

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA  
VALPARAÍSO – CHILE



“DESARROLLO DE UN MÉTODO PARA LA  
ESTIMACIÓN DEL HIDRÓGENO INYECTADO  
EN UN MOTOR DIESEL OPERANDO EN MODO  
DUAL”

BRYAN KARL AEDO ZUCHEL

MEMORIA DE TITULACIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO DE:  
INGENIERO CIVIL MECÁNICO

PROFESOR GUÍA: DR. GERMÁN AMADOR DÍAZ  
PROFESOR CORREFERENTE: DR. MAURICIO OSSES ALVARADO

AGOSTO - 2023

## **Agradecimientos**

En primer lugar, quiero agradecer a mi padres, Nathalie y Francisco, que estuvieron conmigo desde pequeño dándome todo su apoyo en lo que me proponía y el deseo de realizar mi etapa universitaria lejos de mi ciudad natal, no fue la excepción. Sin ustedes no sería la persona que soy ahora. Darle las gracias en general a toda mi familia que siempre estuvieron entregándome sus buenos deseos y brindando una mano en todo lo que estuviera a su alcance.

En la universidad me encontré con una segunda familia, donde siempre estuvimos uno al lado del otro durante todo este largo camino, en el estudio, en las fiestas, en el deporte o simplemente en la vida cotidiana. Gracias a Martín, Salvador, Renato, Eduardo, Marko, Vicente, Deborah, Katalina, Valentina, que esta amistad dure para siempre.

Gracias a mi hermanito Ian que me daba siempre esa cuota de alegría, quizás sin saberlo, que me hacía salir del estrés de los estudios.

Agradecer a Francisca que me entregó todo su amor en los últimos años de universidad y estuvo a mi lado durante todo este último proceso.

A todos ustedes los amo un montón y simplemente gracias.

Finalmente, gracias a mi profesor guía Germán Amador, por confiar en mí y haber aportado a mi formación como profesional y a la realización de este trabajo.

## Resumen

Este trabajo se lleva a cabo dentro del contexto mundial por la búsqueda de alternativas a los combustibles fósiles tradicionales y lograr dar paso a combustibles amigables con el medio ambiente, sin dejar de lado la gran cantidad de motores de combustión interna que existen en el mundo.

El presente se desarrolla bajo el marco del proyecto interno multidisciplinario PIM 109 titulado “Detección no invasiva de combustión anormal en un motor de combustión interna operando en modo dual con hidrógeno bajo condiciones dinámicas”, siendo el objetivo general el desarrollar un método para la estimación del hidrógeno inyectado en un motor diesel operando en modo dual. Para esto se realizó un estado del arte sobre los métodos ya existentes, no encontrando métodos que trabajen para la predicción específica de hidrógeno inyectado en un motor diesel, pero si cinco opciones para la predicción de diesel en el motor a partir de sus emisiones.

Se realizaron ciclos de conducción a una camioneta Mitsubishi L200 (operando en modo dual), midiendo las emisiones de dióxido de carbono, monóxido de carbono, hidrocarburos no quemados, flujo másico de gases de escape y humedad relativa del aire. De manera adicional, se realizó un análisis elemental del diesel utilizado. Con estos datos se puso a prueba el desempeño de las cinco metodologías que predicen la masa de diesel, obteniendo que la metodología proveniente del Reglamento de la Unión Europea y la correspondiente al libro “Internal Combustion Engine Fundamental” basada en carbono, tienen mejor desempeño con un 1.72% y 1.81% de error, respectivamente.

El método diseñado en este trabajo consta de un balance de masa, donde se establece que la masa de hidrógeno que ingresa al motor debe ser igual a la masa de hidrógeno que sale del motor. Para esto se determina la fórmula química de un combustible equivalente, que corresponde a la suma de diesel e hidrógeno inyectado, donde el subíndice del hidrógeno en esta “molécula equivalente” es la única incógnita para lograr el balance de masa. Finalmente, con el balance de masa logrado a partir de la correcta “molécula equivalente”, se obtiene la masa de hidrógeno inyectado en el motor.

El método diseñado tiene cuatro variaciones, que se pueden agrupar en dos, el primero donde se utiliza la “molécula equivalente” para todos los cálculos dentro del método y en el segundo grupo la molécula del diesel, a excepción del cálculo de emisión de agua que se realiza como el primer grupo.

Los resultados obtenidos al poner la metodología diseñada a prueba en ciclos de conducción con 2%, 9% y 13% de sustitución energética de hidrógeno son prometedores, logrando predecir de manera precisa la masa de hidrógeno inyectada en el motor a partir de una correcta “molécula equivalente”, sin embargo, el método carece de una forma sistemática de determinarla.

## Abstract

This work is carried out within the global context of the search for alternatives to traditional fossil fuels and the transition to environmentally friendly fuels, while considering the large number of internal combustion engines worldwide. This study is conducted under the framework of the multidisciplinary internal project PIM 109 titled "Non-invasive Detection of Abnormal Combustion in a Dual-Mode Internal Combustion Engine Operating with Hydrogen under Dynamic Conditions." The general objective is to develop a method for estimating the injected hydrogen in a diesel engine operating in dual mode. To achieve this, a state-of-the-art review of existing methods was conducted, but no methods specifically predicting injected hydrogen in a diesel engine were found. However, five options for predicting diesel fuel in the engine based on engine emissions were identified.

