incremento en  $h_1$ . Se ha decidido basarse en esta variable porque con ella se separan claramente cuatro zonas bien diferenciadas en los objetivos de diseño. La zona más interesante en este caso es la zona 1 ya que es la que tiene una gran cantidad de soluciones cerca de la inicialmente elegida en lo que a prestaciones se refiere.

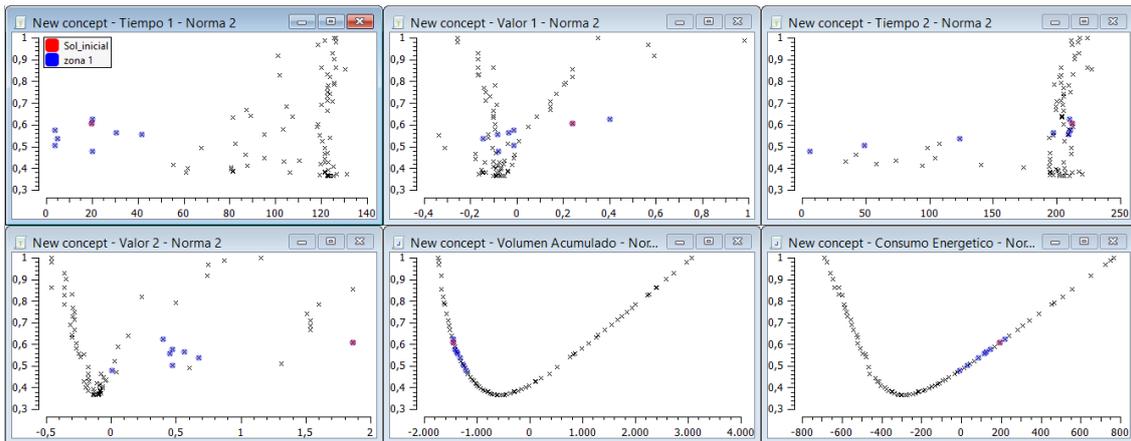


Figura 18: Resultados obtenidos divididos en diferentes zonas

Con ello, ahora elegimos una solución que se encuentre integrada dentro de la zona elegida, y que tenga un gran número de soluciones cercanas que se encuentren cerca de la solución ideal. De esta manera dotamos al sistema de mayor robustez ante posibles cambios ajenos, como la implementación real del sistema, que difiere de la simulación. La solución elegida inicialmente, se encuentra cerca de los límites de la zona elegida en algunas variables, por ejemplo de la variable “valor 2”, como se observa en la figura 19. Esto podría provocar que pequeños cambios en el valor de estas variables provocaran grandes cambios en los objetivos del sistema, y con ello no se lograra el resultado esperado. Es por ello por lo que se elige la solución que se encuentra en color rojo (ver figura 19). Esta solución se encuentra rodeado de soluciones muy cercanas a la solución óptima, es decir, sub-óptimas y sin penalizar a penas el valor de los objetivos del sistema. Esto se puede ver tanto en las variables de decisión como en los objetivos. De esta forma, si cualquiera de las variables variara ligeramente por cualquier motivo, el sistema debería encontrarse en una solución que obtuviera prestaciones (objetivos) muy cercanas a las de la solución escogida.

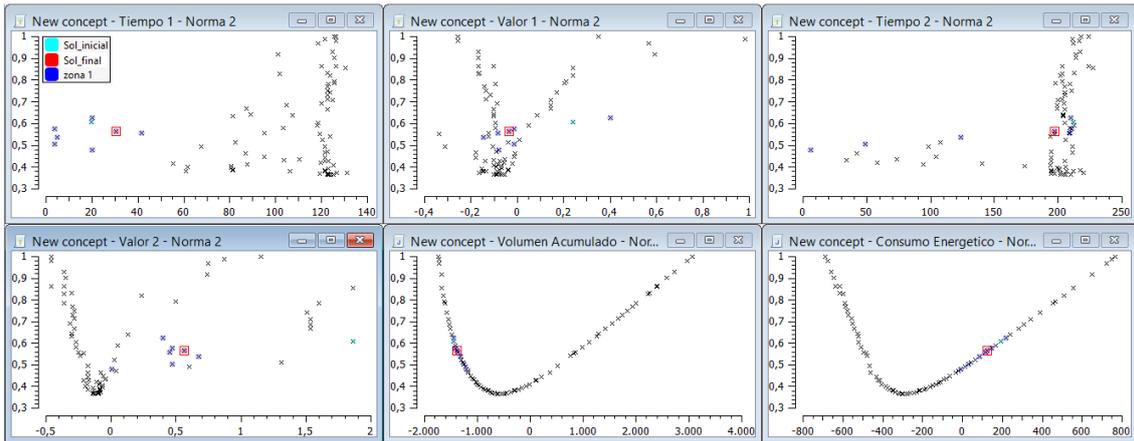


Figura 19: Solución escogida

#### 4.5- Evaluación de la solución escogida

A modo de ejemplo, vamos a introducir un ensayo para evaluar los resultados obtenidos. El ejemplo es el que está definido como ensayo tipo es:

- Se parte de un punto de equilibrio  $c=1$  y  $p=20$ .
- El ensayo empieza variando los precios unitarios a  $c=1.5$  y  $p=20$ .
- Transcurridos 1200 segundos, los precios unitarios cambian a  $c=1$  y  $p=40$ .
- Transcurridos 1200 segundos, los precios unitarios cambian a  $c=0.5$  y  $p=10$ .
- Transcurridos 1200 segundos, los precios unitarios cambian a  $c=1$  y  $p=20$ .
- Transcurridos 1200 segundos, se finaliza el ensayo.

Con este ensayo, obtenemos las salidas del sistema  $h_1$  y  $h_2$  mostrada en la figura 20.

Se observa cómo se han introducido diferentes escalones de diferentes magnitudes en cada una de las transiciones que se producen. Además podemos observar en la figura 21 las acciones de control introducidas que provocan las salidas anteriores, que lógicamente también tienen diferentes escalones.

Por último observamos que el indicador obtenido es de 411,8, tal y como se observa en la figura 22. Este índice es la suma de los dos objetivos propuestos para el control de este trabajo.

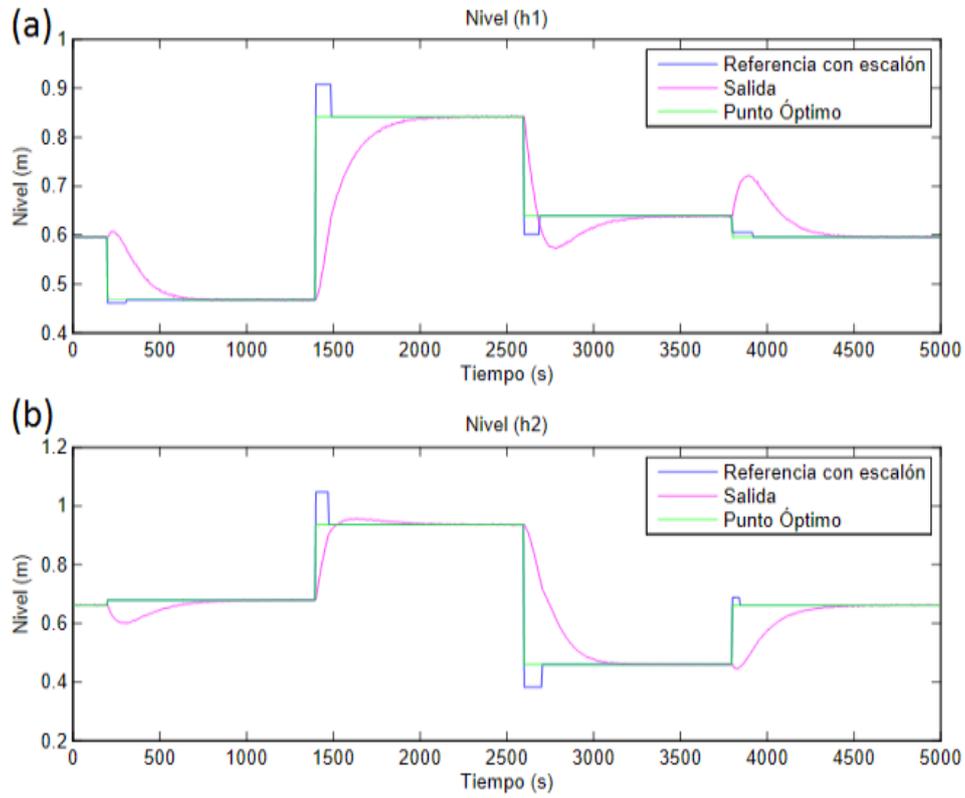


Figura 20:  $h_1$  (a) y  $h_2$  (b)

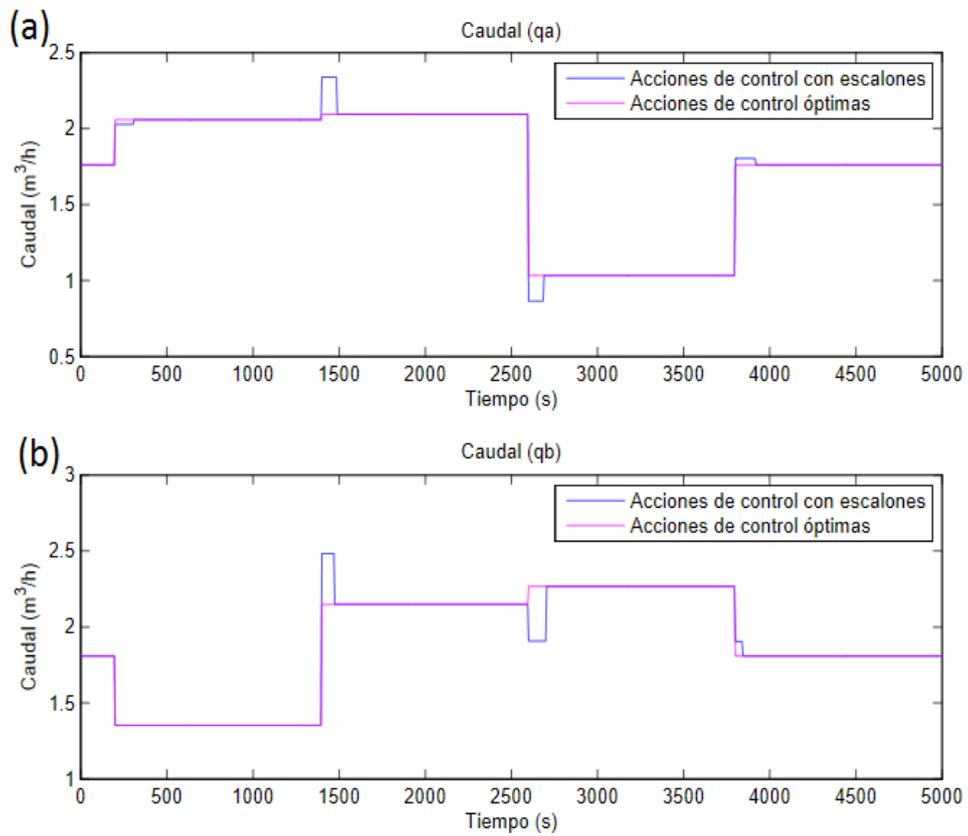


Figura 21:  $q_a$  (a) y  $q_b$  (b)

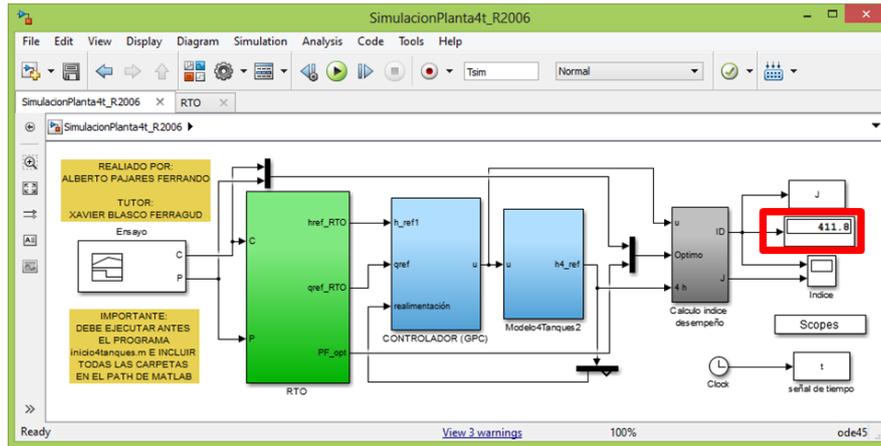


Figura 22: Índice de desempeño

## 4.6- Resultados

Comparando los resultados con los obtenidos por los demás participantes en el concurso, este control ha obtenido la tercera posición en el mismo. Estos resultados constan de dos fases, una primera de simulación, que servirá para seleccionar a los concursantes que participen en la segunda, la fase de ensayo real sobre la planta.

En la evaluación de la primera fase, fase de evaluación mediante simulación, este control obtuvo la segunda posición, tal y como se muestra en la tabla 3. El objetivo del sistema para el concurso es la suma de los índices propuestos en el MOP, como se ha comentado anteriormente.

En esta prueba se realizaron una serie de ensayos cuyos resultados son los obtenidos en la zona superior de la tabla. En la zona intermedia se encuentra el valor mínimo obtenido por todos los participantes, es decir, el mejor resultado obtenido. En la zona inferior se ha calculado la diferencia entre el resultado obtenido por cada participante con respecto al mínimo de todos ellos, o lo que es igual, la diferencia a la mejor solución encontrada por los participantes. Por último en la zona inferior derecha se calcula la media de cada uno de los participantes, lógicamente, el valor inferior será el mejor de ellos para esta primera etapa de simulación. Los resultados obtenidos por el control descrito en este proyecto son los de la fila que se muestra en color naranja de la tabla mencionada. Como se observa estos resultados son bastante buenos, ya que son el mínimo valor encontrado o se encuentran cerca de él.

Por último se realizó una segunda fase. En ella se realizaba el ensayo propuesto, descrito en la sección 4.6, sobre la planta real. Los resultados obtenidos difieren bastante de los observados en simulación para todos los participantes. El sistema descrito en el presente proyecto obtuvo el tercer puesto, tal y como se observa en la figura 23, en la que los resultados obtenidos son los que se muestran con el nombre de “UPV1”, en color verde.

Tabla 3: Resultados Fase 1

	000	00-	00+	...	++0	++-	+++	
<b>ID de los ensayos</b>	432,75	459,71	406,02	...	517,68	546,81	488,82	
	554,69	582,04	523,17	...	643,97	672,73	610,82	
	431,07	461,79	402,95	...	508,22	541,04	478,04	
	422,40	448,61	396,98	...	502,16	529,91	475,19	
	521,35	547,11	495,78	...	600,29	628,12	572,68	
	5385,7	5346,0	5456,8	...	7418,3	7376,0	7492,0	
	433,99	460,42	407,63	...	501,51	529,53	473,58	
	460,20	490,43	429,69	...	598,17	630,20	565,42	
<b>Valores mínimos</b>	422,40	448,61	396,98	...	501,51	529,53	473,58	
<b>Desviaciones</b>	10,347	11,097	9,0396	...	16,17	17,281	15,246	10,061
	132,29	133,43	126,183	...	142,46	143,20	137,25	132,81
	8,6727	13,178	5,9664	...	6,7065	11,509	4,459	9,4402
	0	0	0	...	0,6512	0,3797	1,6112	0,0979
	98,954	98,499	98,798	...	98,783	98,584	99,1	97,367
	4963,3	4897,4	5059,8	...	6916,8	6846,4	7018,4	4953,0
	11,59	11,807	10,644	...	0	0	0	8,3976
	37,8	41,822	32,709	...	96,664	100,67	91,839	45,843
								<b>Media</b>

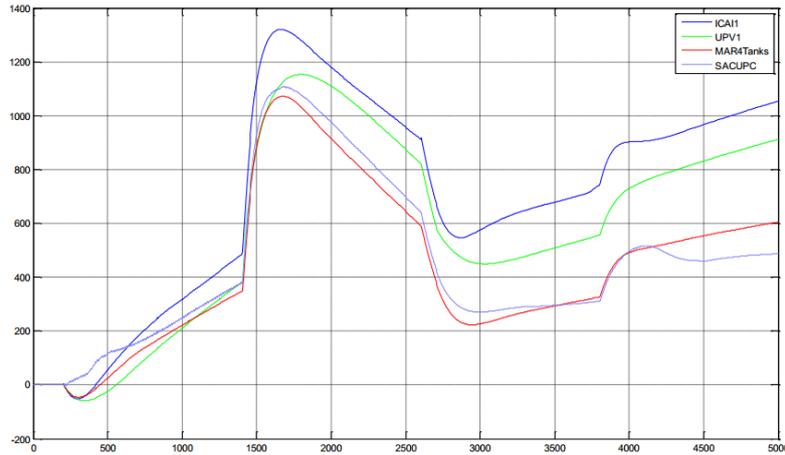


Figura 23: Resultados Fase 2

## 4.7- Trabajos Futuros

El índice a minimizar no tiene excesivo sentido real, tal y como se observa en las ecuaciones 5 y 6. Las unidades del índice a minimizar, sobre todo la del consumo energético son confusas, tal y como se observan en las ecuaciones 9 y 10.

$$J_{ce} \left[ \text{€} \cdot \frac{m^6}{h^2} \right] = q_a \left[ \frac{m^3}{h} \right]^2 + c[\text{€}] \cdot q_b \left[ \frac{m^3}{h} \right]^2 \quad (9)$$

$$J_{va}[\text{€}] = p[\text{€}] \frac{V_{min}[m^3]}{A[m^2](h_1[m] + h_2[m])} \quad (10)$$

Es por ello por lo que se propone en este trabajo dos nuevos índices (ecuaciones 11 y 12), para encontrar mayor sentido real al sistema. De esta forma tenemos claras las unidades que son de € por cada unidad de consumo energético y altura acumulada respectivamente. El consumo energético (ecuación 11) será el índice a minimizar y el volumen acumulado, ecuación 12 el índice a maximizar.

$$J_{ce} = c_a \cdot q_a + c_b \cdot q_b \quad (11)$$

$$J_{va} = p \cdot (h_1 + h_2) \quad (12)$$

Con estos dos objetivos planteamos el mismo problema que en el apartado anterior. Primero calculamos los puntos óptimos (tabla 4) a conseguir posteriormente en la simulación en diferentes zonas de operación. Para el índice propuesto, es necesario realizar cambios importantes en precio unitario ( $c_1$ ,  $c_2$  y  $p$ ) para conseguir variar el punto óptimo y con ello conseguir que se evolucione a una nueva zona de funcionamiento.

Tabla 4: Puntos Óptimos de Operación

Precios	$h_1$	$h_2$	$h_3$	$h_4$	$q_a$	$q_b$
$c_a=1, c_b=1, p=20$	1.0075	1.0783	0.9478	1.1950	2.1955	2.3977
$c_a=10, c_b=10, p=10$	0.205	0.2052	0.2063	0.2082	0.9163	1.1186
$c_a=10, c_b=10, p=25$	1.0059	1.0774	0.9457	1.1950	2.1955	2.3951
$c_a=0.5, c_b=100, p=10$	0.4031	0.6788	0.205	1.191	2.1918	1.1151
$c_a=100, c_b=1, p=100$	0.6717	0.4411	0.9491	0.205	0.9093	2.3995

Con ello proponemos un ensayo en el que se va pasando por cada uno de los puntos óptimos en orden cada 1200 segundos. Con ello obtenemos un índice de 752.8, tal y como se observa en la figura 24. Este índice es la suma de los objetivos propuestos previamente. Hay que tener en cuenta que este valor no es comparable en ningún caso con los obtenidos con el índice anterior propuesto por el concurso.