Driving cycles were performed on a Mitsubishi L200 truck, measuring carbon dioxide, carbon monoxide, unburned hydrocarbons, exhaust gas mass flow rate, and relative air humidity emissions. Additionally, an elemental analysis of the diesel fuel used was conducted. With this data, the performance of the five methodologies predicting diesel mass was tested, revealing that the methodology derived from the European Union Regulation and the one based on carbon from the book "Internal Combustion Engine Fundamental" performed better with errors of 1.72% and 1.81%, respectively.

The method designed in this study consists of a mass balance equation, where the mass of hydrogen entering the engine must be equal to the mass of hydrogen leaving the engine. To achieve this, the chemical formula of an equivalent fuel is determined, which corresponds to the sum of diesel and injected hydrogen. The subscript of hydrogen in this "equivalent molecule" is the only unknown in order to achieve the mass balance. Finally, with the mass balance achieved using the correct "equivalent molecule," the mass of hydrogen injected into the engine is obtained.

The designed method has four variations, which can be grouped into two categories. The first category uses the "equivalent molecule" for all calculations within the method, while the second category uses the diesel molecule for calculations, except for the water emission calculation.

The results obtained when testing the designed methodology on driving cycles with 2%, 7%, and 11% energy substitution of hydrogen are promising, accurately predicting the mass of hydrogen injected into the engine based on the correct "equivalent molecule." However, the method lacks a systematic way of determining this "equivalent molecule."

## Glosario

|                            |                                                                    |
|----------------------------|--------------------------------------------------------------------|
| $\left(\frac{A}{F}\right)$ | Relación aire-combustible                                          |
| $\dot{m}$                  | Flujo másico [kg/s]                                                |
| $\emptyset$                | Relación entre relación de combustible-aire real y estequiométrico |
| $\lambda$                  | Relación entre relación de aire-combustible real y estequiométrico |
| $\tilde{x}_x$              | Fracción molar en base húmeda de “x” [%]                           |
| $x_x$                      | Fracción molar en base seca de “x” [%]                             |
| $PM_x$                     | Peso molecular de “x”                                              |
| $H_2$                      | Hidrógeno molecular                                                |
| $O_2$                      | Oxígeno molecular                                                  |
| $H_2O$                     | Agua                                                               |
| $CO$                       | Monóxido de carbono                                                |
| $CO_2$                     | Dióxido de carbono                                                 |
| $N_2$                      | Nitrógeno molecular                                                |
| $NO_x$                     | Óxido de nitrógeno                                                 |
| $NO$                       | Monóxido de nitrógeno                                              |
| $NO_2$                     | Dióxido de nitrógeno                                               |
| $HC$                       | Hidrocarburos no quemados                                          |
| $CH_4$                     | Metano                                                             |
| $Ar$                       | Argón                                                              |
| $S$                        | Azufre                                                             |

# Índice de Contenido

|                                                             |     |
|-------------------------------------------------------------|-----|
| Agradecimientos .....                                       | I   |
| Resumen .....                                               | II  |
| Abstract.....                                               | III |
| Glosario .....                                              | IV  |
| Índice de Contenido.....                                    | V   |
| Índice de tablas .....                                      | VII |
| Índice de figuras .....                                     | VII |
| 1      Introducción .....                                   | 1   |
| 1.1    Motivación .....                                     | 1   |
| 1.2    Objetivo general.....                                | 2   |
| 1.2.1    Objetivos específicos.....                         | 2   |
| 1.3    Estado del arte.....                                 | 2   |
| 1.3.1    Métodos Heywood.....                               | 3   |
| 1.3.2    Método Chan .....                                  | 5   |
| 1.3.3    Método Euro .....                                  | 6   |
| 1.3.4    Método USM .....                                   | 8   |
| 2      Metodología .....                                    | 9   |
| 2.1    Equipos .....                                        | 9   |
| 2.1.1    Camioneta Mitsubishi L200 .....                    | 9   |
| 2.1.2    Freno dinamométrico de rodillo .....               | 10  |
| 2.1.3    Equipo de medición de gases SEMTECH-D.....         | 10  |
| 2.1.4    Equipo de medición de gases SEMTECH-G.....         | 11  |
| 2.1.5    Equipo de medición de gases TESTO .....            | 11  |
| 2.1.6    Tubo de flujómetro de diámetro 2,5” .....          | 12  |
| 2.1.7    Flujómetro SEMTECH ExFM .....                      | 12  |
| 2.1.8    Balanza analítica digital.....                     | 13  |
| 2.1.9    Estanque auxiliar .....                            | 13  |
| 2.1.10    Controlador de flujo .....                        | 14  |
| 2.1.11    Gases patrones de calibración.....                | 14  |
| 2.2    Procedimientos.....                                  | 16  |
| 2.2.1    Estado de filtros en los equipos de medición ..... | 16  |
| 2.2.2    Precalentamiento de equipos .....                  | 16  |
| 2.2.3    Calibración de los equipos de medición .....       | 16  |
| 2.2.4    Pruebas .....                                      | 17  |