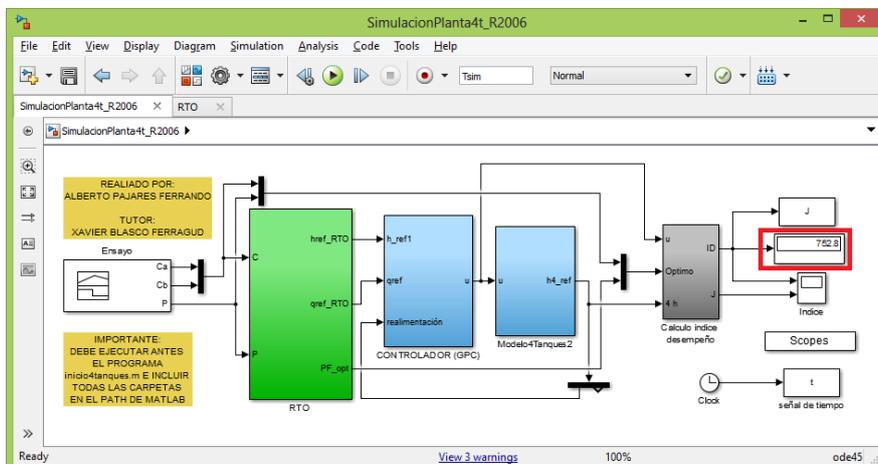


Figura 24: Índice de desempeño

Como trabajos futuros, se podría buscar la forma de realizar una RTO que calculará el escalón óptimo a introducir on-line, y no mediante la semejanza de los valores calculados off-line. No se ha realizado de esta manera ya que esto no se ha encontrado la forma de que este proceso tarde menos tiempo que el periodo de muestreo y por lo tanto sea posible. Además se podrían buscar nuevos índices a minimizar, como los propuestos anteriormente, para de esta manera, encontrar un sentido físico que ayude a entender el sistema al usuario.

## 5.- CONTROL DEL SISTEMA DE GESTIÓN DE LA ENERGÍA DE UN VEHÍCULO HÍBRIDO ELÉCTRICO

En esta sección se describirá de manera más detallada el segundo proceso a controlar en el presente trabajo, el EMS de un vehículo híbrido. Primero se realizará una introducción a los vehículos híbrido, para más tarde detallar el modelo empleado, y posteriormente entrar en detalle sobre el *problema de optimización multiobjetivo* planteado y sus resultados.

### 5.1- Introducción

La tendencia actual hacia el incremento de la movilidad de personas y mercancías en las sociedades más avanzadas puede llegar a generar problemas de contaminación local y de explotación de los combustibles fósiles. La contaminación más destacada es la del aire, pero también hay que tener en cuenta otras, como la acústica. Algunos estudios llegan a la conclusión de que este problema puede tener efectos sobre la salud de la población [20].

Diferentes alternativas se encaminan a resolver este problema; entre las soluciones planteadas, se encuentran los vehículos híbridos. Estos vehículos son muy eficientes, más silenciosos y sus emisiones son muy bajas, disponen de una tecnología que ya ha sido probada en la actualidad. Pese a ello, todavía hay mucho espacio para las estrategias de control avanzadas en este tipo de vehículos. No requieren un mantenimiento especial y el sistema híbrido dura lo mismo o más que el coche convencional [21]. Sin embargo, las baterías de los vehículos híbridos pueden tener un alto impacto ambiental si no se reciclan de forma adecuada. Además, están amenazados por los de combustibles alternativos, más simples mecánica y tecnológicamente [22]. A pesar de esto, y a que los vehículos híbridos son más caros que los de un modelo equivalente, son la solución económicamente más viable a medio plazo [23]. Pese a ello, existen algunas limitaciones sobre las estrategias de control. Es por ello por lo que se decide incluir el EMS como uno de los procesos para el presente trabajo.

Un vehículo híbrido dispone de un sistema de propulsión que combina dos o más fuentes de energía (ver figura 25). Se utilizan sistemas de propulsión híbridos en distintos tipos de vehículos. El formato clásico es el del HEV, que combina un motor de combustión con un motor eléctrico. Este tipo de vehículos pueden utilizar diferentes sistemas de propulsión:

- Sistema paralelo: el motor térmico es la principal fuente de energía y el motor eléctrico actúa aportando más potencia al sistema. El motor eléctrico ofrece su potencia en la salida y en la aceleración, cuando el motor térmico consume más.
- Sistema combinado: el motor eléctrico funciona en solitario a baja velocidad, mientras que a alta velocidad, ambos motores trabajan simultáneamente.

- Sistema en serie: el vehículo se impulsa sólo con el motor eléctrico, que obtiene la energía de un generador alimentado por el motor térmico.

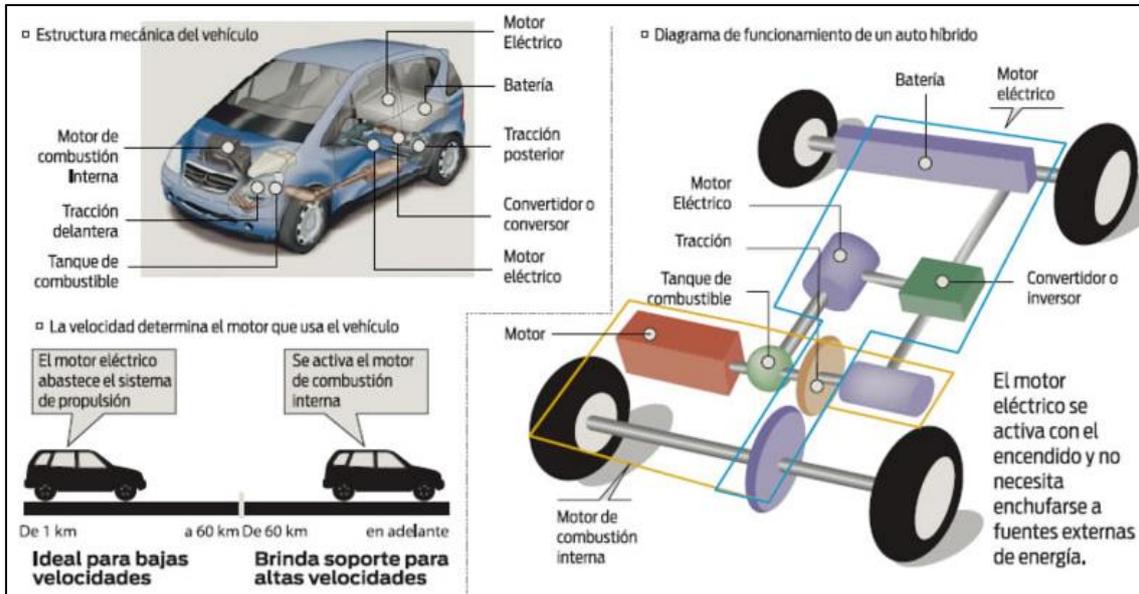


Figura 25: Funcionamiento Vehículo Híbrido

El sistema combinado es el que ofrece mayores ventajas al modelo, ya que suele aumentar la eficiencia. Esto se debe a que se puede aprovechar la energía generada por el motor térmico, que en ciertas circunstancias puede ser excesiva, y en lugar de desperdiciarla, la utiliza para recargar las baterías del sistema eléctrico. El Chevrolet Volt es un ejemplo de vehículo híbrido que utiliza este sistema [24].

Además en los últimos años, una variedad de estrategias de control para el EMS se han utilizado para este tipo de vehículos. Pese a ello, no existe ninguna estandarización respecto a los indicadores u objetivos que más interesan en el diseño del EMS. Esta es una de las motivaciones para la realización de este control en este proyecto: la necesidad de crear diferentes objetivos e indicadores, probablemente contrapuestos, que ayuden al proceso de ajuste del EMS, ajustándolo a necesidades y requerimientos más reales. Con el desarrollo de estos nuevos indicadores, el problema se puede convertir en un MOP y hace que se plantee una alternativa a los sistemas de control fuzzy, los más empleados hasta el momento para este cometido. De esta forma, con los nuevos indicadores, se podrán comparar mejor las prestaciones de las soluciones que se obtendrán, llegando a un mejor compromiso entre ellas. Es por ello, por lo que se considera que utilizar un MOP sería muy útil para este diseño.

El Chevrolet Volt (ver figura 26) es un vehículo híbrido eléctrico enchufable desarrollado por General Motors lanzado en Estados Unidos en diciembre de 2010. Las entregas en Canadá se iniciaron en septiembre de 2011 y en el mercado europeo en febrero de 2012. El Volt también es vendido como Holden Volt en Australia, y como Opel Ampera o Vauxhall Ampera en Europa. Las familias Volt y Ampera son los

vehículos híbridos eléctricos enchufables más vendido en el mundo, con más de 70.000 unidades vendidas en Norte América y Europa hasta enero de 2014. Sus ventas son lideradas por los Estados Unidos, con 58.158 unidades vendidas hasta marzo de 2014.

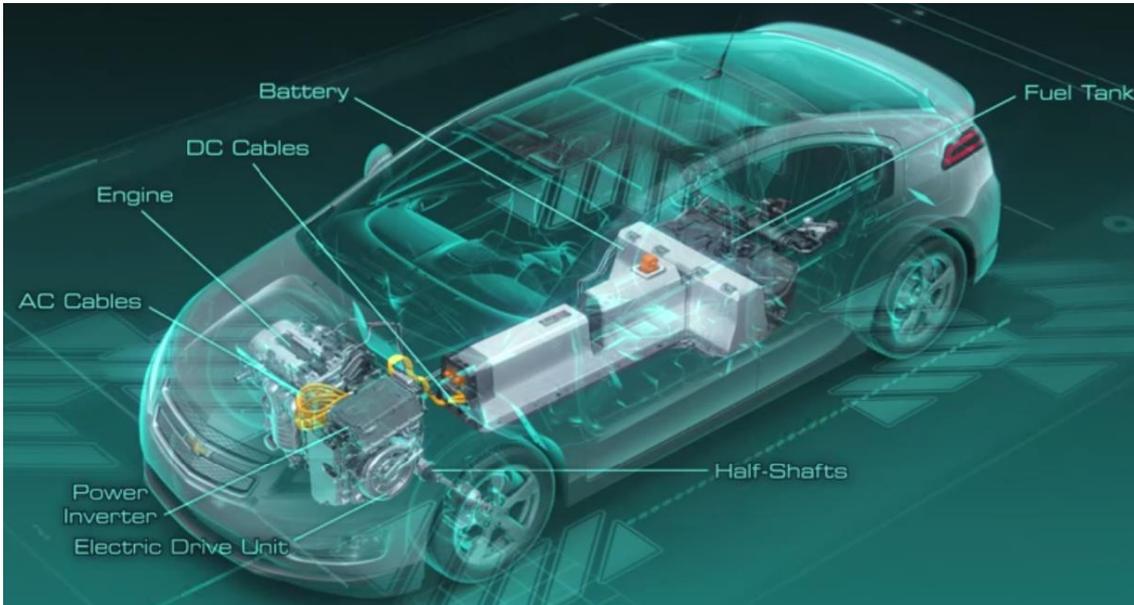


Figura 26: Situación de los componentes del Chevrolet Volt

Para la realización de este trabajo se decide utilizar un modelo que intenta imitar el funcionamiento del vehículo híbrido Chevrolet Volt. En él, solo será necesario realizar el EMS del sistema para poder llevar a cabo diferentes simulaciones y analizar los resultados. Este simulador forma parte de un concurso y se su funcionamiento se detalla en el enunciado del mismo [25], lo que proporciona grandes ventajas. Por un lado, mayor detalle en el enunciado del mismo, y por otro la posibilidad de comparar resultados con los participantes del concurso. Es por este motivo, por el que se decide basar el proyecto en este modelo, ya que reúne muy buenas características para el mismo.

## 5.2- Chevrolet Volt

El Chevrolet Volt (ver figura 27), en su modelo del año 2011, tiene 16 *Kwh* (10,4 *Kwh* utilizable) en la batería de iones de litio, paquete que se puede cargar conectando el coche a una toma eléctrica. La particularidad de este vehículo radica en que el motor de gasolina no mueve el coche de forma directa, sino que está unido a un generador que carga la batería cuando se está agotando, por lo que el coche siempre es propulsado por el motor eléctrico. No se requiere ninguna estación de carga externa. El Volt es propulsado por un motor eléctrico con una potencia máxima de 111 *Kw* que entrega 370 *Nm* de par. La capacidad de la batería se incrementó a 16,5 *Kwh* (10,9 *Kwh* utilizable) para los modelos de 2013, los que aumentan el rango eléctrico de 56 a 61 km. Posteriormente la capacidad de la batería se incrementó a 17,1 *Kwh* para los modelos nuevos.



Figura 27: Chevrolet Volt

Mientras se conduce, después de que la batería del Volt se haya reducido a un umbral predeterminado de carga completa, se alimenta por el motor de combustión interna con aproximadamente 80 CV (60 kW). El vehículo también tiene un sistema de frenado regenerativo. La potencia eléctrica del generador se envía principalmente para el motor eléctrico, y el restante va a las baterías, dependiendo del estado de carga de la batería (SOC [26], por sus siglas en inglés) y la potencia demandada en las ruedas.

El Volt requiere gasolina con un mínimo 91 octanos. Para los usuarios que conducen principalmente en modo eléctrico se evitan problemas de mantenimiento causados por el almacenamiento de la misma gasolina en el tanque durante meses, el Volt tiene un tanque de combustible sellado y presurizado para evitar la evaporación, y como en consecuencia, el llenado de combustible tiene que ser despresurizado antes de abrir el tanque. También el sistema de gestión del motor controla el tiempo en el que el motor se encuentra en marcha, ya que está programado para indicar al conductor más allá de los 64 km de rango eléctrico, antes de recargar, con el fin de consumir poca gasolina. Si el conductor no utiliza el motor de combustión, el sistema ejecuta automáticamente el modo de mantenimiento que se inicia para que el motor de combustión consuma parte del combustible y circulen los fluidos dentro del motor para así evitar un envejecimiento prematuro del motor.

La autonomía es de 64 kilómetros en modo exclusivamente eléctrico, (poca autonomía si lo comparamos con modelos puramente eléctricos, pero muy superior a la de modelos híbridos como el del Toyota Prius [27]) y cuando se descarga la batería, el motor de gasolina funciona como generador para recargar la batería, lo que aumenta su alcance en aproximadamente 500 kilómetros adicionales, hasta que se acabe el combustible. Algún otro modelo de vehículo exclusivamente eléctrico ha logrado acercarse a esta autonomía, como el Tesla Roadster [28], aunque con un precio mucho mayor debido al coste de las baterías.

Por lo tanto, el Chevrolet Volt es un coche eléctrico para ciudad, suave, agradable de conducir, silencioso y de pocas emisiones, que se convierte en un coche de carretera con la misma autonomía que cualquier otro vehículo. La idea es genial y tiene la ventaja sobre los híbridos enchufables en que su autonomía en modo eléctrico supera los 50 km, lo que, en teoría, debe bastar para los desplazamientos urbanos de la gran mayoría de los compradores de coches. El Volt es una apuesta global de General Motors por la tecnología eléctrica de autonomía extendida que combina un motor eléctrico que es el encargado de propulsar el coche en toda circunstancia y un motor de gasolina que, cuando se agota la carga de la batería, se pone en marcha para funcionar como si de un generador se tratase y alimentar al motor eléctrico. El Volt, por lo tanto, evita la llamada angustia de la autonomía, que tanto afecta a los eléctricos puros y puede ser utilizado como cualquier otro modelo ya que el motor de gasolina siempre está disponible para alimentar al eléctrico.

El funcionamiento de este vehículo, dispone que el motor eléctrico, es el que actúa a bajas velocidades y cuando no se exige un rendimiento mecánico elevado. El motor de gasolina, en cambio, entra en funcionamiento cuando se aumenta la velocidad o se solicita más potencia de la que puede ser proporcionada por el motor eléctrico por sí solo. Este proceso se realiza de forma completamente automática y sin que el conductor note apenas el trabajo de uno u otro, a pesar de que se informa a los ocupantes a través de la pantalla multifunción de la consola central, de los tránsitos de energía térmica y eléctrica, del estado de carga de la batería y de la recuperación de energía cinética.

Chevrolet denomina a la transmisión utilizada en el Volt como “Power Split Device” [29]. Esta transmisión no tiene una caja de cambios convencional con distintos engranajes, ni una caja automática de variador continuo con correa. Este vehículo dispone de un engranaje planetario llamado “Planetary Gear Set” [30] para transmitir el movimiento a las ruedas. No tener una caja de cambio normal aporta ventajas notables y especialmente necesarias en un coche como éste: menos peso, más espacio y menos pérdidas por rozamiento.

El sistema de frenado regenerativo funciona cuando queremos disminuir la velocidad del vehículo, utilizando el motor térmico como freno o bien pisando el pedal de freno. En esta situación el motor eléctrico funciona como un generador, convirtiendo la energía cinética del vehículo en energía eléctrica, la cual se usa para cargar las baterías. Este sistema es particularmente efectivo en recobrar energía cuando se circula por ciudad, donde se producen aceleraciones y deceleraciones frecuentes.

### **5.2.1- Tren de potencia**

La arquitectura del sistema de propulsión del Chevrolet Volt es capaz de alimentarlo utilizando lo que se conoce como “Power Split Devide”, sistema basado en un engranaje planetario, llamado “Planetary Gear Set” y que se muestra en la figura 28. Tres interruptores (C1, C2, C3) permiten conectar o desconectar el motor de

combustión interna (ENG), el generador (GEN) y el motor eléctrico (MOT). Ambas máquinas eléctricas en realidad puede trabajar tanto en modo motor y generador.

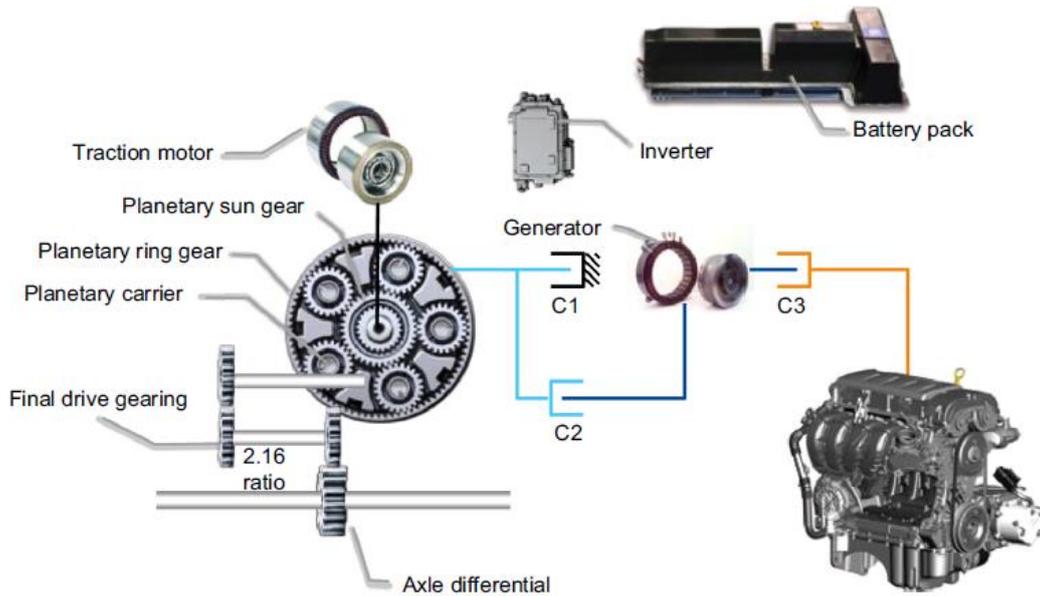


Figura 28: Arquitectura del tren de potencia del Chevrolet Volt

### 5.2.2- Planetary Gear Set

En la figura 29 y 30 se observa la arquitectura de los engranajes planetarios del Chevrolet Volt.

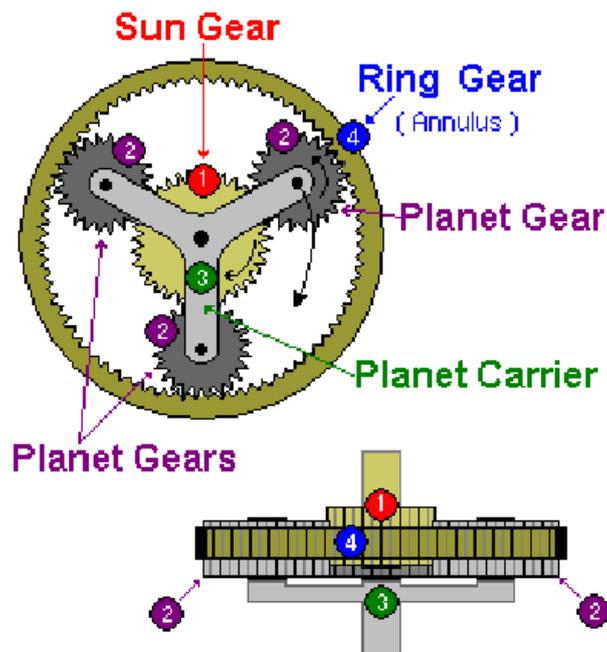


Figura 29: Arquitectura del tren de potencia del Chevrolet Volt

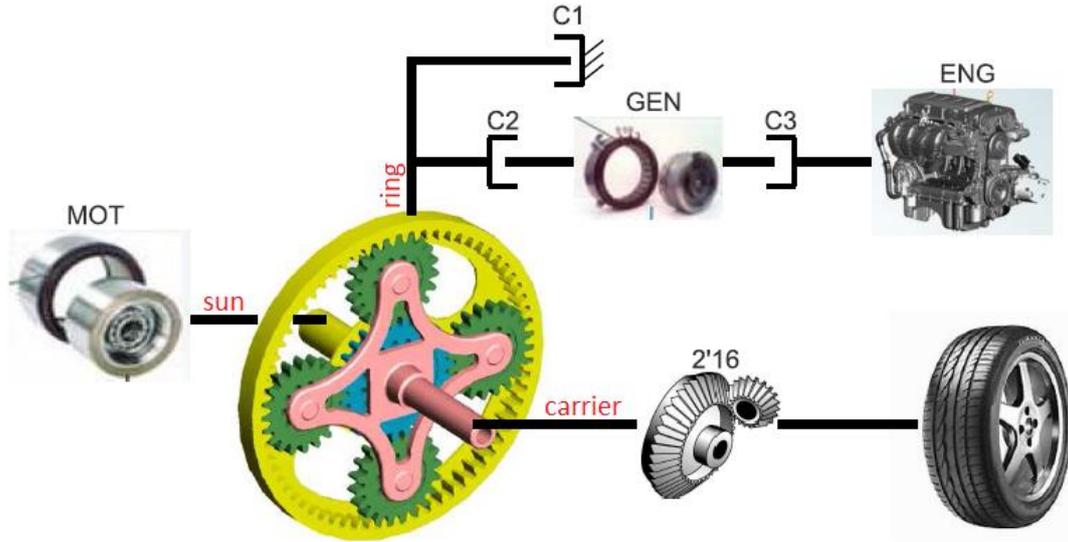


Figura 30: Arquitectura tren de potencia del Chevrolet Volt

Como se observa en las figuras, el generador está conectado a la zona exterior del engranaje (ring), siempre y cuando esté cerrado el interruptor C2. El motor eléctrico está conectado a la zona interior (sun), mientras que la transmisión de la salida está conectada a la zona intermedia del engranaje (carrier) que a través de una relación de transformación llega a las ruedas del vehículo. Con todo ello tenemos las ecuaciones 9-14.

$$T_{sun} = T_{MOT} \quad (9)$$

$$T_{ring} = T_{GEN} + T_{ENG} \quad (10)$$

$$T_{carrier} = \frac{T_{wheels}}{R_d} \quad (11)$$

$$\omega_{sun} = \omega_{MOT} \quad (12)$$

$$\omega_{ring} = C2 \cdot \omega_{GEN} \quad (13)$$

$$\omega_{carrier} = R_d \cdot \omega_{wheels} \quad (14)$$

donde  $R_d = 2.16$ , y es la relación de transformación final entre las ruedas y la salida del engranaje planetario. Además la relación de par impuesta por el engranaje es igual a la ecuación 15.

$$T_{sun} = \frac{T_{ring}}{\rho} = \frac{T_{carrier}}{(\rho+1)} \quad (15)$$

donde  $\rho$  es el relación entre la diferencia de dientes del ring y el sun, tal y como se observa en la ecuación 16.

$$\rho = \frac{N_{ring}}{N_{sun}} = \frac{83}{37} = 2.24 \quad (16)$$

Por otro lado la relación cinemática entre las tres velocidades que componen el engranaje son las que se observa en la ecuación 17.

$$\rho \cdot \omega_{ring} + \omega_{sun} = (\rho + 1) \cdot \omega_{carrier} \quad (17)$$

### 5.2.3- Modos de funcionamiento

En el Chevrolet Volt existen 4 modos de funcionamiento según se conecten los tres conectores (C1, C2 y C3):

Modo 1.- Solo el motor eléctrico está conectado (C1 cerrado, C2 abierto, C3 abierto, motor de combustión apagado). El motor eléctrico es el que propulsa el vehículo, alimentado por la batería. El conjunto de engranajes planetarios introduce una reducción fija entre el motor eléctrico y resto de la línea de transmisión (ver figura 31).

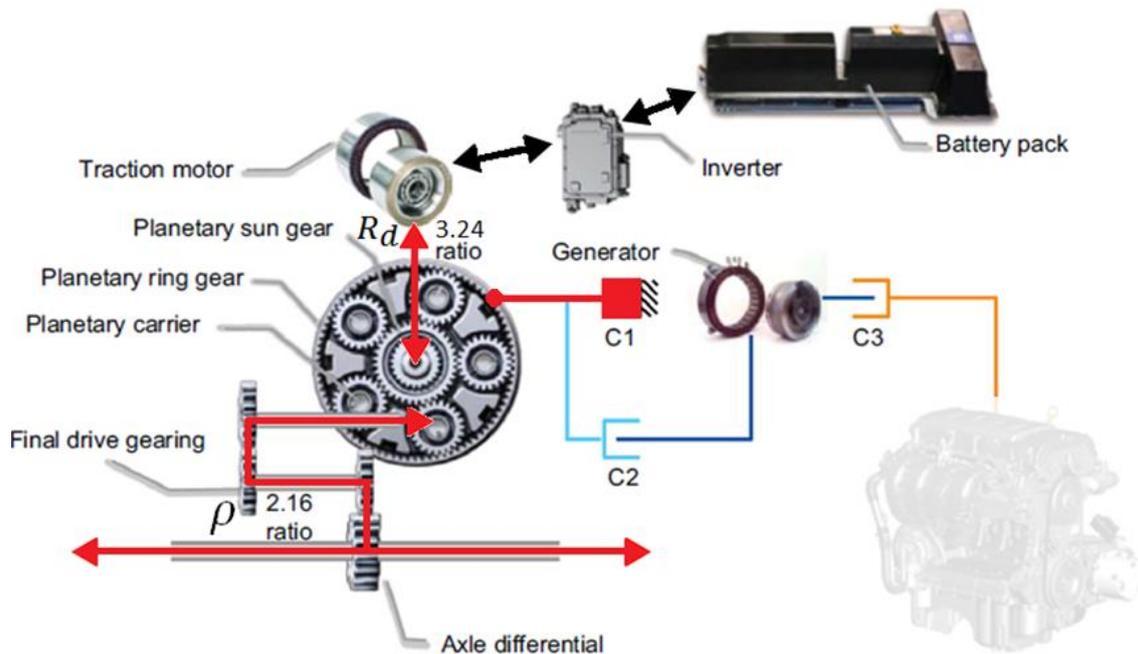


Figura 31: Funcionamiento Modo 1

Modo 2.- El motor eléctrico y el generador conectados (C1 abierto, C2 cerrado, C3 abierto, motor de combustión apagado). En este caso, el generador actúa a través de C2 y por lo tanto, cambia la relación de transmisión entre motor eléctrico y la salida del sistema de propulsión. Este modo es útil para reducir la velocidad del motor eléctrico a velocidades altas del vehículo, aumentando así la eficiencia general del sistema de propulsión mediante la combinación de la utilización de ambas máquinas (ver figura 32).

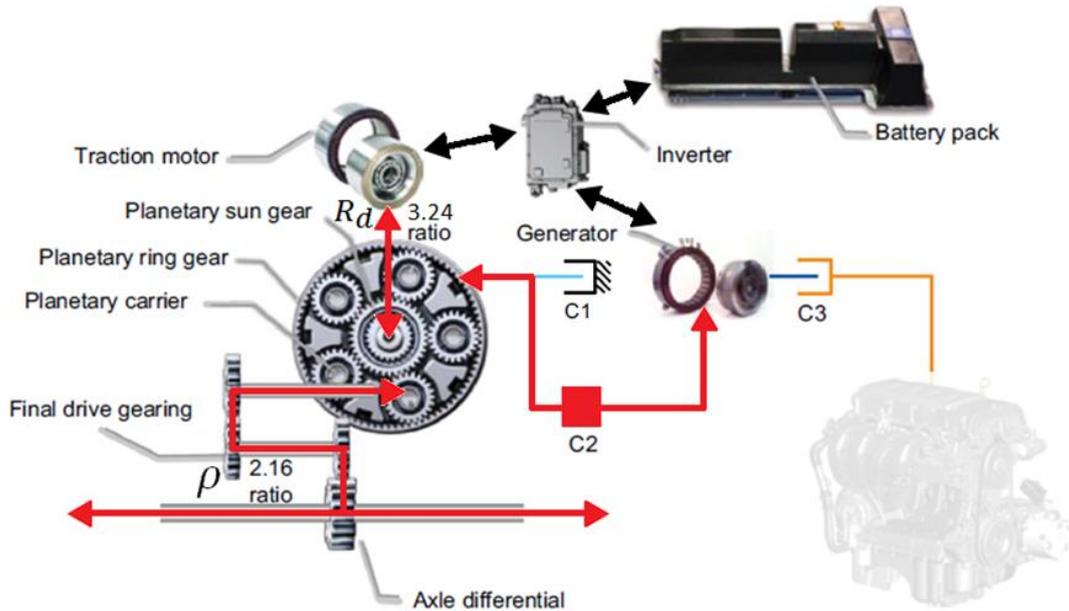


Figura 32: Funcionamiento Modo 2

Modo 3.- Modo de rango extendido (C1 cerrado, C2 abierto, C3 cerrado, motor de combustión encendido). Se trata del tradicional modo serie: el motor y el generador están conectados y producen energía eléctrica, proporcionada al motor eléctrico, que es el que propulsa las ruedas (ver figura 33).

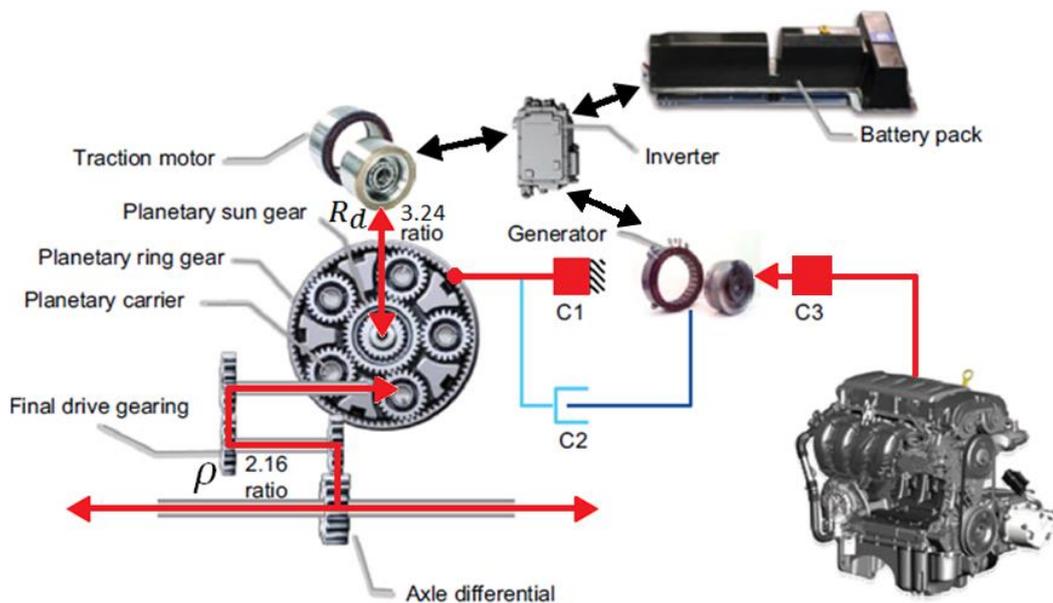


Figura 33: Funcionamiento Modo 3

Modo 4.- Todo conectado (C1 abierto, C2 cerrado, C3 cerrado, motor de combustión encendido). En este modo, las tres máquinas están conectadas entre sí con una relación de velocidad variable que depende de la velocidad del generador. El modo permite la transmisión de potencia mecánica directamente desde el motor a las ruedas, lo que resulta en una mayor eficiencia general de un modo de serie puro (ver figura 34).

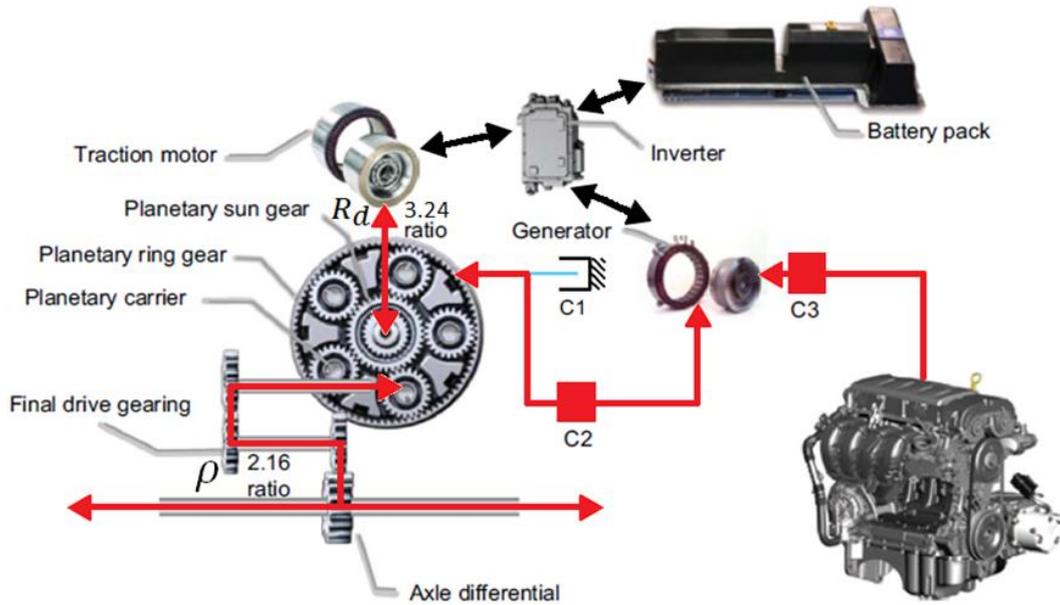


Figura 34: Funcionamiento Modo 4

### 5.3- Modelo del Vehículo Híbrido

Un vehículo híbrido es aquel que combina dos motorizaciones, un motor de combustión interna y otro eléctrico alimentado por baterías adicionales a la principal. El presente proyecto se basa en un modelo que está realizado en simulink, herramienta de Matlab (ver figura 35). Este modelo se ha proporcionado para la realización de un concurso sobre motor de combustión y control del tren de potencia en simulación y modelado, realizado en Rueil-Malmaison, Francia, en Octubre del 2012 (E-COSM 12 [25]). En él, se proporciona un modelo que se compone de tres zonas tal y como se observa en la figura 35.

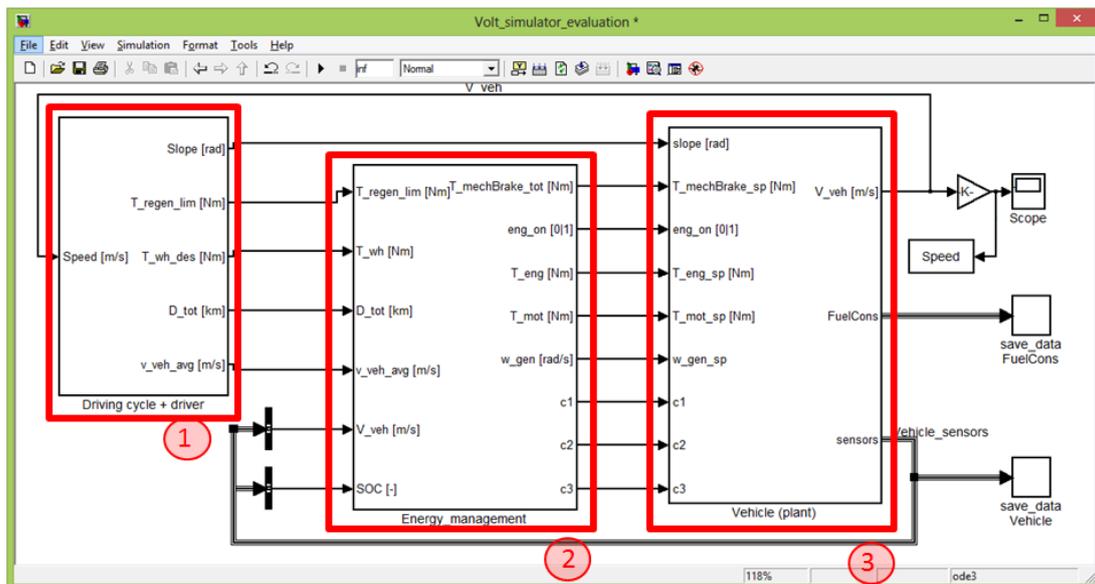


Figura 35: Modelo del Vehículo Híbrido

La primera de ellas llamada “Driving cycle + driver” es la que tiene como salidas la pendiente, el par límite a regenerar, el par deseado en las ruedas, la distancia total y la velocidad media del trayecto. Estas dos últimas variables se proporcionan porque para este concurso se supone que es conocido el trayecto y por lo tanto se conocen ambas variables. Para este proyecto hemos supuesto desconocidas estas variables, ya que pese a que pueden proporcionarnos cierta información útil, son variables desconocidas en la mayoría de casos reales. Además esta primera zona del modelo tiene como entrada la velocidad del vehículo. Con todo ello, sabemos que este bloque se encarga de proporcionarnos como variables útiles para nuestro sistema los pares de regeneración y deseado en las ruedas, conociendo el terreno por el que se mueve el vehículo y las especificaciones deseadas por el conductor.