|       |                                                                    |    |
|-------|--------------------------------------------------------------------|----|
| 2.3   | Error estimación consumo de combustible .....                      | 18 |
| 2.4   | Método desarrollado .....                                          | 19 |
| 2.4.1 | Métodos “Equivalente” .....                                        | 22 |
| 2.4.2 | Métodos “Diesel” .....                                             | 28 |
| 3     | Resultados .....                                                   | 30 |
| 3.1   | Línea Base .....                                                   | 30 |
| 3.2   | Sustitución energética 2% .....                                    | 31 |
| 3.2.1 | “Euro-Equivalente” .....                                           | 32 |
| 3.2.2 | “Euro-Diesel” .....                                                | 32 |
| 3.2.3 | “H.Carbono-Equivalente” .....                                      | 33 |
| 3.2.4 | “H.Carbono-Diesel” .....                                           | 33 |
| 3.3   | Sustitución energética 9% .....                                    | 33 |
| 3.3.1 | “Euro-Equivalente” .....                                           | 34 |
| 3.3.2 | “Euro-Diesel” .....                                                | 35 |
| 3.3.3 | “H.Carbono-Equivalente” .....                                      | 35 |
| 3.3.4 | “H.Carbono-Diesel” .....                                           | 36 |
| 3.4   | Sustitución energética 13% .....                                   | 36 |
| 3.4.1 | “Euro-Equivalente” .....                                           | 37 |
| 3.4.2 | “Euro-Diesel” .....                                                | 37 |
| 3.4.3 | “H.Carbono-Equivalente” .....                                      | 38 |
| 3.4.4 | “H.Carbono-Diesel” .....                                           | 38 |
| 3.5   | Resumen de Resultados .....                                        | 38 |
| 4     | Conclusiones .....                                                 | 41 |
| 5     | Trabajos Futuros .....                                             | 42 |
| 6     | Bibliografía .....                                                 | 43 |
| 7     | Anexos .....                                                       | 44 |
| 7.1   | Anexo A: Estimación de consumo diesel con métodos existentes. .... | 44 |
| 7.2   | Anexo B: Valores “m” correctos para cada prueba. ....              | 48 |

## Índice de tablas

|                                                                                                                                                                    |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabla 2.1. Análisis elemental de muestra de diesel utilizado.....                                                                                                  | 18 |
| Tabla 2.2. Promedio de los errores relativos con respecto a la masa de diesel real consumida, para cada uno de los métodos.....                                    | 19 |
| Tabla 3.1. Masa de hidrógeno inyectado en el motor para pruebas con sustitución 2%.                                                                                | 31 |
| Tabla 3.2. Masa de hidrógeno inyectado en el motor para pruebas con sustitución 9%.                                                                                | 34 |
| Tabla 3.3. Masa de hidrógeno inyectado en el motor para cada prueba con sustitución 13%.....                                                                       | 36 |
| Tabla 3.4. Varianza de la masa de hidrógeno inyectada en cada mapa.....                                                                                            | 39 |
| Tabla 7.1B. Valor “m” correcto, con la diferencia de hidrógeno de entrada y salida y su error relativo correspondiente, para las pruebas con sustitución 2%. ....  | 48 |
| Tabla 7.2B. Valor “m” correcto, con la diferencia de hidrógeno de entrada y salida y su error relativo correspondiente, para las pruebas con sustitución 9%. ....  | 48 |
| Tabla 7.3B. Valor “m” correcto, con la diferencia de hidrógeno de entrada y salida y su error relativo correspondiente, para las pruebas con sustitución 13%. .... | 48 |

## Índice de figuras

|                                                                                                                                                                                                         |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 2.1. Layout de la disposición de equipos. ....                                                                                                                                                   | 9  |
| Figura 2.2. Camioneta Mistubishi L200 en freno dinamométrico. ....                                                                                                                                      | 10 |
| Figura 2.3. Freno Dinamométrico de rodillo.....                                                                                                                                                         | 10 |
| Figura 2.4. Equipo de medición de gases SEMTECH-D. ....                                                                                                                                                 | 11 |
| Figura 2.5. Equipo de medición de gases SEMTECH-G. ....                                                                                                                                                 | 11 |
| Figura 2.6. Equipo de medición de gases TESTO.....                                                                                                                                                      | 12 |
| Figura 2.7. Tubo de flujómetro de diámetro 2,5”.....                                                                                                                                                    | 12 |
| Figura 2.8. Flujómetro SEMTECH ExFM. ....                                                                                                                                                               | 13 |
| Figura 2.9. Balanza analítica digital. ....                                                                                                                                                             | 13 |
| Figura 2.10. Estanque auxiliar.....                                                                                                                                                                     | 14 |
| Figura 2.11. Controlador de flujo. ....                                                                                                                                                                 | 14 |
| Figura 2.12. Gases patrones de calibración. ....                                                                                                                                                        | 15 |
| Figura 2.13. Estimación consumo de diesel para los distintos porcentajes de sustitución. ....                                                                                                           | 19 |
| Figura 3.1. Masa de hidrógeno que ingresa al motor menos masa de hidrógeno que sale del motor Línea Base, para los Métodos “Euro-Diesel” y “H.Carbono-Diesel”.....                                      | 31 |
| Figura 3.2. Variación de la masa de hidrógeno que ingresa al motor menos la que sale del motor y el porcentaje de error al cambiar el valor de “m”; para “Euro-Equivalente” en sustitución 2%.. ....    | 32 |
| Figura 3.3. Variación de la masa de hidrógeno que ingresa al motor menos la que sale del motor y el porcentaje de error al cambiar el valor de “m”; para “Euro-Diesel” en sustitución 2%.. ....         | 32 |
| Figura 3.4. Variación de la masa de hidrógeno que ingresa al motor menos la que sale del motor y el porcentaje de error al cambiar el valor de “m”; para “H.Carbono-Equivalente” en sustitución 2%..... | 33 |