La segunda zona del modelo, y más importante, es el EMS. Este apartado viene vacío para la realización del concurso y deberá ser rellenado para obtener resultados y poder llevar a cabo la simulación. Este bloque dispone como entradas las salidas del bloque anterior, excepto la pendiente, además del SOC y la velocidad del vehículo. Este bloque tiene además como salidas el par mecánico de frenado, el par del motor de combustión y del motor eléctrico, la velocidad angular del generador, y el estado de los interruptores C1, C2, y C3. Estos interruptores proporcionan información de que en modo estamos, conectando las diferentes máquinas de las que dispone el vehículo. Este bloque también nos informará de si el motor de combustión está o no enchufado.

Por último, la tercera zona (ver figura 35), es la que se encarga del cálculo de las salidas del sistema. Estas son, los sensores que se realimentarán en los demás bloques, los consumos y la velocidad del vehículo.

Con todo ello, conocemos el modelo y nos centramos en la zona del EMS que es la que deberemos controlar para que el vehículo se comporte de manera correcta. En la siguiente sección entraremos más en detalle sobre este subsistema del modelo.

## 5.4- Implementación del Sistema de Gestión de la Energía

El sistema de gestión de la energía de un vehículo híbrido eléctrico se puede considerar la etapa superior del control, lo que se conoce en otros ámbitos como RTO. Esta etapa debe en el presente control proporcionar el punto ideal en cada instante, es decir, debe optimizar a tiempo real. El EMS de este modelo dispone de seis entradas y ocho salidas.

Las entradas son por un lado información de los sensores del vehículo y por otro, la información del ciclo de conducción (conductor). De los sensores vehículo se dispone de la velocidad ( $V_{veh}$ ) y el SOC en cada instante. Del ciclo de conducción se dispone del mínimo par que se puede regenerar ( $T_{regen_{lim}}$ ) y el par deseado en las ruedas del vehículo ( $T_{wh}$ ). Además, se tiene acceso a la velocidad media ( $V_{veh_{avg}}$ ) y la distancia total del trayecto a realizar ( $D_{tot}$ ). Esta información no ha sido utilizada para el presente control, ya que no se considera que se disponga de esta información en un trayecto real.

Las salidas del sistema son los interruptores C1, C2 y C3, los pares de frenado total, de motor eléctrico y de motor de combustión, la velocidad angular en el generador y una variable que indica si el motor de combustión está conectado o no. Este control se compone básicamente de dos zonas como se observa en la figura 36.

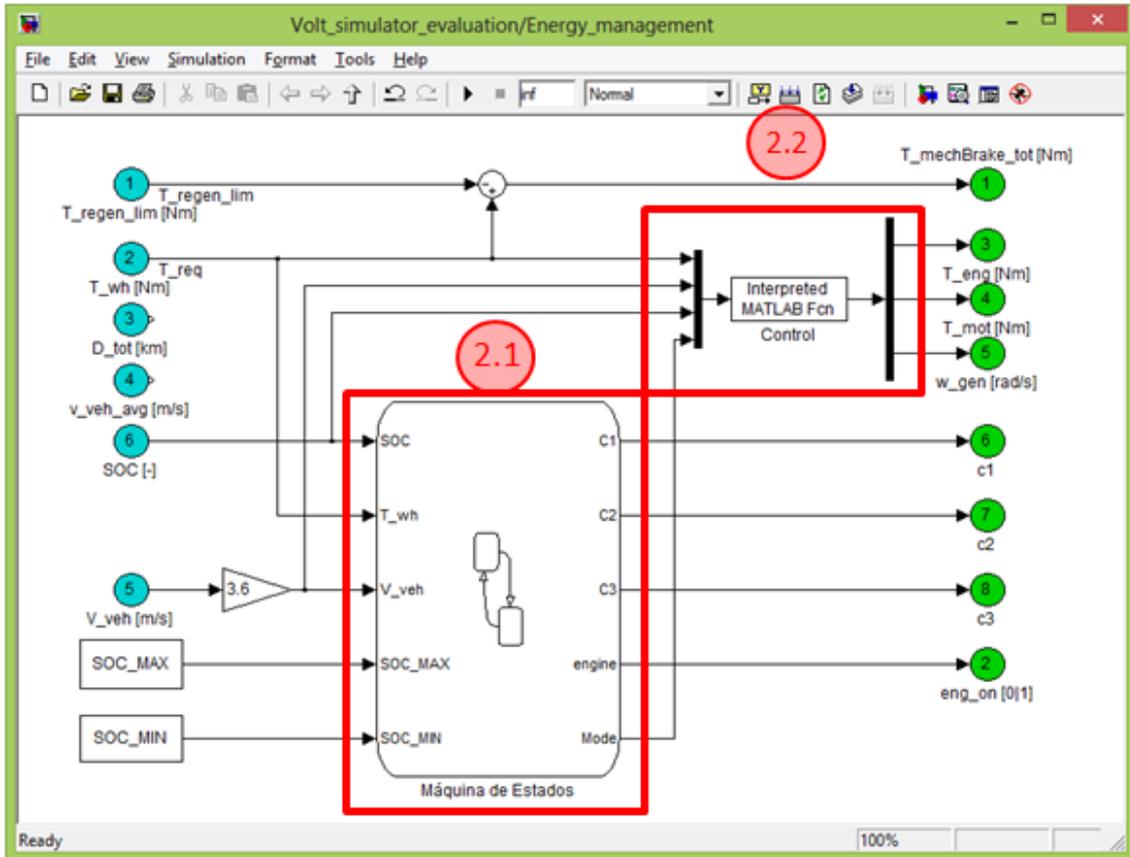


Figura 36: Sistema de Gestión de la Energía

La primera zona, compone una máquina de estados, en la que según el valor de diferentes variables de entrada del sistema se deberá elegir el modo de funcionamiento más adecuado en cada instante. Al conocer el modo de funcionamiento, también conocemos el valor de los interruptores (C1, C2 y C3), así como si el motor de combustión debe o no estar conectado (modo 1 y 2, desconectado), como se explica en la sección 5.2.3. Esta máquina de estado es la representada por el esquema que se observa en la figura 37. En una máquina de estados si el sistema se encuentra en un determinado lugar y se cumple su transición, el sistema evoluciona hasta el nuevo lugar hacia donde vaya la transición. Las transiciones se detallarán más adelante.

Es importante saber que la potencia de la batería puede superar los límites establecido debido a diferentes factores, el más común, debido a una demanda de un par elevado por parte del conductor, lo que provoca que la batería no pueda sola conseguir el objetivo propuesto, y por ello que requiera la ayuda de otra máquina para lograrlo.

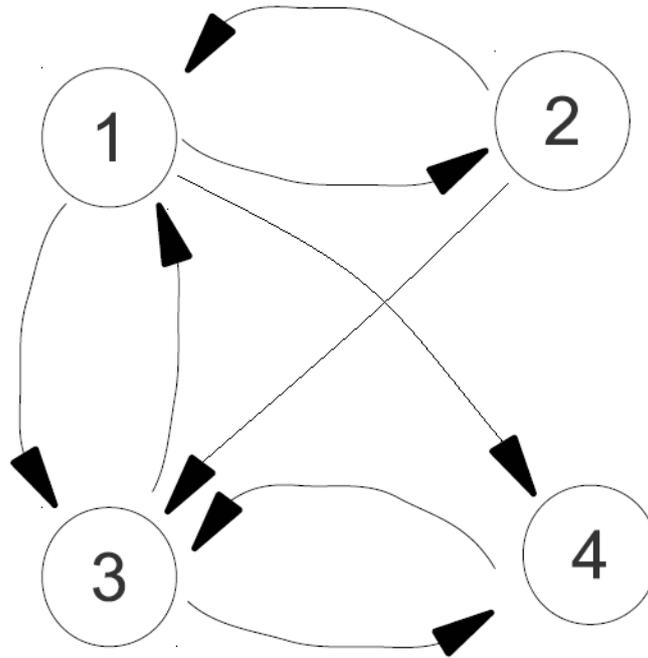


Figura 37: Máquina de Estados

Las transiciones posibles de esta máquina de estados son:

Modo 1 a 2: Esta transición se producirá cuando el SOC sea alto, es decir, superior al SOC máximo, que será una variable de decisión, y el sistema se encuentre en la zona naranja de la figura 38a.

Modo 2 a 1: Esta transición se producirá cuando el SOC sea mayor que el SOC máximo, y el sistema se encuentre en la zona violeta de la figura 38a. Además de esto también se cumplirá esta transición cuando el SOC sea inferior a este valor y se encuentre en la zona violeta de la figura 38b.

Modo 1 a 3: Esta transición se producirá cuando el SOC es inferior al SOC mínimo o cuando la potencia de la batería exceda el límite de operación. Esto ocurre cuando se superan los límites de la figura 39.

Modo 3 a 1: Esta transición se producirá cuando el SOC es superior al SOC mínimo y la potencia de la batería se encuentra dentro de los límites (figura 39).

Modo 1 a 4: Esta transición se cumplirá cuando el SOC sea mayor que el SOC máximo y se encuentre en la zona verde de la figura 38b.

Modo 2 a 3: Esta transición se producirá cuando el SOC es inferior al SOC mínimo o cuando la potencia de la batería exceda el límite de operación. Esto ocurre cuando se superan los límites de la figura 39.

Modo 3 a 4: Esta transición se producirá cuando el SOC es superior al SOC mínimo y el sistema se encuentre en la zona verde de la figura 38b.

Modo 4 a 3: Esta transición se producirá cuando el SOC es inferior al SOC mínimo o cuando el SOC es superior al SOC máximo y se encuentre en la zona azul de la figura 38b.

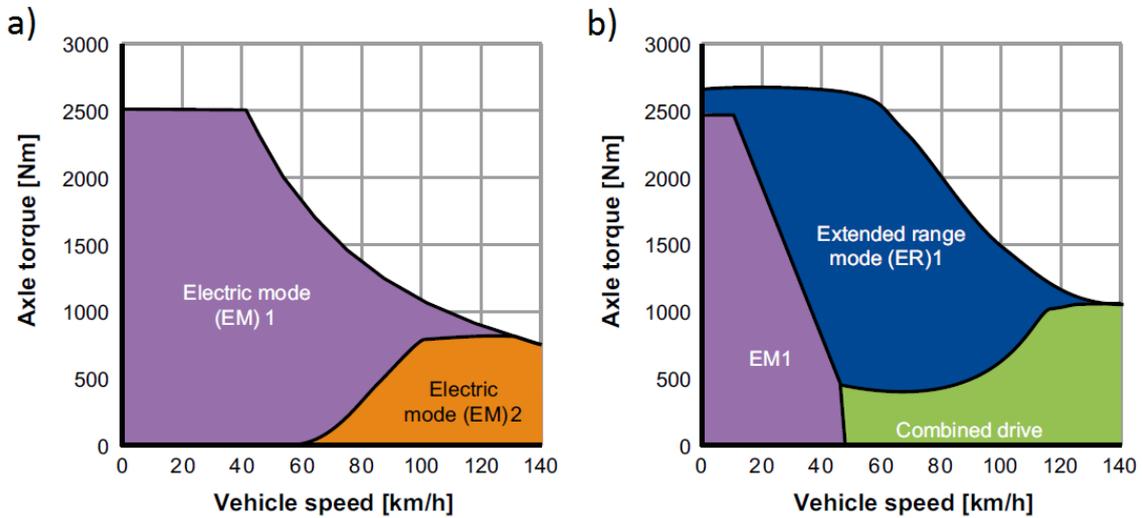


Figura 38: Modos de Operación con SOC alto (a) y con SOC alto (b)

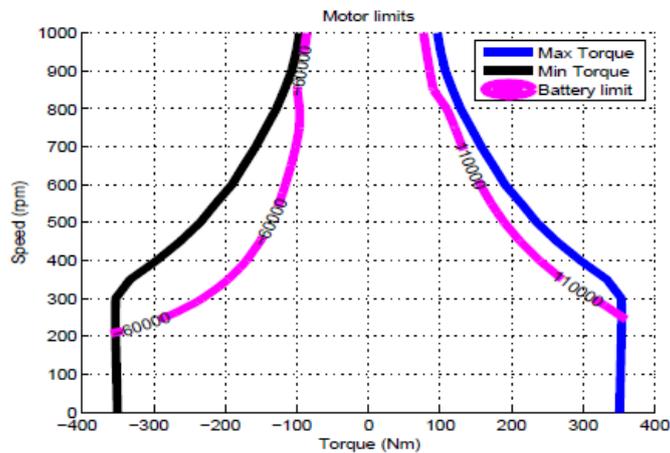


Figura 39: Limites de Operación

Por otro lado y siguiendo las ecuaciones de la sección 5.2.2, en la zona 2 del EMS se define el mejor punto de operación en cada instante. Este punto deberá contener la velocidad angular ( $\omega_{GEN}$ ) en el generador, así como los pares en los motores eléctrico ( $T_{MOT}$ ) y de combustión ( $T_{ENG}$ ). Independientemente del modo de funcionamiento, las ecuaciones 9-14, anteriormente descritas, definen el sistema. Con ello podemos suponer como conocidas las velocidades y par en la zona intermedia del engranaje (carrier). Además el par de frenado total es el par deseado en las ruedas menos el par límite a

regenerar, ambas entradas, tal y como se ve en la ecuación 19. Por último la potencia de la batería es igual a la suma de potencias del motor eléctrico y generador (ecuación 23).

$$P_{BATT} = P_{MOT} + P_{GEN} \quad (18)$$

$$T_{mechBrake_{total}} = T_{wheels} + T_{regen_{lim}} \quad (19)$$

Según el modo de funcionamiento en el que se encuentre el sistema, se tiene (teniendo en cuenta las ecuaciones 9-17):

Modo 1: Como ya se ha comentado en la sección 5.2.3, en este modo el motor eléctrico es el que propulsa el vehículo, alimentado por la batería (ver figura 32). El generador no está conectado, pero el controlador debe igualar la velocidad del generador a la velocidad de arranque del mismo, ya que esto produce beneficios al arrancar el motor. El motor de combustión no está conectado y con ello su par es nulo. En esta configuración no hay ningún grado de libertad, ya que todas las variables dependen de las entradas, estas son la velocidad y el par en las ruedas ( $\omega_{wheels}$  y  $T_{wheels}$ ), y con ello la velocidad y el par en el carrier (ecuaciones 20-24). La velocidad en la zona externa del engranaje (ring) es nula.

$$P_{BATT} = P_{MOT} + P_{AUX} \quad (20)$$

donde  $P_{AUX}$  representa la carga de potencia auxiliar.

$$\rho \cdot \omega_{ring} + \omega_{sun} = \omega_{sun} = \omega_{carrier} \cdot (\rho + 1) \quad (21)$$

$$T_{sun} = \frac{T_{carrier}}{(\rho+1)} = \frac{T_{ring}}{\rho} \rightarrow T_{sun} = T_{MOT} = \frac{T_{wheels}/R_d}{(\rho+1)} \quad (22)$$

$$T_{ENG} = 0 \quad (23)$$

$$\omega_{GEN} = \text{velocidad de arranque} \quad (24)$$

Modo 2: El motor eléctrico y el generador están conectados. Es este modo la zona exterior del engranaje (ring) está conectado con el generador (ecuación 28). Respecto a los pares, el sistema no tiene grados de libertad, tanto el par en el motor eléctrico como en el generador son conocidos (ecuaciones 27). Pero por lo que respecta las velocidades angular, se tiene un grado de libertad, ya que tenemos dos incógnitas, las velocidades angulares en el motor eléctrico y el generador, pero en las que una depende de la otra (ecuación 29). Por lo tanto, se deberá escoger la velocidad angular en el motor eléctrico que minimice la potencia en la batería (ecuación 25). El motor de combustión no está conectado y con ello su par es nulo.

$$P_{BATT} = P_{wheels} = P_{MOT} + P_{GEN} = T_{MOT} \cdot \omega_{MOT} + T_{GEN} \cdot \omega_{GEN} \quad (25)$$

$$\rho \cdot \omega_{ring} + \omega_{sun} = \omega_{sun} = \omega_{carrier} \cdot (\rho + 1) \quad (26)$$

$$T_{sun} = \frac{T_{carrier}}{(\rho+1)} = \frac{T_{ring}}{\rho} \rightarrow T_{sun} = T_{MOT} = \frac{T_{wheels}/R_d}{(\rho+1)} \rightarrow T_{ring} = T_{GEN} = \rho \cdot T_{MOT} \quad (27)$$

$$\omega_{ring} = \omega_{GEN} \quad (28)$$

$$\omega_{MOT} = \omega_{wheels} \cdot R_d \cdot (\rho + 1) - \rho \cdot \omega_{GEN} \quad (29)$$

$$T_{ENG} = 0 \quad (30)$$

A modo de ejemplo, vamos a tratar un posible caso de este modo. Conocemos el par en las ruedas del vehículo. Con ello se conoce también el par en el motor eléctrico y generador, siguiendo la ecuación 26. Con ello tenemos la potencia de la batería, en la que tenemos como incógnita las velocidades angulares del motor y generador, pero en la cual se tiene una relación entre ellas, ecuación 27. Es por ello por lo que se tiene un grado de libertad. En la figura 40 se observa un ejemplo real de este modo. El sistema se debe mover a lo largo de las líneas azules en las gráficas del generador y el motor eléctrico. Posteriormente se debe elegir el punto de operación óptimo. Cada punto de color corresponde a su vez al punto del mismo color en la gráfica de al lado, es decir, a mayor velocidad en el generador menor velocidad en el motor.

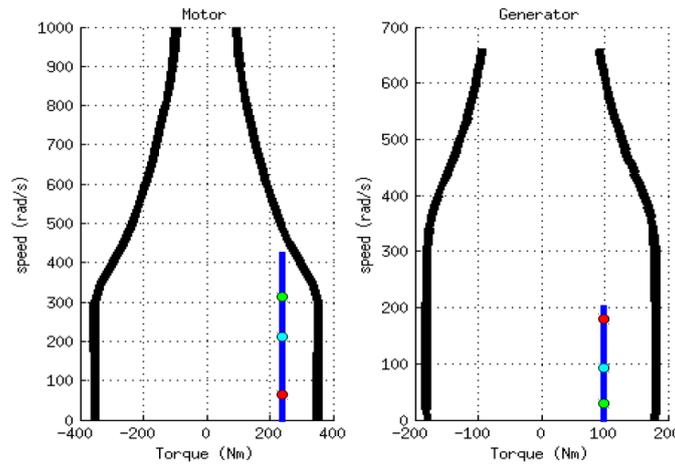


Figura 40: Ejemplo Modo 2

El cálculo se realiza mediante la función “fmincon” de Matlab. Fmincon es un algoritmo que encuentra un mínimo de una función multivariable no lineal restringida, y por defecto se basa en la (programación cuadrática secuencial) algoritmo SQP.

Modo 3: En este modo se conecta el motor de combustión. Es el modo de rango extendido, el tradicional modelo de HEV serie. El generador y el motor de combustión producen potencia eléctrica, y es el motor eléctrico el que impulsa las ruedas. En este modo hay dos grados de libertad. Al estar conectados el generador y el motor de combustión tenemos las ecuaciones 32 y 33. El objetivo es minimizar el combustible utilizado (ecuación 37), sujeto a las restricciones de la potencia de la batería (ecuación 34) que debe estar entre los límites de operación del vehículo en cada instante.

$$P_{wheels} = P_{MOT} = P_{GEN} + P_{BATT} - P_{AUX} \quad (31)$$

$$T_{GEN} = -T_{ENG} \quad (32)$$

$$\omega_{GEN} = \omega_{ENG} \quad (33)$$

$$P_{BATT} = P_{MOT} - P_{GEN} = T_{MOT} \cdot \omega_{MOT} - T_{GEN} \cdot \omega_{GEN} = T_{wh} \cdot \omega_{wh} + T_{ENG} \cdot \omega_{ENG} \quad (34)$$

$$\rho \cdot \omega_{ring} + \omega_{sun} = \omega_{sun} = \omega_{carrier} \cdot (\rho + 1) \quad (35)$$

$$T_{sun} = \frac{T_{carrier}}{(\rho+1)} = \frac{T_{ring}}{\rho} \rightarrow T_{sun} = T_{MOT} = \frac{T_{wheels}/R_d}{(\rho+1)} \quad (36)$$

$$combustible = \min \int_{t_i}^{t_f} \dot{m}_f(T_{ENG}, W_{ENG}) dt \quad (37)$$

A modo de ejemplo, vamos a tratar un posible caso de este modo. Conocemos el par en las ruedas del vehículo. Con ello se conoce el par y las velocidades en el carrier y el sun, ya que la velocidad en el ring es nula, ecuaciones 9-17. Con ello debemos encontrar el par y velocidad angular en el motor de combustión que minimice el consumo de combustible, es decir, que menor potencia consumo en el motor de combustión. Pero es necesario tener en cuenta que la potencia en la batería no puede salir fuera de los límites en cada instante. Por ello en este modo se calculan los límites de esta potencia para después elegir el mejor punto que se encuentre dentro de ellos. Para minimizar el combustible utilizado se debe seguir la línea que se muestra en la figura 41 [31]. En esta figura se observa la relación tanto en el motor de combustión como en el generador. Como se muestra en las ecuaciones anteriores ambas velocidades deben ser iguales, y sus pares deben ser también igual pero de signo contrario, con lo cual son dependientes, una vez elegido las variables en el motor de combustión quedan definidas las del generador.

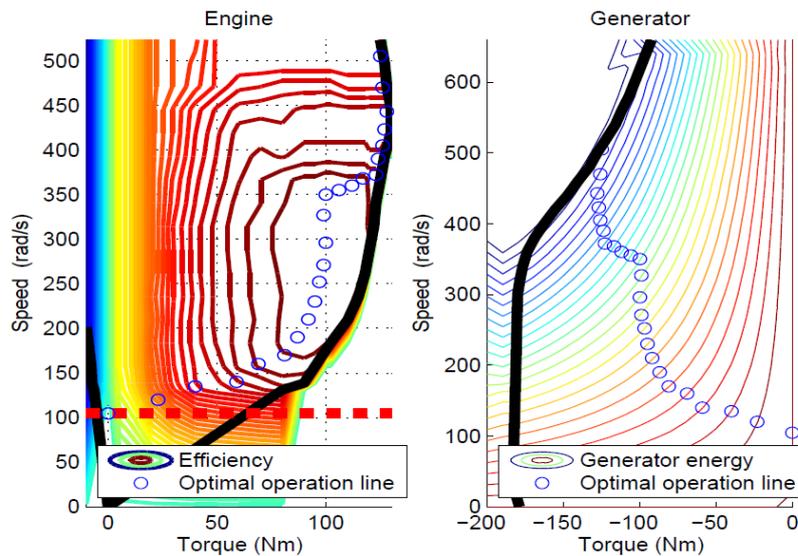


Figura 41: Ejemplo Modo 3

Para esta minimización se introduce en primer lugar una tabla con un conjunto de puntos que representa la línea que se observa en la figura. Posteriormente se elige el mejor de ellos, teniendo en cuenta que hay que minimizar la potencia dentro de los límites de la potencia de la batería.

Modo 4: En este modo todas las máquinas están conectadas, para dar la máxima potencia al vehículo. La idea es parecida a la del modo 3. Se debe minimizar el consumo de combustible (ecuación 43), teniendo en cuenta las restricciones de la potencia de la batería (ecuación 42).

$$P_{wheels} = P_{MOT} + P_{GEN} + P_{ENG} \quad (38)$$

$$\rho \cdot \omega_{ring} + \omega_{sun} = \omega_{sun} = \omega_{carrier} \cdot (\rho + 1) \quad (39)$$

$$T_{sun} = \frac{T_{carrier}}{(\rho+1)} = \frac{T_{ring}}{\rho} \rightarrow T_{sun} = T_{MOT} = \frac{T_{wheels}/R_d}{(\rho+1)} \rightarrow T_{GEN} = \rho \cdot T_{MOT} - T_{ENG} \quad (40)$$

$$\omega_{GEN} = \omega_{ENG} \quad (41)$$

$$P_{BATT} = P_{MOT} + P_{GEN} = T_{MOT} \cdot \omega_{MOT} + T_{GEN} \cdot \omega_{GEN} = T_{wh} \cdot \omega_{wh} - T_{ENG} \cdot \omega_{ENG} \quad (42)$$

$$combustible = \min \int_{t_i}^{t_f} \dot{m}_f (T_{ENG}, W_{ENG}) dt \quad (43)$$

Este modo se resuelve de manera idéntica al modo anterior. Se introduce una tabla con los puntos óptimos de funcionamiento del motor de combustión, los mismos que en caso anterior. Posteriormente se elige el punto que minimice el combustible teniendo en cuenta que la potencia de la batería debe estar entre los límites de funcionamiento.

## 5.5- Problema de optimización multiobjetivo

En esta sección, se va a realizar un MOP para la elección de la solución mejor para el sistema. Como ya se explicó en la sección 3: en primer lugar la definición del MOP; posteriormente una optimización simultánea de todos los objetivos para obtener un conjunto de soluciones Pareto-óptimas; y por último MCDM para seleccionar la solución que se implementará.

### 5.5.1- Definición del MOP

En el MOP, es importante determinar cuál es el concepto de diseño a implementar, cuales son los objetivos de diseño, y cuáles son las restricciones impuestas. Para realizar el planteamiento del problema multiobjetivo se deberán especificar las variables de decisión y los objetivos del mismo. Los objetivos del sistema de control de un vehículo híbrido, deberán relacionarse con las prestaciones del mismo, es decir, en relación al combustible utilizado y al SOC.

El objetivo principal del concurso es obtener las mejores prestaciones con una serie de pruebas realizadas al modelo. Estas pruebas son por un lado, una aceleración de 0 a 100 Km/h, de 70 Km/h a 120 Km/h y una aceleración durante 1000 metros, en las que se mide el tiempo empleado. Además se realiza un frenado de 100 Km/h en el que se mide la distancia necesaria para parar el vehículo. Por otro lado, se realizan ensayos largos en los que se simula un trayecto real de un vehículo, y en los que se mide las tres variables que se observan en las ecuaciones 46, 48-49. Estas variables miden la energía del combustible utilizado (*Fuel Energy*) y la energía eléctrica (*Electricity Energy*), que depende directamente del SOC, a mayor SOC menor energía eléctrica consumida. El combustible total se calcula utilizando el valor mínimo calorífico del combustible (LHV). La energía eléctrica se calcula mediante el modelo de la batería, que se encarga en un pequeño circuito equivalente compuesto por una fuente de tensión ( $V_{oc}$ ) y una resistencia en serie ( $R_b$ ), ambas son funciones del SOC ( $I_b$  es la corriente en la batería).

$$m_{fuel} = \int_0^T fuel \quad (44)$$

$$E_{ech} = V_{oc} \cdot I_b, \quad I_b = \frac{V_{oc}}{2 \cdot R_b} - \sqrt{\frac{V_{oc}^2 - 4 \cdot R_b \cdot P_b}{4 \cdot R_b^2}} \quad (45)$$

$$Fuel\ Energy = 1e - 6 \cdot m_{fuel} * LHV \quad (46)$$

$$Electricity\ Energy = 1e - 6 * E_{ech} \quad (47)$$

$$Total\ Energy = Fuel\ Energy + Electricity\ Energy \quad (48)$$

$$Total\ CO2_{Europe} = Fuel\ Energy * (12.5 + 73.4) + Electricity\ Energy * 94.7 \quad (49)$$

Con estas ecuaciones se ha considerado que las variables más importantes y de las que dependen las demás variables son *Fuel Energy* y *Electricity Energy*. Por lo tanto estas dos variables serán los objetivos a minimizar (ecuaciones 50-51).

$$J_1 = Fuel\ Energy = 1e - 6 \cdot m_{fuel} * LHV \quad (50)$$

$$J_2 = Electricity\ Energy = 1e - 6 * E_{ech} \quad (51)$$

Además de estos objetivos, es conocido que la vida útil de la batería es un factor importante para este tipo de vehículos. Con ello se conoce que un aumento de ciclos de carga y descarga acorta la vida de la batería. Con ello se ha estudiado la inclusión de objetivos con respecto a estos valores, ciclos de carga y descarga, pero finalmente se ha desestimado debido a que se producen los mismos ciclos en todos los ensayos similares realizados, y por lo tanto no afecta al sistema.

Por otro lado, también era posible la inclusión de objetivos con respecto al rendimiento del vehículo, es decir, como de rápido responde el vehículo ante las demandas del usuario. Pero estos objetivos se han descartado finalmente debido a que su valor no

cambia apenas en los ensayos realizados, y además ya se tienen en cuenta en los resultados del concurso, que se analizarán en la sección 5.7, mediante ensayos de aceleración y frenado brusco.

Como variables de decisión se han elegido los límites del SOC. Estas variables influyen en las transiciones entre modos de operación como se ha explicado en la sección 5.4. Unos valores umbrales bajos, provocarían que el combustible utilizado aumentase innecesariamente. En cambio unos valores altos, garantizarían que el combustible utilizado fuera bajo, pero a cambio pueden provocar que el vehículo no responda ante las demandas del usuario. Por lo tanto es necesario llegar a un compromiso entre ellos y los objetivos descritos posteriormente. Estas dos variables (ecuaciones 52-53) pueden suponer cambios considerables en los objetivos del sistema, y por lo tanto es muy importante definir su valor para un funcionamiento óptimo.

$$\theta_1 = SOC_{min} \quad (52)$$

$$\theta_2 = SOC_{max} \quad (53)$$

Este MOP se realizará para dos perfiles de velocidades diferentes, que simulan un trayecto real de un vehículo entre dos ciudades. Los dos ciclos de la vida real seleccionados se muestran en las figuras 42 a y b. El primer ciclo (figura 42 b) es un viaje registrado entre Arco y Merano, ciudades italianas de los Alpes, que abarca 157,7 kilómetros y que incluye severas variaciones de altitud que son visibles en la figura 43. El segundo ciclo (figura 43 a) es un trayecto real combinación de dos viajes registrados en la ciudad alemana de Aachen, un viaje urbano que abarca 16,2 kilómetros y un viaje mixto que abarca 28,4 kilómetros. La altitud se ha establecido en cero para todo el ciclo. Este se ha realizado con el fin de permitir el agotamiento total de la batería, para que a sí el HEV opere en los modos de vehículo eléctrico, el ciclo combinado. El ciclo Aachen se repite tres veces durante la simulación.

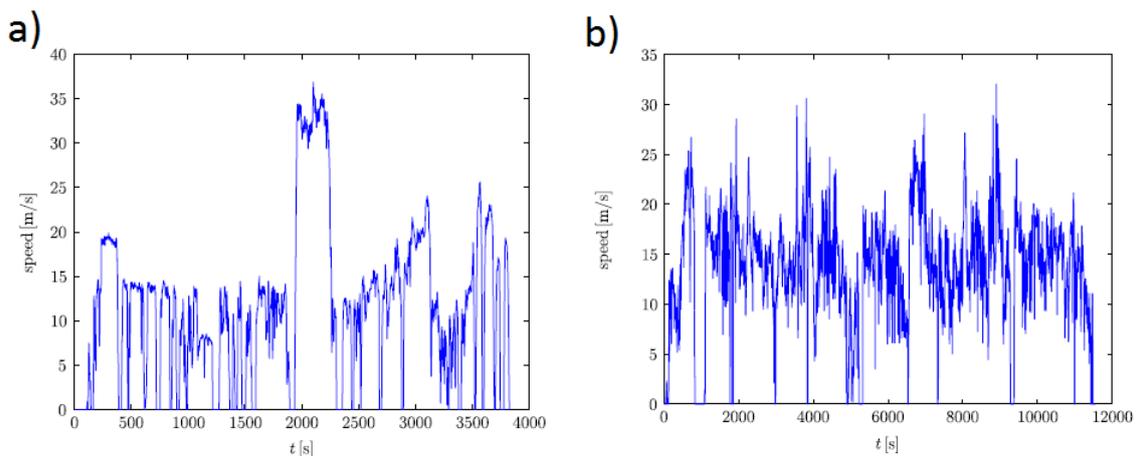


Figura 42: Perfiles de velocidades del segundo ciclo (a) y el primer ciclo (b)

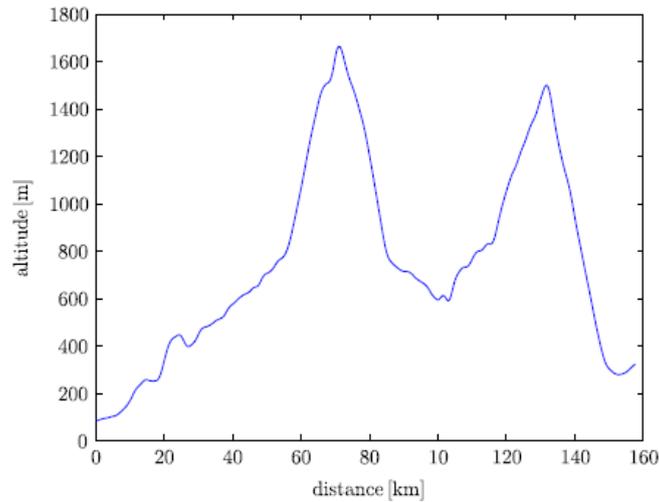


Figura 43: Perfil de altitud del primer ciclo.

### **5.5.2- Proceso de Optimización Multiobjetivo**

Para el proceso de optimización multiobjetivo se ha introducido un algoritmo evolutivo multiobjetivo, que proporciona la posibilidad de obtener, simultáneamente, un conjunto de soluciones óptimas en cada ejecución. El empleo de este tipo de algoritmos puede resultar beneficioso, ya que permite optimizar funciones de coste no-lineales, no-convexas y con restricciones. Este tipo de técnicas holística ha mostrado ser efectiva para abordar problemas de diseño complejos. En concreto en este proyecto se trabajará con el algoritmo evolutivo multiobjetivo SP-MODE, ya que ha mostrado buen desempeño y tiene código abierto. Además es fácil de interpretar para cualquier usuario ajeno a este tipo de algoritmos.

### **5.5.3- Proceso de selección y toma de decisiones multi-criterio**

En esta sección analizaremos como se ha realizado la elección de la mejor solución para cada uno de los dos ensayos largos descritos anteriormente.

En primer lugar se realizará el análisis de la solución escogida el ensayo inicial (A) en el que el vehículo circula en un trayecto real entre dos ciudades en el que hay una gran variación de altitud. Los resultados obtenidos por el algoritmo son los que se muestran en la figura 44. Para estos valores, la solución seleccionada es la que minimiza los objetivos propuestos en el concurso (ecuaciones 46, 48-49), ya que minimiza la suma de los dos objetivos propuestos en el sistema, *Fuel Energy* y *Electricity Energy*. Sin embargo, a continuación vamos a analizar los resultados obtenidos para dotar de mayor robustez al sistema, y comprobar si esta solución además de ser la mejor es también robusta.

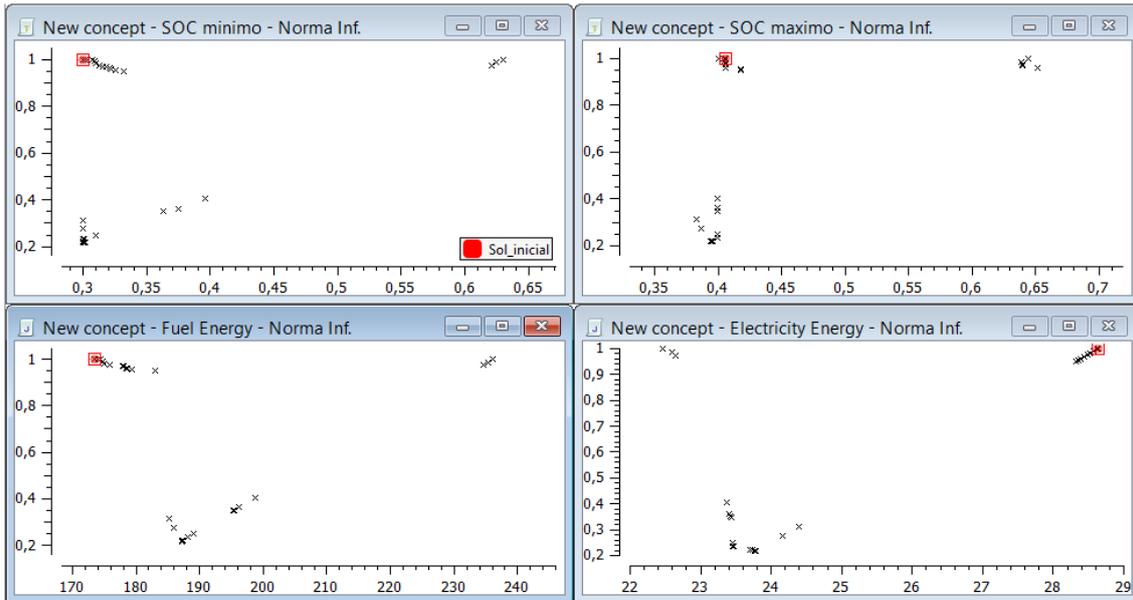


Figura 44: Resultados

En la figura 45 se observa cómo se pueden dividir las soluciones en tres zonas diferentes basándonos en la variable de decisión  $SOC_{min}$ . Se ha decidido basarse en esta variable porque con ella se separan claramente tres zonas bien diferenciadas en los objetivos de diseño. La zona que incluye la solución que minimiza el índice total se encuentra en la zona de color granate (zona 1). De estas zonas se puede descartar las soluciones de color amarillo, debido a su consumo elevado de combustible.