|                                                                                                                                                                                                           |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 3.5. Variación de la masa de hidrógeno que ingresa al motor menos la que sale del motor y el porcentaje de error al cambiar el valor de “m”; para “H.Carbono-Diesel” en sustitución 2%.....        | 33 |
| Figura 3.6. Variación de la masa de hidrógeno que ingresa al motor menos la que sale del motor y el porcentaje de error al cambiar el valor de “m”; para “Euro-Equivalente” en sustitución 9%. ....       | 34 |
| Figura 3.7. Variación de la masa de hidrógeno que ingresa al motor menos la que sale del motor y el porcentaje de error al cambiar el valor de “m”; para “Euro-Diesel” en sustitución 9%. ....            | 35 |
| Figura 3.8. Variación de la masa de hidrógeno que ingresa al motor menos la que sale del motor y el porcentaje de error al cambiar el valor de “m”; para “H.Carbono-Equivalente” en sustitución 9%.....   | 35 |
| Figura 3.9. Variación de la masa de hidrógeno que ingresa al motor menos la que sale del motor y el porcentaje de error al cambiar el valor de “m”; para “H.Carbono-Diesel” en sustitución 9%.....        | 36 |
| Figura 3.10. Variación de la masa de hidrógeno que ingresa al motor menos la que sale del motor y el porcentaje de error al cambiar el valor de “m”; para “Euro-Equivalente” en sustitución 13%. ....     | 37 |
| Figura 3.11. Variación de la masa de hidrógeno que ingresa al motor menos la que sale del motor y el porcentaje de error al cambiar el valor de “m”; para “Euro-Diesel” en sustitución 13%. ....          | 37 |
| Figura 3.12. Variación de la masa de hidrógeno que ingresa al motor menos la que sale del motor y el porcentaje de error al cambiar el valor de “m”; para “H.Carbono-Equivalente” en sustitución 13%..... | 38 |
| Figura 3.13. Variación de la masa de hidrógeno que ingresa al motor menos la que sale del motor y el porcentaje de error al cambiar el valor de “m”; para “H.Carbono-Diesel” en sustitución 13%.....      | 38 |
| Figura 3.14. Valor de “m” correcto para cada mapa y variante del método. ....                                                                                                                             | 39 |
| Figura 3.15. Diferencia entre hidrógeno que entra y sale del motor para cada mapa y variante del método. ....                                                                                             | 40 |
| Figura 7.1A. Predicción de consumo de diesel según cada método existente en pruebas con solo diesel (Línea Base).....                                                                                     | 44 |
| Figura 7.2A. Predicción de consumo de diesel según cada método existente en pruebas con 2% de sustitución (Mapa 1). ....                                                                                  | 45 |
| Figura 7.3A. Predicción de consumo de diesel según cada método existente en pruebas con 9% de sustitución (Mapa 2). ....                                                                                  | 46 |
| Figura 7.4A. Predicción de consumo de diesel según cada método existente en pruebas con 13% de sustitución (Mapa 3). ....                                                                                 | 47 |

# 1 Introducción

En la actualidad existe un gran interés con respecto a alternativas más amigables con el medio ambiente que nos puedan ofrecer los motores de combustión interna, las normas que regulan las emisiones en general son cada vez más estrictas, en Chile, por ejemplo, se busca lograr la carbono neutralidad en el año 2050 [1]. Es por estas razones que tanto los investigadores y fabricantes de motores se encuentran realizando trabajos de investigación para poder llegar a nuevas y mejores soluciones para la disminución de gases invernadero. Es en este contexto donde entran los motores de combustión interna que operan de modo dual, en los cuales, a partir de la combustión de dos combustibles diferentes, se logra un buen rendimiento del motor, pero además se obtienen mejores resultados en torno a las emisiones nocivas que generan los motores, tales como  $\text{CO}_2$ , CO, HC y  $\text{NO}_x$ .

Entre los combustibles alternativos se encuentra el gas licuado, gas natural, hidrógeno, etc. siendo el hidrógeno uno de los combustibles alternativos que ha ido tomando más fuerza en los últimos años, esto debido a puede actuar como una fuente energética sin producir gases de efecto invernadero en su uso, y la posibilidad de producirlo de una manera sustentable [2].

En este trabajo se busca la formulación de un método para estimar el hidrógeno inyectado en un motor diesel operando en modo dual, a partir de las emisiones de gases de escape. En primera instancia, se realiza un estado del arte sobre las técnicas existentes para el cálculo del consumo de combustible en motores de combustión interna que operan de manera dual, para luego poder evaluar el desempeño de las metodologías existentes en la literatura para predecir la cantidad de hidrógeno inyectado.

Para el desarrollo de la metodología, se realizaron pruebas en una camioneta, la cual operó inicialmente de manera convencional, es decir, únicamente diesel, para luego trabajar de manera dual con diesel e inyección de hidrógeno, esto bajo el marco del proyecto interno multidisciplinario PIM 109 titulado “Detección no invasiva de combustión anormal en un motor de combustión interna operando en modo dual con hidrógeno bajo condiciones dinámicas”.

Las pruebas realizadas fueron utilizadas para la validación de la metodología, estimando la cantidad de hidrógeno inyectado en el motor de la camioneta.

## 1.1 Motivación

El diesel es el combustible principalmente utilizado por los motores de combustión interna, pero existen varias razones por las cuales actualmente se promueve el menor uso de este, siendo la principal que el funcionamiento de motores con este combustible contamina el aire, dañando al medio ambiente y además los contaminantes emitidos pueden generar problemas en la salud de las personas. Además, existe una mayor conciencia sobre la importancia de una transición hacia fuentes de energía más limpias y sostenibles, entre las cuales se encuentra el hidrógeno. Por estas razones, las regulaciones existentes, tanto en nuestro país como en el resto del mundo, se han hecho más estrictos los límites y regulaciones para reducir las distintas emisiones [3] y poder de esta manera

mejorar la calidad del aire. Por lo que la opción de trabajar con un motor en modo dual con inyección de hidrógeno es atractiva en la actualidad.

Los motores duales que trabajan con hidrógeno se encuentran aún en investigaciones para poder obtener su mejor rendimiento, y es en el ámbito de estas investigaciones que se encuentra el desarrollo de un método para determinar la cantidad de hidrógeno inyectado en un motor que trabaja en modo dual. Actualmente para poder determinar la cantidad de hidrógeno inyectado en el motor, se debe llevar el motor a un centro de investigación, intervenir el motor colocando diversa instrumentación y evaluarlo en las distintas condiciones de funcionamiento, siendo esto una tarea compleja y además costosa. Por lo que significa una opción atractiva para el desarrollo de estas nuevas tecnologías, el generar un método que, a partir de los gases de escape y un análisis del combustible utilizado, se pueda estimar la cantidad de hidrógeno inyectado.

## 1.2 Objetivo general

Desarrollar un método para la estimación del hidrógeno inyectado en un motor diesel operando en modo dual.

### 1.2.1 Objetivos específicos

- Realizar un estado del arte sobre las técnicas existentes para el cálculo del consumo de combustible en motores de combustión interna que operan de manera dual.
- Evaluar el desempeño de las metodologías disponibles en la literatura para predecir la cantidad de hidrógeno inyectado.
- Validar la metodología desarrollada estimando la cantidad de hidrógeno inyectado en una camioneta Mitsubishi L200 operando en modo dual con hidrógeno.

## 1.3 Estado del arte

Actualmente no existen métodos que puedan estimar la cantidad de hidrógeno inyectado en un motor diesel, pero si existen métodos para poder determinar la relación aire-combustible a partir de las emisiones de un motor diesel y en base a esta, poder determinar la cantidad de diesel consumido por el motor.

La relación de aire-combustible es un parámetro fundamental para el control de los motores de combustión interna, debido a que una medición incorrecta de este parámetro puede llevar a problemas como alta emisión de gases tóxicos, deterioro del motor, ruidos molestos en la combustión, sobrecalentamiento y serios problemas en el consumo de combustible. Generalmente, esta relación se obtiene a través de mediciones directas de la admisión de aire y del combustible inyectado a la cámara de combustión.

La relación aire-combustible es la división entre el flujo másico de aire y de combustible:

$$\left(\frac{A}{F}\right) = \frac{\dot{m}_{aire}}{\dot{m}_{fuel}} \quad (1)$$

Otro parámetro informativo sobre la mezcla en combustión es la relación entre la relación aire-combustible real y la estequiométrica, la cual es denotada con la letra  $\lambda$ :

$$\lambda = \frac{(A/F)_{real}}{(A/F)_s} \quad (2)$$

y la inversa de esta relación:

$$\phi = \frac{(F/A)_{real}}{(F/A)_s} \quad (3)$$

La medición precisa del flujo de aire y combustible es difícil y requiere de condiciones específicas. Por ello, actualmente existen cinco métodos capaces de determinar la relación aire-combustible a partir de las emisiones del motor y de la naturaleza del combustible. Cabe destacar que estos están diseñados para motores que no trabajan en operación dual, pero sientan una base para determinar, a partir de ello, un modelo que sea compatible con los motores que trabajen de manera dual.

### 1.3.1 Métodos Heywood

Estos métodos se establecen a partir de la siguiente ecuación de combustión, donde se considera un combustible de composición  $H_mC_nO_r$  [4]:

$$\begin{aligned} H_mC_nO_r + \frac{n_{O_2}}{\phi} (O_2 + 3.773N_2) \\ = n_p (\tilde{x}_{C_aH_b} C_aH_b + \tilde{x}_{CO} CO + \tilde{x}_{CO_2} CO_2 + \tilde{x}_{O_2} O_2 + \tilde{x}_{N_2} N_2 \\ + \tilde{x}_{NO} NO + \tilde{x}_{NO_2} NO_2 + \tilde{x}_{H_2O} H_2O + \tilde{x}_{H_2} H_2) \end{aligned} \quad (4)$$

donde:

$n_{O_2}$ : número de moléculas de  $O_2$  para tener una combustión completa  $(n+m/4-r/2)$ .

$n_p$ : número de moles de gases de escape en los productos.

$\tilde{x}_{CO}$ : fracción molar en base húmeda del CO.