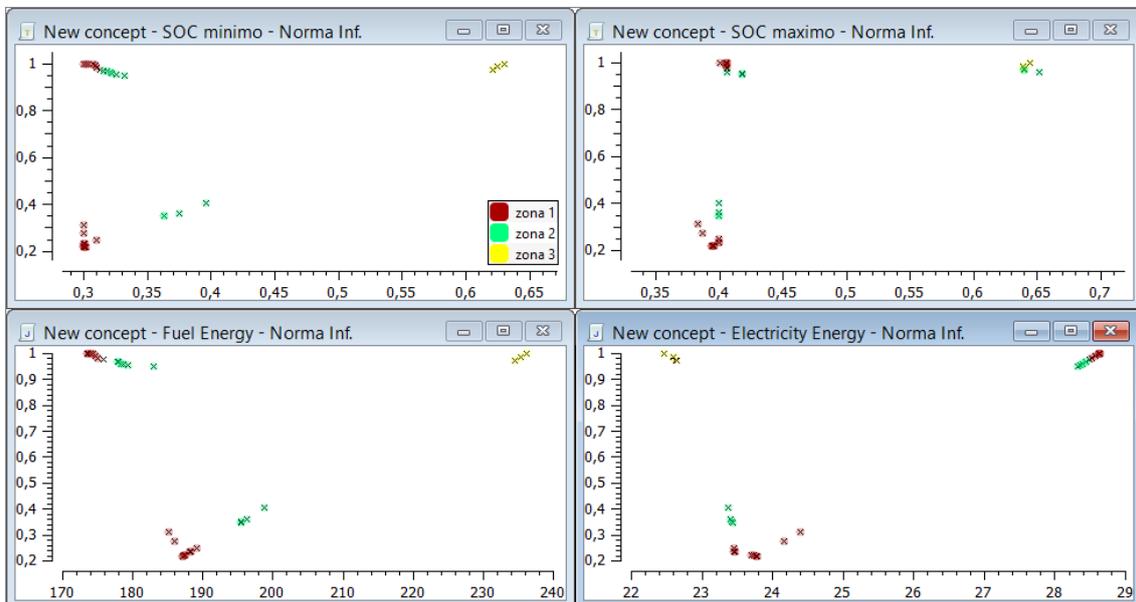


Figura 45: Resultados obtenidos divididos en diferentes zonas

En los resultados se observa como la solución escogida inicialmente es una solución robusta, ya que tiene soluciones cercanas en las que los objetivos difieren poco. Así ante pequeños cambios en las variables de decisión no debería haber grandes cambios en los

objetivos del sistema. Es por ello por lo que se decide elegir como solución a este ensayo la solución que se muestra en color rojo en la figura 46.

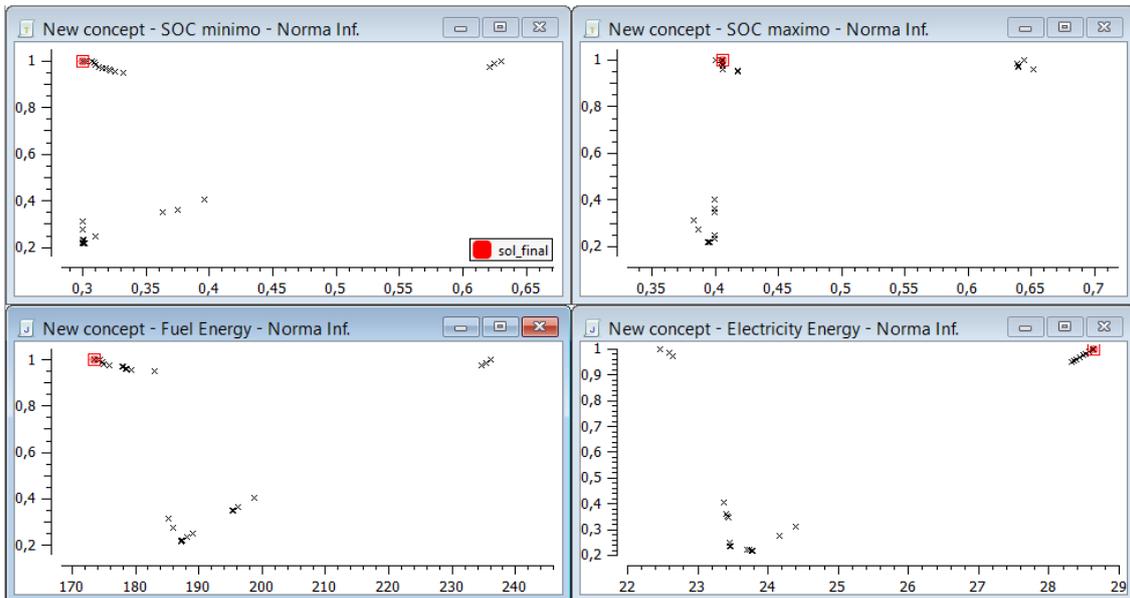


Figura 46: Solución escogida

En segundo lugar se realizará el análisis de la solución escogida para el segundo ensayo (B). Los resultados obtenidos por el algoritmo para este escalón son los que se muestran en la figura 47.

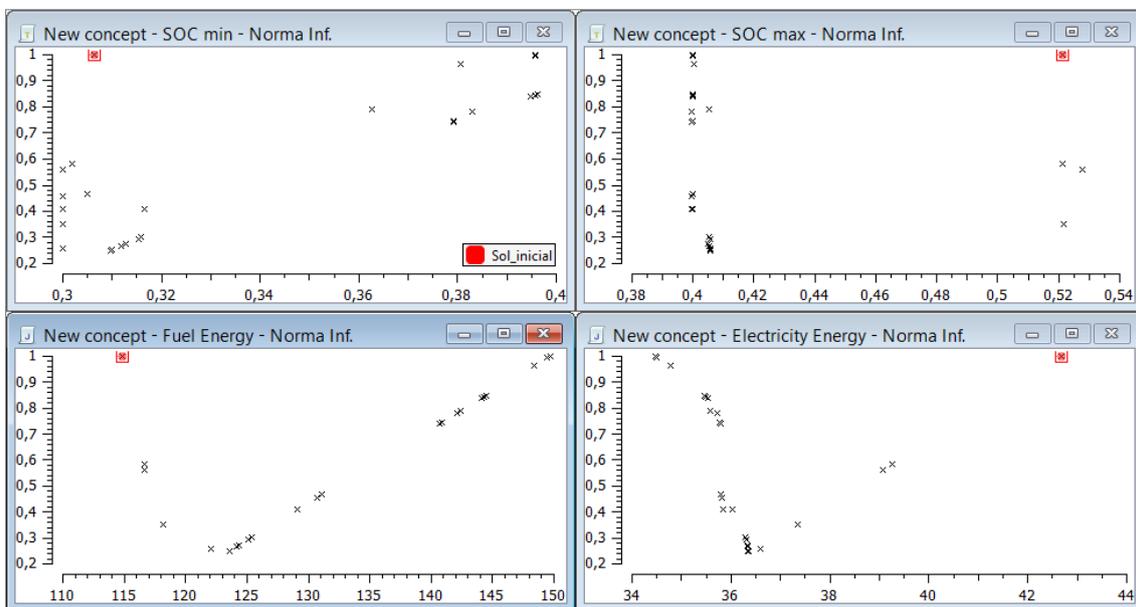


Figura 47: Resultados

En los resultados se observa en color rojo la solución que minimiza los objetivos propuestos por el concurso, que es la suma de los dos objetivos aproximadamente. En principio esta sería la solución óptima, pero a continuación vamos a analizar los

resultados obtenidos para dotar de mayor robustez al sistema. En la figura 48 se observa cómo se pueden dividir las soluciones en tres zonas diferentes basándonos en la variable de decisión  $SOC_{max}$ . Se ha decidido basarse en esta variable porque con ella se separan claramente cuatro zonas bien diferenciadas en los objetivos de diseño. La zona que incluye la solución que minimiza el índice total se encuentra en la zona de color azul (zona 1).

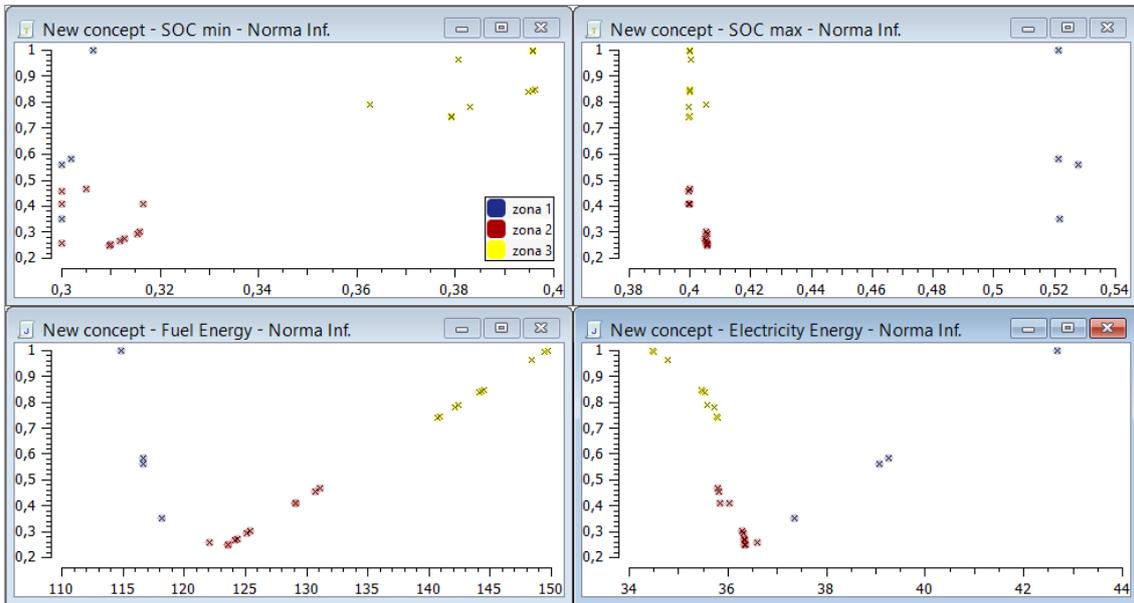


Figura 48: Resultados obtenidos divididos en diferentes zonas

Con ello, ahora elegimos la solución mejor para el sistema. Como se observa la solución elegida inicialmente no dispone de muchas soluciones a su alrededor, en la variable de decisión  $SOC_{max}$ .

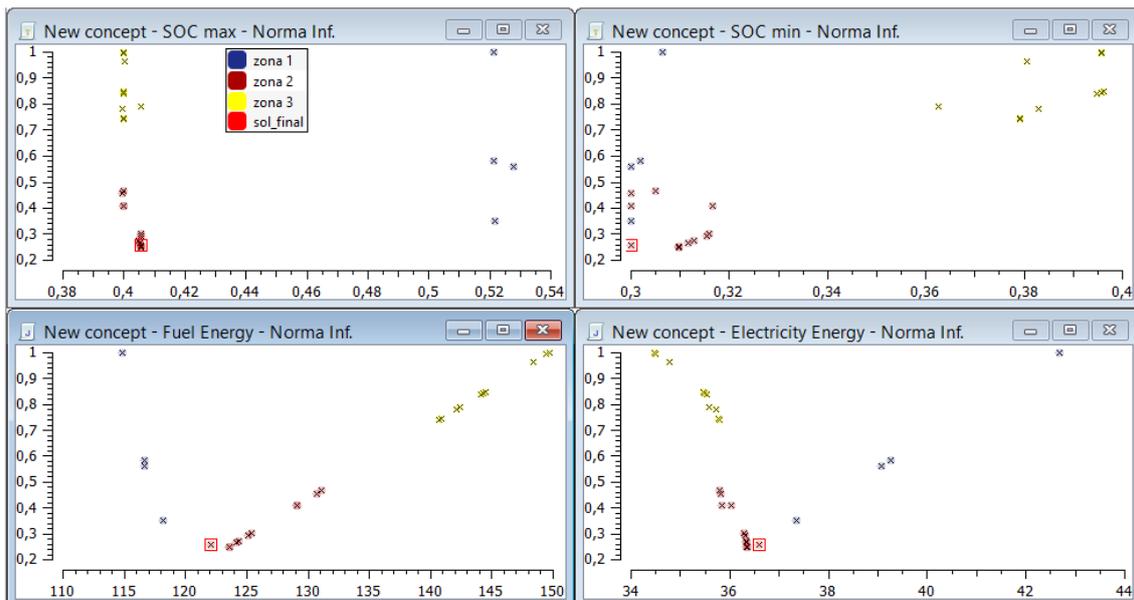


Figura 49: Solución escogida

Esto puede provocar que pequeños cambios en esa variable en la implementación real provoquen grandes cambios en la magnitud de los objetivos. Es por ello, por lo que se elige una solución de la zona 2, ya que consigue buenos resultados en ambos objetivos. Se trata de una solución que dispone de una gran cantidad de soluciones cercanas que obtienen resultados parecidos en cuanto a los objetivos del sistema. Además las variables de decisión son muy parecidas a la solución escogida para el perfil anteriormente analizado. Esta solución es la que se muestra en color rojo en la figura 49.

## 5.6- Evaluación de la Solución escogida

En esta sección se van a realizar todos los ensayos de los que consta el concurso. Empezando por los dos perfiles largos que se han analizado anteriormente y en los que se ha basado la solución escogida. Posteriormente se realizarán pruebas de aceleración de 0 a 100 Km/h, de 70 Km/h a 120 Km/h y una aceleración durante 1000 metros, en las que se mide el tiempo empleado. Además se realiza un frenado de 100 Km/h en el que se mide la distancia necesaria para parar el vehículo.

Para los perfiles largos, los resultados más importantes son el combustible utilizado y el SOC. En las figuras 50 y 51 se muestran estas variables respectivamente. Los tramos en los cuales el combustible no aumenta son debido a que no se encuentra encendido el motor de combustión. Se observan dos grandes subidas del SOC debidas a las bajadas de altitud que se producen en el trayecto (ver figura 43). Por otro lado las bajadas con más pendiente equivalen a las subidas que se producen en el perfil introducido, lo cual requiere un mayor esfuerzo del vehículo. En esta solución escogida se tiene las variables de decisión que se muestran en las ecuaciones 54 y 55.

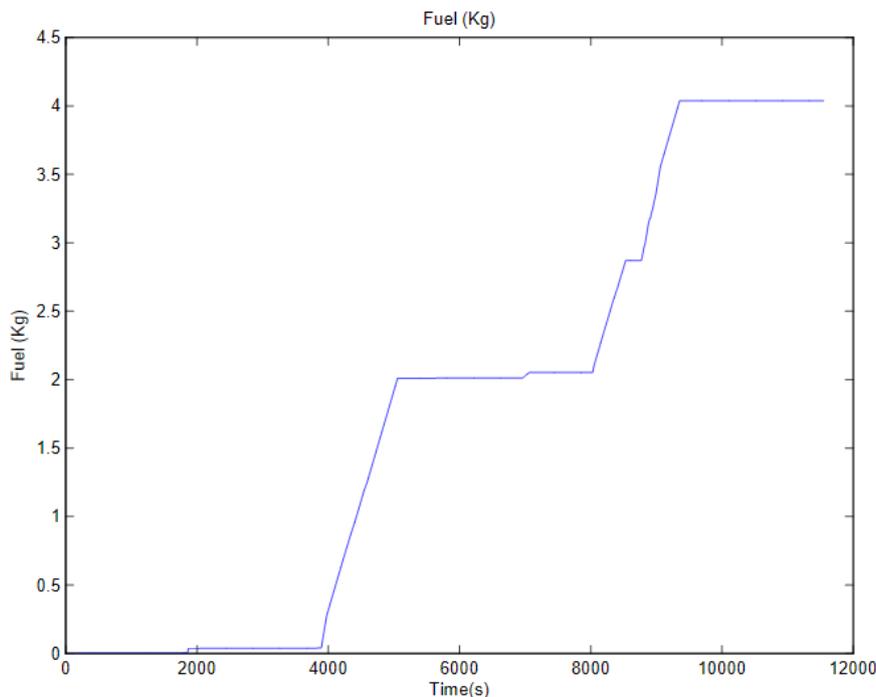


Figura 50: Combustible utilizado

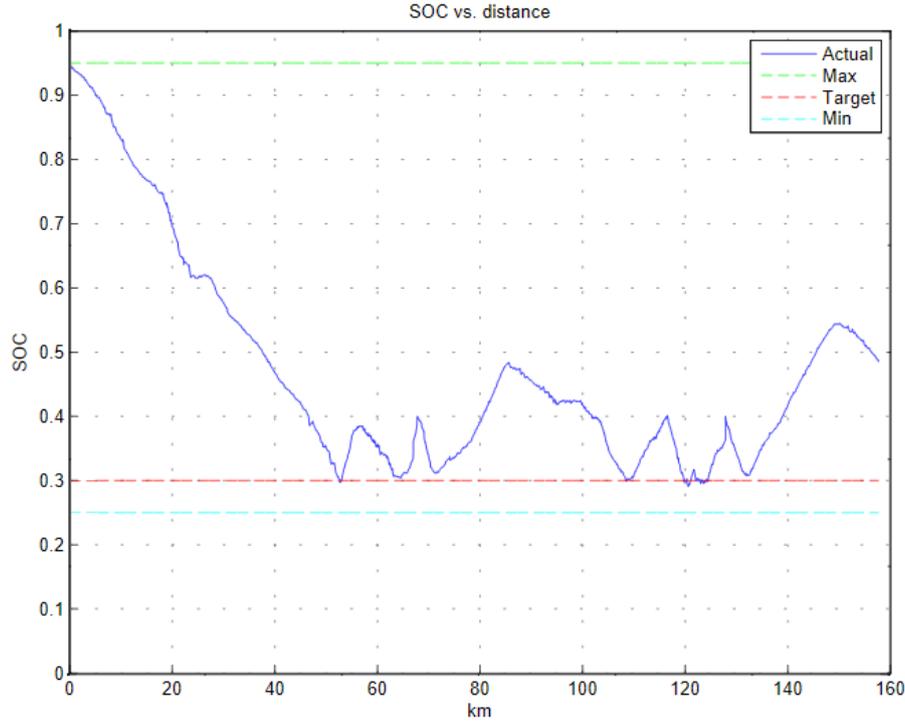


Figura 51: SOC

$$\theta_1 = SOC_{min} = 0,3 \quad (54)$$

$$\theta_2 = SOC_{max} = 0,4057 \quad (55)$$

De esta forma obtenemos los siguientes valores para los objetivos del concurso:

$$Fuel\ Energy = 173,576 \quad (56)$$

$$Electricity\ Energy = 28,630 \quad (57)$$

$$Total\ Energy = 202,206 \quad (58)$$

$$Total\ CO2_{Europe} = 17621,411 \quad (59)$$

En las figuras 52 y 53 se muestran estas variables para el ensayo B. Como se observa hay cuatro grandes zonas en las que el combustible aumenta considerablemente. Este trayecto es interurbano y sin desniveles de altitud, lo que hace difícil recargar la batería sin necesidad de encender el motor de combustión. El mayor combustible se utiliza en la parte final del trayecto, debido a que la batería ya no dispone de un nivel elevado para impulsar el vehículo por sí sola. Las variables de decisión de la solución escogida se muestran en las ecuaciones 60 y 61.