Generalmente la concentración como fracción molar de  $CO_2$ ,  $CO$ ,  $O_2$ ,  $NO_x$  y los hidrocarburos no quemados son medidos, Por lo cual, en la ecuación (4) quedan siete incógnitas que son:  $\phi$ ,  $\tilde{x}_{H_2O}$ ,  $\tilde{x}_{H_2}$ ,  $\tilde{x}_{N_2}$ ,  $n_p$ ,  $a$ ,  $b$ . Para poder resolver esto se necesitan siete ecuaciones, cinco de estas se pueden obtener del balance de cada elemento (carbono, hidrógeno, oxígeno y nitrógeno) y la definición de fracción molar.

De manera adicional se realiza una suposición para obtener la ecuación faltante, esta se basa en la constante empírica  $K$  determinada a partir de los datos de composición de los gases de escape, para la cual se usan comúnmente valores de 3,5 y 3,8. Además, se

establece una expresión para poder determinar la relación aire-combustible estequiométrico a partir de la relación H/C del combustible.

$$\left(\frac{A}{F}\right)_s = \left(\frac{F}{A}\right)_s^{-1} = \frac{34,56(4 + y)}{12,011 + 1,008y} \quad (5)$$

donde:

$\left(\frac{A}{F}\right)_s$  : relación aire-combustible estequiométrico.

$\left(\frac{F}{A}\right)_s$  : relación combustible-aire estequiométrico.

y: relación H/C del combustible.

Por último, para poder completar el análisis y llegar a la relación aire-combustible real, se realiza una serie de suposiciones con respecto a la composición e importancia relativa de los hidrocarburos no quemados, siendo los enfoques utilizados los siguientes:

#### 1.3.1.1 Balance de oxígeno:

Este es utilizado para combustibles compuestos de carbono e hidrógeno, donde las mediciones son tomadas con la misma humedad. En este caso se asume que los hidrocarburos no quemados tienen la misma relación H/C que el combustible.

$$\left(\frac{A}{F}\right) = 4.773 \left(\frac{M_{air}}{M_f}\right) \left[ \frac{[CO_2] + \frac{[CO]}{2} + \frac{[H_2O]}{2} + \frac{[NO]}{2} + [NO_2] + [O_2]}{[HC] + [CO] + [CO_2]} \right] \quad (6)$$

donde:

$\left(\frac{A}{F}\right)$ : relación aire-combustible real.

[ ]: denota las concentraciones, todas con la misma humedad de fondo [%].

$M_{air}$ : valor de 28,96.

$M_f$ : valor de 12,01+1,008y.

Además, el porcentaje molar de agua en los productos de combustión, ( $H_2O$ ), se puede obtener de la siguiente manera:

$$[H_2O] = 0.5y \frac{[CO_2] + [CO]}{[CO]/[K[CO_2]] + 1} \quad (7)$$

#### 1.3.1.2 Balance de carbono:

Es utilizado cuando el combustible está compuesto únicamente por carbono e hidrógeno.

$$\left(\frac{A}{F}\right) = \left(\frac{M_{air}}{M_f}\right) \left[ \frac{100 + [HC] - \frac{[CO]}{2} + \frac{3[H_2O]}{2} - [H_2O]}{[HC] + [CO] + [CO_2]} - \frac{y}{2} \right] \quad (8)$$

Con las ecuaciones ((6) u (8) sumadas a la ecuación (5) se puede obtener  $\lambda$ .

### 1.3.2 Método Chan

Este método establece la ecuación de combustión, pero a diferencia del método de Heywood, al combustible se le agrega la composición de nitrógeno, además, en los oxidantes se agrega la cantidad de argón, dióxido de carbono y también, la cantidad de agua que ingresa en la combustión. Por esto, la ecuación de combustión queda de la siguiente manera [5]:

$$\begin{aligned} C_n H_m O_r N_s + A^*(O_2 + 3,729N_2 + 0,0444Ar + 0,0019CO_2) + B H_2O \\ = (v_1 CO + v_2 CO_2 + v_3 O_2 + v_4 H_2O + v_5 CH_x + v_6 H_2 \\ + v_7 NO + v_8 N_2 + v_9 NO_2 + v_{10} Ar) \end{aligned} \quad (9)$$

donde:

$A^*$ : número de moles de aire atmosférico

$B$ : número de moles de vapor de agua presentes en el aire atmosférico.

$v_1$ : número de moles de emisión de CO.

A partir de esta ecuación de combustión, se obtiene que la relación aire-combustible se puede calcular de la siguiente manera:

$$\left(\frac{A}{F}\right) = \frac{138,324 A^*}{12,011n + 1,008m + 15,999r + 14,007s} \quad (10)$$

De este modo, el problema se reduce a la evaluación de  $A^*$ , lo cual, se puede resolver considerando la conservación del carbono, hidrógeno y oxígeno. Pero estas ecuaciones consideran la humedad de las concentraciones, lo que suele ser una complicación para los instrumentos que deben medir las concentraciones de los gases de escape, por lo tanto, una forma común de evitar este problema es eliminar el condensado de agua, antes de enviarlo a los instrumentos. A partir de esto, incluyendo la constante empírica K, se puede determinar  $A^*$  en función de las concentraciones de las emisiones:

$$A^* = \frac{n - r + (mK[CO_2])/2A_2 - (nA_3A_4)/2A_2}{2,0038 + A_5 - \frac{A_5K[CO_2]}{A_2} + \frac{0,0019A_3A_4}{2A_2} - 0,0019A_1} \quad (11)$$

siendo:

$$A_1 = \frac{[CO] + 2[CO_2] + 2[O_2] + [NO] + 2[NO_2]}{[CO] + [CO_2] + [HC]}$$

$$A_2 = K[CO_2] + [CO]$$

$$A_3 = \frac{K[CO_2]}{[CO]([CO] + [CO_2] + [HC])}$$

$$A_4 = y[HC][CO]$$

$$A_5 = 4,7755 \frac{\%HR \cdot P_g}{P_a - \%HR \cdot P_g} \quad (12)$$

donde:

[ ]: denota las concentraciones en base seca [%].

y: relación H/C del combustible.

%HR: porcentaje de humedad relativa.

$P_a$ : presión atmosférica.

$P_g$ : presión de vapor.

Por lo tanto, conociendo las concentraciones de  $CO_2$ ,  $CO$ ,  $O_2$ ,  $NO_2$ ,  $NO$ ,  $HC$ , la humedad relativa y la presión atmosférica, se puede obtener  $\lambda$ .

### 1.3.3 Método Euro

La Unión Europea establece un método dentro de su reglamento a las emisiones (Euro 6), donde el caudal másico de combustible está dado por la siguiente expresión [6]:

$$\dot{m}_{escape} = \dot{m}_{aire} + \dot{m}_{fuel} \quad (13)$$

donde:

$\dot{m}_{escape}$ : flujo másico instantáneo de gases de escape.

$\dot{m}_{aire}$ : flujo másico instantáneo de gases de aire.

$\dot{m}_{fuel}$ : flujo másico instantáneo de gases de combustible.

Además, existen dos relaciones que vinculan el flujo másico de aire y combustible, con el flujo másico de los gases de escape:

$$\dot{m}_{escape} = \dot{m}_{aire} \left( 1 + \frac{1}{\left(\frac{A}{F}\right)_s \cdot \lambda} \right) \quad (14)$$

$$\dot{m}_{escape} = \dot{m}_{fuel} \left( 1 + \left(\frac{A}{F}\right)_s \cdot \lambda \right) \quad (15)$$

Teniendo en este caso una expresión para determinar la relación aire-combustible estequiométrica y para  $\lambda$ :

$$\left(\frac{A}{F}\right)_s = \frac{138 \left( 1 + \frac{\alpha}{4} + \frac{\varepsilon}{2} + \gamma \right)}{12,011 + 1,008\alpha + 15,9994\varepsilon + 14,0067\delta + 32,0675\gamma} \quad (16)$$

$$\lambda = \frac{\left( 100 - \frac{[CO]}{2} - [HC] \right) + \left( \frac{\alpha}{4} \cdot \frac{1 - (2 \cdot [CO] / 3,5 \cdot [CO_2])}{1 + ([CO] / 3,5 \cdot [CO_2])} - \frac{\varepsilon}{2} - \frac{\delta}{2} \right) \cdot ([CO_2] + [CO])}{4,764 \cdot \left( 1 + \frac{\alpha}{4} - \frac{\varepsilon}{2} + \gamma \right) \cdot ([CO_2] + [CO] + [HC])} \quad (17)$$

donde:

$[CO_2]$ : concentración en base seca de  $CO_2$  [%].

$[CO]$ : concentración en base seca de  $CO$  [%].

$[HC]$ : concentración en base húmeda de  $HC$  [%].

$\alpha$ : relación molar de hidrógeno (H/C).

$\beta$ : relación molar de carbono (C/C).

$\varepsilon$ : relación molar de oxígeno (O/C).

$\delta$ : relación molar de nitrógeno (N/C).

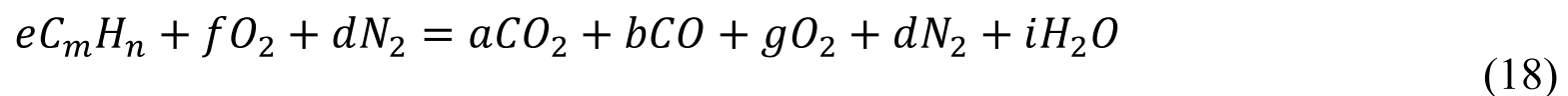
$\gamma$ : relación molar de azufre (S/C).

Siendo los coeficientes referencia de un combustible de composición  $C_\beta H_\alpha O_\epsilon N_\delta S_\gamma$ , donde  $\beta = 1$ .

Se puede apreciar que este método es el único donde se tiene una forma para obtener el flujo másico de aire a partir de los gases de escape, algo que no se tiene en los demás métodos y es necesario para obtener la masa de combustible a partir de la relación aire-combustible.

#### 1.3.4 Método USM

Este método es utilizado en el ramo de motores de combustión interna de la Universidad Técnica Federico Santa María, se basa en el balance de carbono, considerando un combustible del tipo  $H_m C_n$  y la siguiente ecuación de reacción [7]:



De esta ecuación se obtiene la siguiente expresión para el cálculo de la relación aire-combustible:

$$\left(\frac{A}{F}\right) = \frac{32 \cdot f + 28 \cdot d}{e \cdot 111,62} \quad (19)$$

donde:

$$\begin{aligned} d &= 100 - (a + b + g) \\ e &= (a + b)/n \\ f &= d/3,76 \end{aligned} \quad (20)$$

Nótese que el contenido de hidrocarburos no quemados no se considera en este método, debido a que se asume que representa un número muy pequeño.