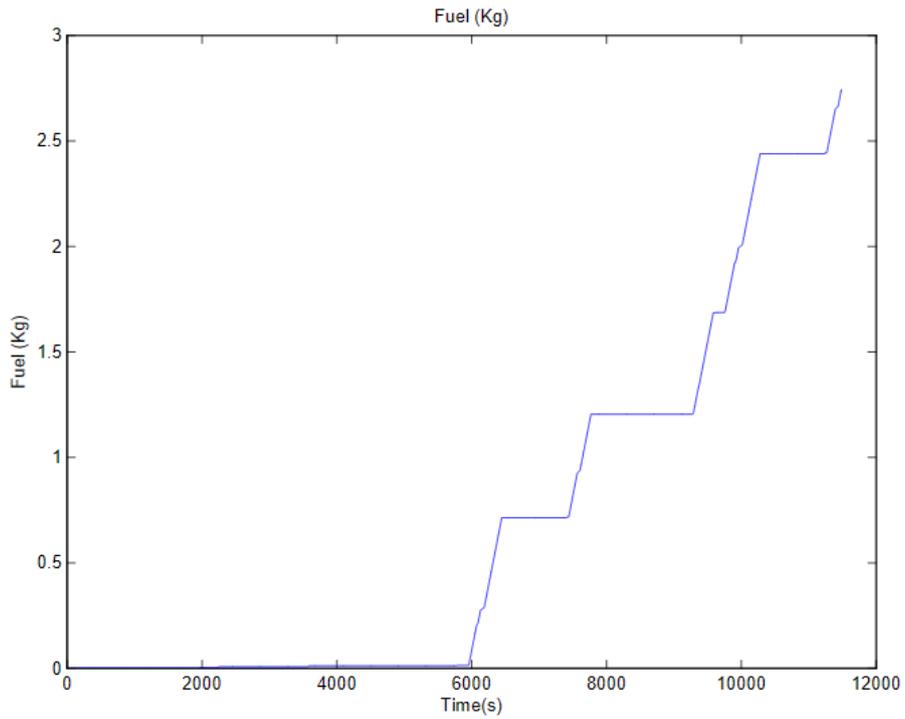


Figura 52: Combustible utilizado

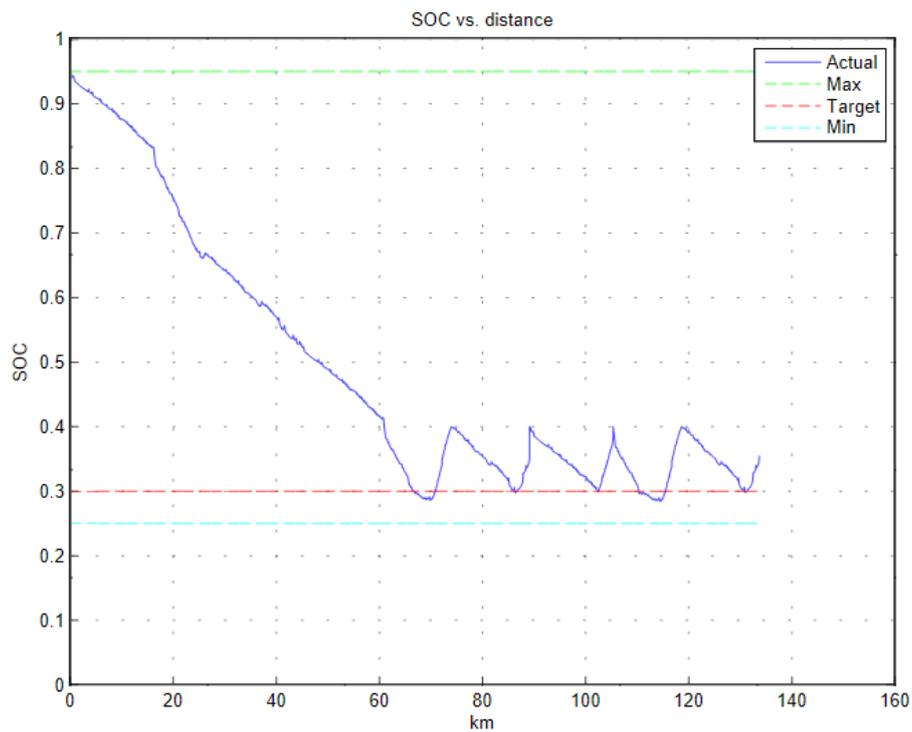


Figura 53: SOC

$$\theta_1 = SOC_{min} = 0.3 \quad (60)$$

$$\theta_2 = SOC_{max} = 0.406 \quad (61)$$

De esta forma obtenemos los siguientes valores para los objetivos del concurso:

$$\text{Fuel Energy} = 122,091 \quad (62)$$

$$\text{Electricity Energy} = 36,603 \quad (63)$$

$$\text{Total Energy} = 158,694 \quad (64)$$

$$\text{Total CO2}_{\text{Europe}} = 13953,921 \quad (65)$$

Para el resto de ensayo no influyen las variables de decisión elegidas, ya que son muy cortos, lo cual no permite evolucionar al sistema hasta alcanzar valores del SOC bajos. Sin embargo son útiles para simular circunstancias habituales en un vehículo, como aceleraciones o frenados bruscos. En estos perfiles, la variable más crítica es la potencia de la batería, ya que puede exceder los límites ante demandas muy bruscas si no se controla de manera correcta.

Para la aceleración de 0 a 100 Km/h obtenemos las figuras 54 y 55. En la primera figura se observa el tiempo que se tarda en conseguir el objetivo, 9 segundos. En la segunda se observa como la potencia de la batería no excede el límite superior. Esta potencia se encuentra muy cerca del límite debido a que el control tiende a llevarla hacia él, siempre y cuando esto permita consumir menos combustible. De esta manera, en este caso cuanto más cerca del límite este, mayor esfuerzo está haciendo la batería y con ello menor está haciendo el motor de combustión, consumiendo menor combustible.

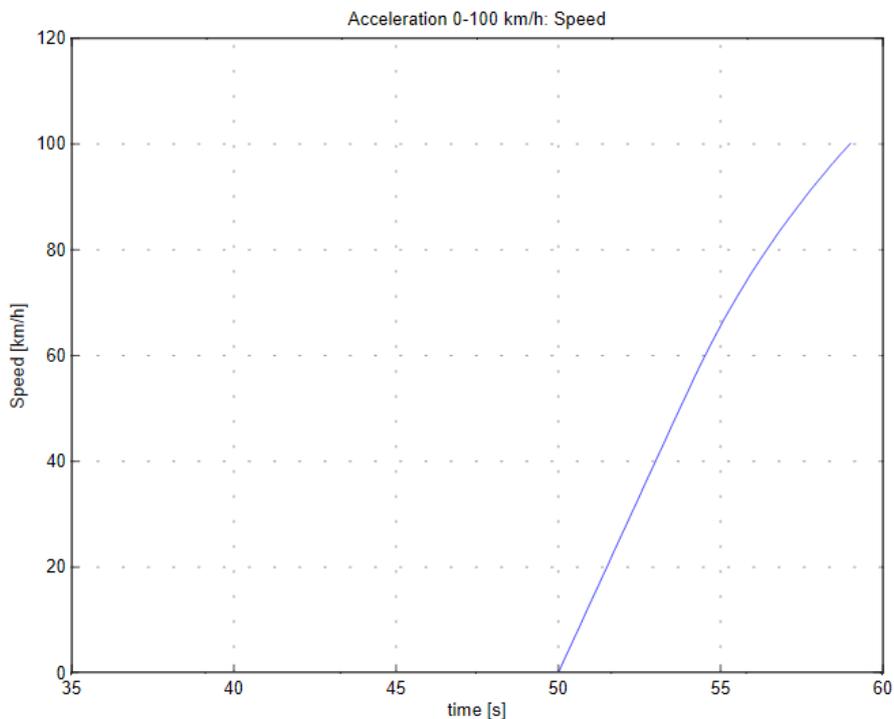


Figura 54: Aceleración

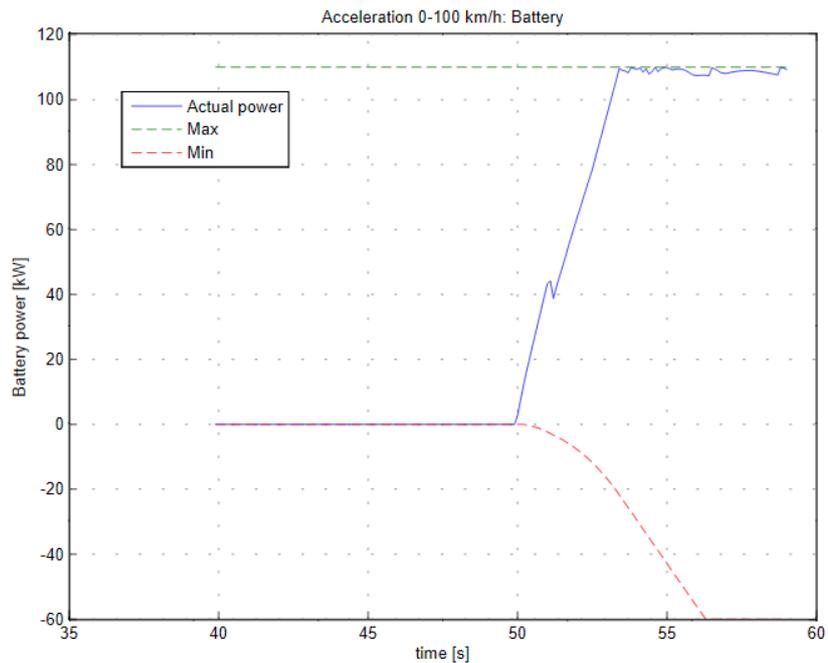


Figura 55: Potencia de la batería

De modo similar que en el caso anterior para la aceleración de 70 a 120 Km/h obtenemos las figuras 56 y 57. Este ensayo parte del vehículo con una velocidad de 70 Km/h, para posteriormente realizar la aceleración. En la primera figura se observa el tiempo que se tarda en conseguir el objetivo, 7,4 segundos. En la segunda se observa como la potencia de la batería no excede el límite superior. Esta potencia se encuentra muy cerca del límite como en el caso anterior, para con ello minimizar el combustible utilizado.

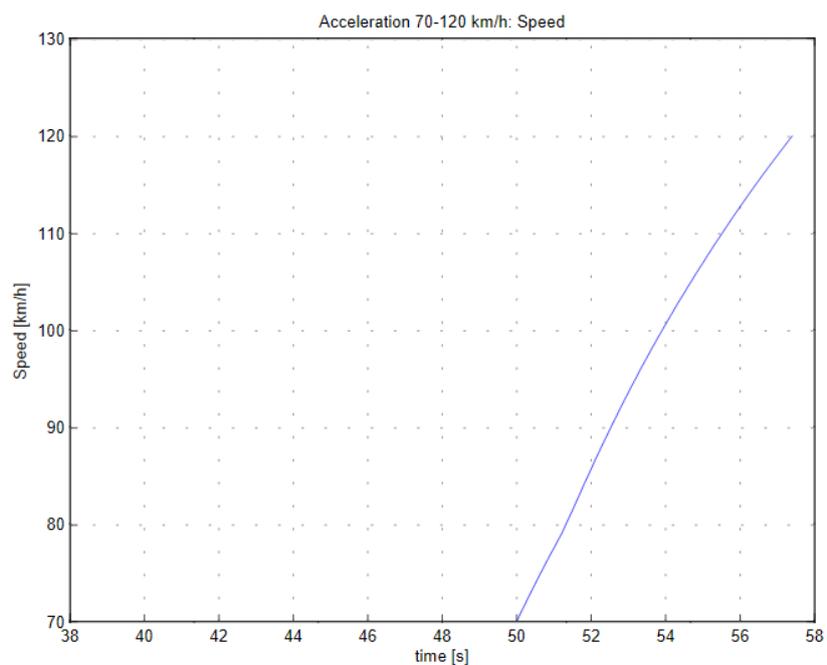


Figura 56: Aceleración

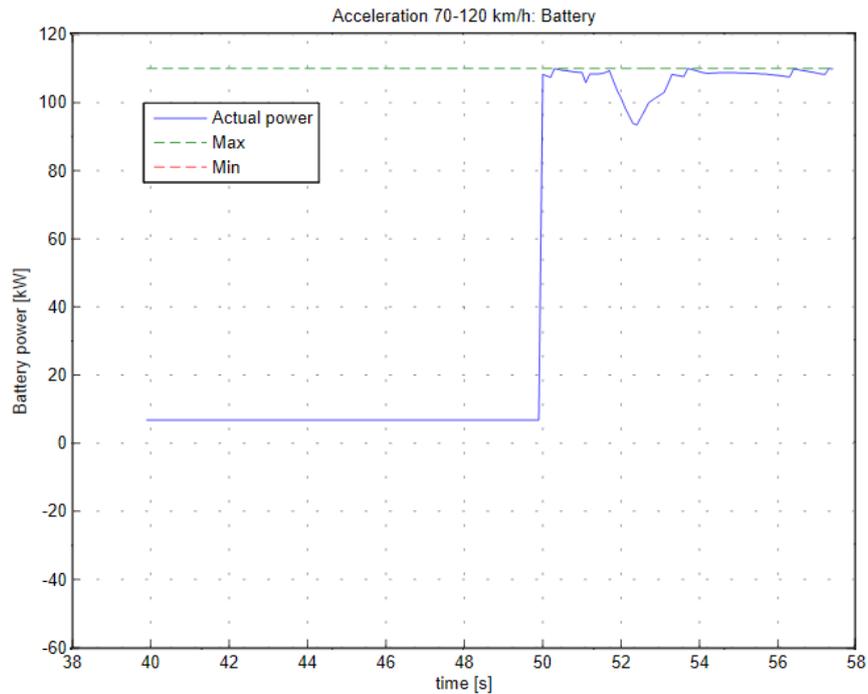


Figura 57: Potencia de la batería

De la misma forma se realiza la aceleración del ensayo siguiente. La diferencia en este ensayo es que la aceleración se mantiene hasta recorrer un kilómetro (ver figura 58), no hasta conseguir una determinada velocidad. Este ensayo parte del vehículo en reposo. En la primera figura se observa el tiempo que se tarda en conseguir el objetivo, 32,7 segundos. En la segunda se observa como la potencia de la batería no excede el límite superior (ver figura 59).

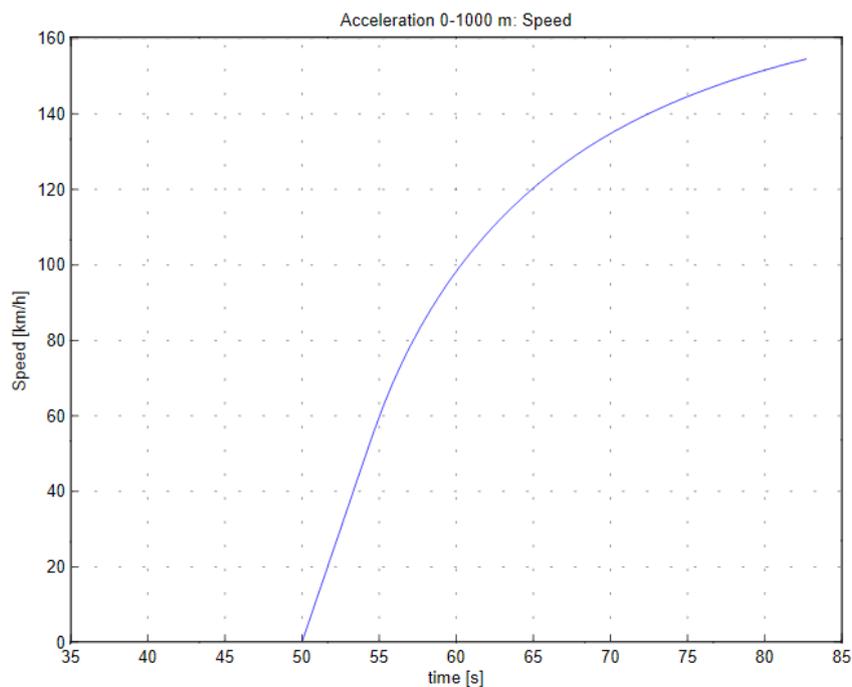


Figura 58: Aceleración

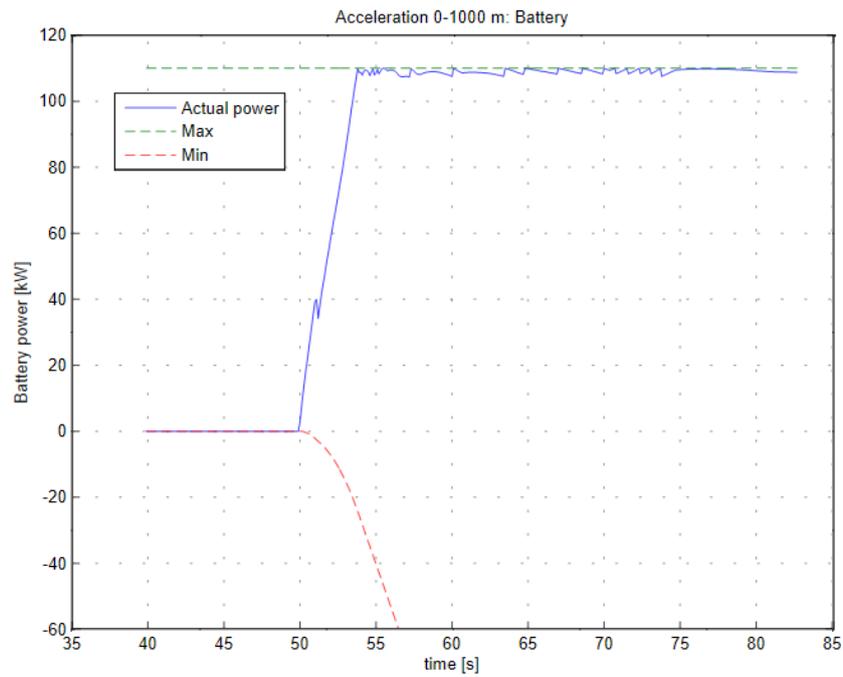


Figura 59: Potencia de la batería

En el último ensayo se realiza una prueba que simula una situación extrema del vehículo. En este caso se debe frenar el vehículo que circula a 100 Km/h, midiendo los metros en los que se tarda en conseguir. Este es un ensayo importante, ya que una correcta respuesta, podría evitar posibles accidentes en la vida real. El vehículo tarda 34,79 metros en frenar (ver figura 60), distancia notablemente inferior a la obtenida por el resto de participantes, como se detalla en la siguiente sección. Además se muestra la potencia de la batería en la figura 61.

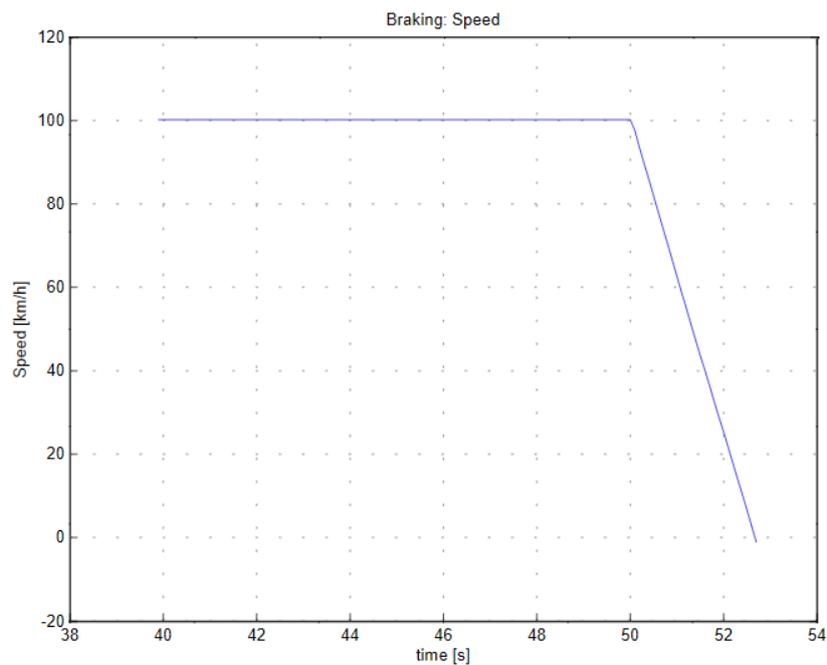


Figura 60: Deceleración

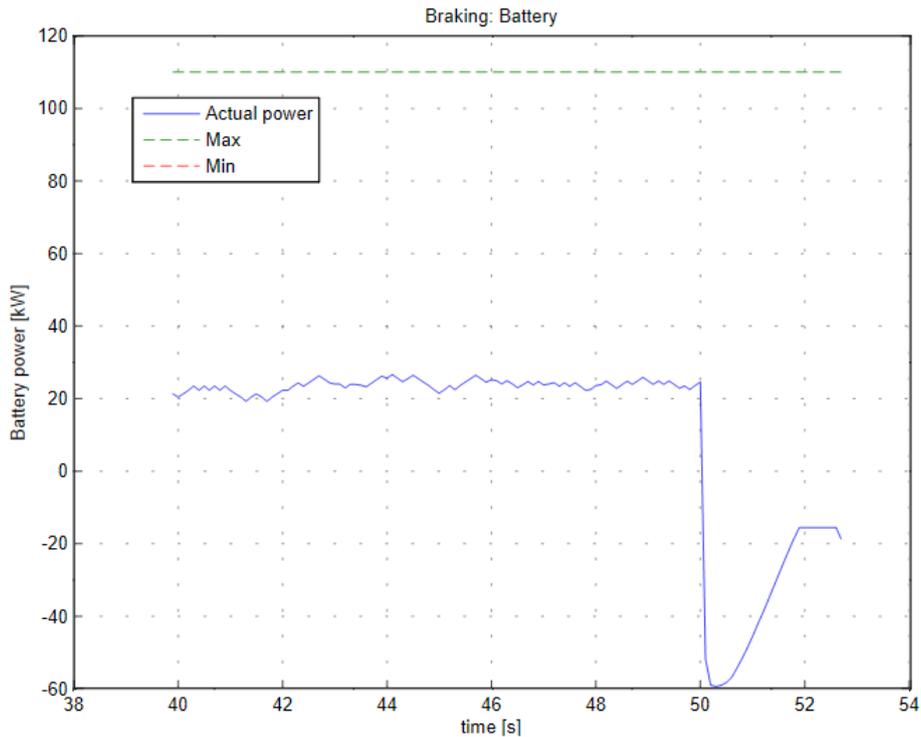


Figura 61: Potencia de la batería

## 5.7- Resultados

Comparando los resultados con los obtenidos por los participantes en el concurso realizado en 2012, este control obtendría la cuarta posición aproximadamente. Estos resultados constan de una serie de ensayos, cuyos resultados se han detallado en la sección anterior. El rendimiento de este control es similar al resto en la mayoría de ensayos, siendo en los dos perfiles largos en los que se produce mayor variación entre los participantes.

La primera tabla pertenece a los ensayos de aceleración (0 a 100 Km/h, 70 a 120 Km/h y 0 a 1000 m) y de frenado del vehículo que circula a 100 Km/h. Por último se mide la memoria y el procesador utilizado, que está directamente relacionado con el coste computacional del modelo. Los resultados obtenidos por este sistema son la fila que se observa de color naranja (S10) en la tabla 5, 6 y 8. En la fila inferior se muestra la media de los resultados obtenidos por los participantes.

La segunda tabla pertenece a los ensayos largos A y B, en los que se mide el consumo de combustible (FuelEnergy), el total de energía (TotalEnergy) y las emisiones a la atmósfera (CO2Europe), teniendo en cuenta la distancia recorrida. En la fila inferior también se muestra la media de todos los participantes.

Por último se muestran los resultados finales comparados con los diferentes participantes, en los que aparece el puesto de cada uno de ellos en el concurso. El resultado final se calcula teniendo en cuenta el porcentaje que se ha decidido dar a cada

ensayo por parte del concurso, que son los que se muestran en la tabla 7. Además en la tabla 8, se muestran los resultados finales. En ellos se observa como los resultados obtenidos son muy parecidos a los del concursante que quedo en la cuarta posición. Estos resultados primero calculan la media por kilómetro del combustible, energía y emisiones consumidas. El resultado final, se calculan utilizando la distancia a la media de cada uno de los resultados anteriores de cada participante. El concurso ha excluido de la media calculada los resultados que se encuentren muy lejos de los valores obtenidos por el resto de participantes, ya que dichos valores pueden afectar al cálculo final.

Tabla 5: Resultados 1

Equipos	sec	sec	sec	m	kB	sec
	Aceleración 0_100 Km/h	Aceleración 70_120 Km/h	Aceleración 0_1000 m	Frenado 100Km/h	Memoria Utilizada	Procesador Utilizado
S6	9,0	7,5	32,5	37,8	185628	7,91
S4	9,0	7,4	32,7	37,8	159500	7,89
S3	9,0	7,2	32,7	37,8	24224	37,6
S5	9,0	7,7	32,9	37,8	36196	5,94
S1	9,0	7,3	32,6	37,8	153524	7,25
S7	9,0	7,1	32,7	37,8	297940	88,29
S8	9,0	7,1	32,7	37,8	353420	198,35
S2	9,0	7,4	32,8	40,14	81340	6,14
S9	36,5	21,1	68,7	375,38	95060	162,04
S10	9,0	7,4	32,7	34,79	28680	45,00
Media	9,02	7,40	32,70	34,79	146716,89	44,93

Tabla 6: Resultados 2

Equipos	MJ	MJ	MJ	MJ	gCO2	gCO2	Km	Km
	Perfil A Fuel Energy	Perfil B Fuel Energy	Perfil A Total Energy	Perfil B Total Energy	Perfil A CO2 Eurpe	Perfil B CO2 Europe	Perfil A Distancia	Perfil B Distancia
S6	186,43	199,12	210,07	200,58	18252,64	17242,39	157,76	133,73
S4	172,88	110,94	195,24	146,55	16968,30	12901,69	157,75	133,72
S3	181,61	80,29	200,89	116,42	17426,51	10318,26	157,76	133,72
S5	182,50	94,56	202,11	127,95	17533,46	11258,04	157,76	133,72
S1	146,07	79,07	170,52	115,85	14862,55	10275,50	157,76	133,72
S7	155,46	81,35	177,09	117,50	15402,06	10411,38	157,75	133,72
S8	309,10	215,63	336,62	250,58	29158,02	21832,57	157,75	133,68
S2	162,21	97,96	186,21	134,55	16206,61	11879,95	157,76	133,72
S9	134,49	386,02	1384,79	423,63	119304,3	36720,59	55,14	133,77
S10	173,58	122,10	202,21	158,69	17621,41	13953,92	157,75	133,66
Media	168,33	108,97	191,73	140,76	16675,67	12371,31	157,76	133,71

Tabla 7: Porcentajes

Equipos	Ensayo	Porcentaje
Rendimiento (30%)	Aceleración 0 a 100 Km/h (s)	7,5
	Aceleración 70 a 120 Km/h (s)	7,5
	Aceleración 0 a 1000 m (s)	7,5
	Distancia de Frenado desde 100 Km/h (m)	7,5
Energía Consumida (50%)	Energía total (Total Energy) (MJ)	15
	Combustible consumido (Fuel Energy) (MJ)	20
	Emisiones del tubo de escape	0
	Emisiones CO2 (kg)	15
Rendimiento Computacional (20%)	Procesador utilizado (s)	10
	Memoria utilizada (kB)	10

Tabla 8: Resultados Finales

Equipos	MJ/Km	MJ/Km	gCO2/Km	Resultado	Posición
	Fuel Energy	Total Energy	Total CO2		
S6	1,32	1,41	121,77	1,09	6
S4	0,97	1,17	102,48	0,94	4
S3	0,90	1,09	95,19	0,87	3
S5	1,32	1,41	121,77	0,99	5
S1	0,77	0,98	86,24	0,84	1
S7	0,81	1,01	88,56	1,13	7
S8	1,80	2,01	174,97	1,89	8
S2	0,89	1,10	96,36	0,85	2
S9	2,76	9,57	825,93	4,93	9
<b>S10</b>	<b>0,99</b>	<b>1,22</b>	<b>107,00</b>	<b>0,94</b>	<b>4</b>
Media	0,95	1,14	99,66		

## 6.- CONCLUSIÓN Y TRABAJOS FUTUROS

Se ha diseñado esquemas de control del tipo RTO empleando técnicas de optimización multiobjetivo. El concepto RTO se ha extendido rápidamente en la industria, y construye un nivel superior del sistema de control que se encarga de calcular las referencias óptimas en cada instante. Este proceso se puede realizar en línea o fuera de ella. Con esta capa se proporciona al sistema de control inferior un punto óptimo que consiga minimizar los objetivos en ese instante. Esta optimización en tiempo real puede ser utilizada para mejorar el rendimiento del sistema. De esta forma se puede informar o realizar cambios sobre el sistema dependiendo del instante en el que se encuentre. El objetivo de este proyecto ha sido incluir un RTO para mejorar el rendimiento del sistema, basándose en técnicas de optimización multiobjetivo, dado que convergen múltiples objetivos de diseño.

En primer lugar se ha realizado un control de la planta de cuatro tanques, en la que el presente proyecto ha sido enviado a un concurso de ingeniería de control 2014, obteniendo el tercer puesto, como primer acercamiento a este tipo de técnicas. El segundo proceso se trata del EMS de un HEV. Para poder evaluar los resultados de una forma más real, se han comparado con los resultados obtenidos por un concurso realizado en el 2012, en los que se alcanzaría la cuarta posición aproximadamente.

Para el desarrollo del esquema de control RTO en los casos anteriores, ha sido necesario seguir una metodología integral de las técnicas de optimización multiobjetivo. Lo anterior se logra mediante tres pasos fundamentales: definición del problema (objetivos y variables de decisión), realizar el proceso de optimización multiobjetivo y por último realizar el análisis multi-criterio en el proceso de selección. Es en la última etapa en la que el diseñador cobra mayor importancia. Usualmente no es posible encontrar una solución que optimice todos los objetivos de diseño, con lo que la solución final se deberá seleccionar de un conjunto de soluciones óptimas. Para este cometido se empleó un visualizador (LD), que ayuda al diseñador a determinar la solución de compromiso entre las soluciones óptimas, para alcanzar la solución más idónea a cada caso. En lo que se refiere a mejoras y trabajos futuros, se propone la implementación del esquema multiobjetivo dentro del marco RTO on-line, ya que esto podría proporcionar más ventajas al rendimiento del sistema. Esto implicará el desarrollo de algoritmos más eficientes (desde el punto de vista de coste computacional) y automatizar la etapa de selección.

Respecto al control del EMS, se propone plantear nuevos objetivos e indicadores, como las prestaciones del vehículo ante las demandas del usuario o buscar indicadores relacionados con la vida útil de la batería. Un mal uso del vehículo puede acortar considerablemente la vida útil de la batería lo que sería un contratiempo importante. Además, en lo que se refiere a variables de decisión, es importante buscar nuevas variables para este cometido que permitan mayor flexibilidad y que resulten más

adecuados al problema. También es posible realizar el control conociendo información del trayecto a realizar, como se ha realizado por la mayor parte de los participantes del concurso con el que se comparan los resultados del presente trabajo. En este proyecto se ha descartado esta opción por no considerarla una solución real, ya que en la mayoría de casos no es posible conocer la duración del trayecto antes de llevarlo a cabo.

## 7. - BIBLIOGRAFÍA

- [1] Reynosa-Meza, G., Blasco, X., Sanchis, J., Martínez, M.-. Algoritmos evolutivos y su empleo en el ajuste de controladores del tipo PID: Estado actual y perspectivas. Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial – Aceptado.
- [2] Singh, A., Forbes, J. F., Vermeer, P. J., & Woo, S. S. (2000). Model-based real-time optimization of automotive gasoline blending operations. *Journal of Process Control*, 10(1), 43-58.
- [3] Johansson, K. H. (2000). The quadruple-tank process: A multivariable laboratory process with an adjustable zero. *Control Systems Technology, IEEE Transactions on*, 8(3), 456-465.
- [4] Lai, J.-S., Nelson, D. J.-. Energy Management Power Converters in Hybrid Electric and Fuel Cell Vehicles. Proceedings of the IEEE (Volume: 95, Issue: 4) 2007.
- [5] C. C. Chan, “The state of the art of electric and hybrid vehicles,” Proc. IEEE, vol. 90, n°.20, pp. 247-275, Feb. 2002.
- [6] Grebe, U. D., & Nitz, L. T. (2011). Voltec–The Propulsion System for Chevrolet Volt and Opel Ampera. *ATZautotechnology*, 11(2), 28-35.
- [7] Marler, R., Arora, J., 2004. Survey of multi-objective optimization methods for engineering. *Structural and multidisciplinary optimization* (26), 369-395.
- [8] DAS, S., Suganthan, P. N., 2010. Differential evolution: A survey of the state-of-the-art. *Evolutionary Computation, IEEE Transactions on*.
- [9] Storn, R., Price, K., 1997. Differential evolution: A simple and efficient heuristic for global optimization over continuous spaces. *Journal of Global Optimization* 11, 341-359.
- [10] Reynoso-Meza, G., Sanchis, J., Blasco, X., Martínez, M., 2010b. Multiobjective design of continuous controllers using differential evolution and spherical pruning. In: Chio, C. D., Cagnoni, S., Cotta, C., Eber, M., Ekárt, A., I.Esparcia-Alcaráz, A., Goh, C.-K., J.Merelo, J., Neri, F., Preuss, M., Togelius, J., N.Yannakakis, G. (Eds.), *Applications of Evolutionary Computation, Part I. Vol. LNCS 6024. Springer-Verlag*, pp. 532 – 541.
- [11] Lotov, A., Miettinen, K., 2008. Visualizing the Pareto frontier. In: Branke, J., Deb, K., Miettinen, K., Slowinski, R. (Eds.), *Multiobjective Optimization. Vol. 5252 of Lecture Notes in Computer Science. Springer Berlin / Heidelberg*, pp. 213-243.
- [12] Blasco, X., Herrero, J., Martínez, M., 2008. A new graphical visualization of n-dimensional Pareto front for decision-making in multiobjective optimization. *Information Sciences* 178 (20), 3908-3924.
- [13] Limón, D., Alvarado, I., Álamo, T., Pereira, M., 2014. Concurso en Ingeniería de Control 2014. Operación óptima de la planta de 4 tanques. Benchmark 2013-14. Comité Español de Automática.
- [14] Miettinen, K. M., 1998. *Nonlinear multiobjective optimization. Kluwer Academic Publishers.*

- [15] García-Nieto, S., Reynoso-Meza, G., 2012. Control autónomo del seguimiento de trayectorias de un vehículo cuatrirrotor. Simulación y evaluación de propuestas. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial* 9 (2012) 194–199.
- [16] Coello Coello, C., feb. 2006. Evolutionary multi-objective optimization: a historical view of the field. *Computational Intelligence Magazine, IEEE* 1 (1), 28-36.
- [17] Clarke, D. W., Mohtadi, C., & Tuffs, P. S. (1987). Generalized predictive control—Part I. The basic algorithm. *Automatica*, 23(2), 137-148.
- [18] Sanchis, J., Martínez, M., Blasco, X., & Senent, J. (1997). Experimentación en control predictivo basado en modelos. práctica para la enseñanza de controladores predictivos generalizados (GPCS) en la ETSII Depto. *De Ingeniería de Sistemas, Computadores y Automática. Universidad Politécnica de Valencia. Camino de Vera s,* (46071).
- [19] Gill, P. E., Murray, W., & Saunders, M. A. (2002). SNOPT: An SQP algorithm for large-scale constrained optimization. *SIAM journal on optimization*, 12(4), 979-1006.
- [20] *Air quality guidelines for Europe, 2nd ed. Copenhagen, World Health Organization Regional Office for Europe, 2000 (WHO Regional Publications, European Series, No. 91).*
- [21] Feng, AN., Santini Danilo, J.-. Mass impacts on fuel economies of conventional vs. hybrid electric vehicles. Argonne National Laboratory, France 2004.
- [22] Husain, I.-. *Electric and Hybrid Vehicles: Design Fundamentals, Second Edition.*
- [23] J. M. Miller, “Propulsion systems for hybrid vehicles,” IEE Power and Energy Series, 2004.
- [24] Brooke, L. (2011). Chevrolet Volt--Development Story of the Pioneering Electrified Vehicle. *Training, 2014*, 11-24.
- [25] Sciarretta, A., Serrao, L., Dewangan, P. C., Tona, P., Bergshoeff, E. N. D., Bordons, C., ... & Wu, M. (2014). A control benchmark on the energy management of a plug-in hybrid electric vehicle. *Control Engineering Practice*.
- [26] Piller, S., Perrin, M., & Jossen, A. (2001). Methods for state-of-charge determination and their applications. *Journal of power sources*, 96(1), 113-120.
- [27] Efficiency, E., & Energy, R. (2006). Evaluation of 2004 Toyota Prius hybrid electric drive system.
- [28] Berdichevsky, G., Kelty, K., Straubel, J. B., & Toomre, E. (2006). The tesla roadster battery system. *Tesla Motors Inc.*
- [29] Tribioli, L., & Onori, S. (2013, June). Analysis of energy management strategies in plug-in hybrid electric vehicles: Application to the GM Chevrolet Volt. In *American Control Conference (ACC), 2013* (pp. 5966-5971). IEEE.
- [30] Zhang, X., Li, C. T., Kum, D., & Peng, H. (2012). and: Configuration Analysis of Power-Split Hybrid Vehicles With a Single Planetary Gear. *Vehicular Technology, IEEE Transactions on*, 61(8), 3544-3552.
- [31] Marcos, D., & Bordons, C. (2012, October). Power Management of a Plug-In Hybrid Electric Vehicle Based on Cycle Energy Estimation. In *Engine and Powertrain Control, Simulation and Modeling* (Vol. 3, No. 1, pp. 363-370).