## 2 Metodología

### 2.1 Equipos

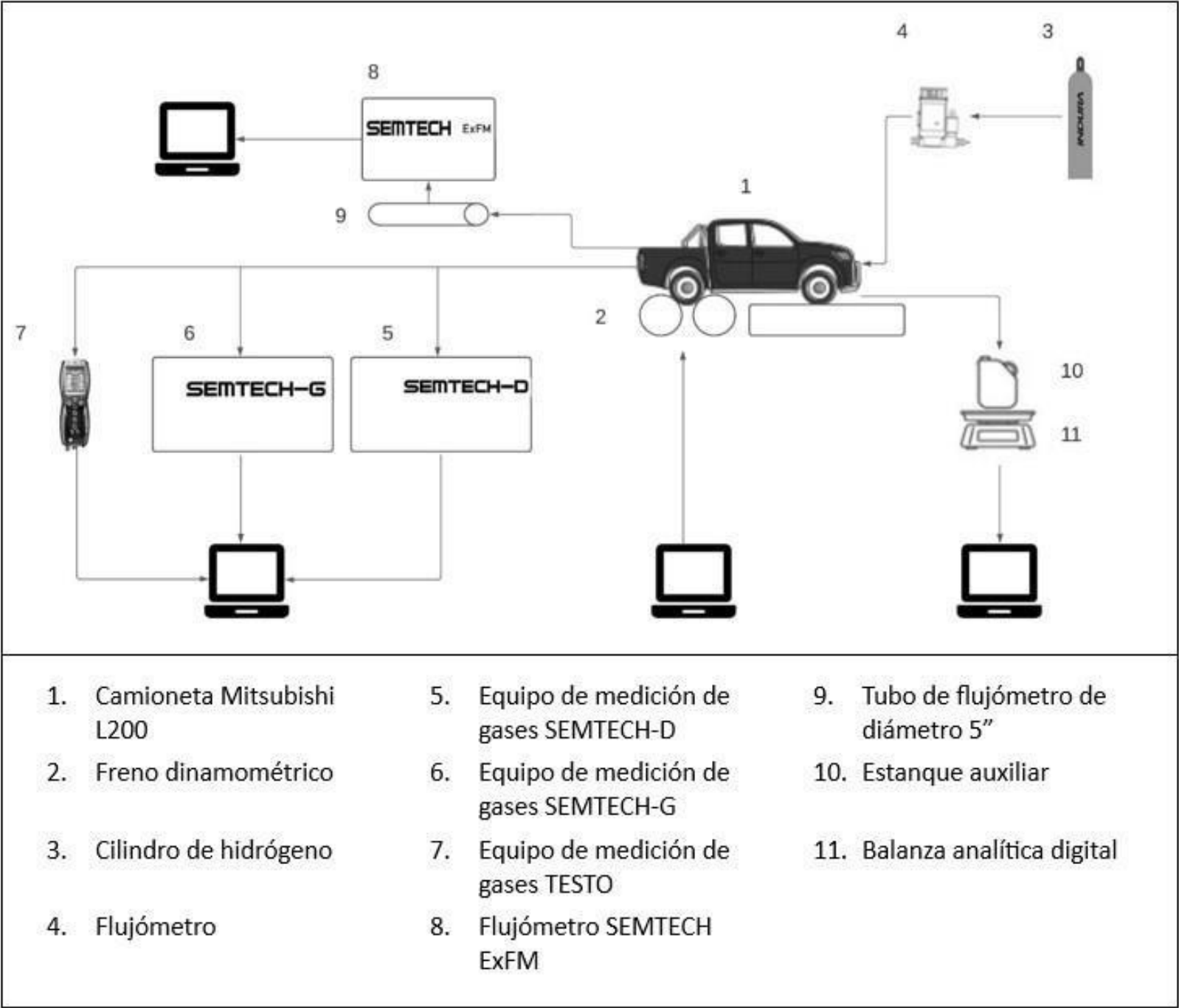


Figura 2.1. Layout de la disposición de equipos.

#### 2.1.1 Camioneta Mitsubishi L200

Motor vehicular utilizado para las pruebas experimentales en la sede de Viña del Mar, funcionando con diesel como combustible y en modo dual con diesel e hidrógeno.

- Marca: Mitsubishi.
- Modelo: L200.
- Año: 2019.
- Cilindrada: 2,4 L.
- Potencia: 152 hp a 3500 rpm.
- Torque: 380 Nm a 1500-2500 rpm.



*Figura 2.2. Camioneta Mistubishi L200 en freno dinamométrico.*

### **2.1.2 Freno dinamométrico de rodillo**

Freno dinamométrico de chasis utilizado para aplicar carga en condiciones dinámicas de funcionamiento sobre la camioneta para simular condiciones reales de funcionamiento bajo ciclo de conducción de norma europea.

- Fabricante: MAHA.
- Modelo: FPS 2700.
- Peso Vehículo: Hasta 5,5 toneladas de carga sobre eje.
- Potencia máxima: 260 kW de potencia máxima normalizada del motor.
- Velocidad máxima: 200 km/h en prueba.



*Figura 2.3. Freno Dinamométrico de rodillo.*

### **2.1.3 Equipo de medición de gases SEMTECH-D**

Equipo utilizado para la medición de gases de escape generados por la camioneta en las pruebas experimentales.

- Fabricante: Sensors, Inc.
- Modelo: SEMTECH-D.
- Año: 1995.
- Sensores: Detector de llama ionizante (FID), analizador ultravioleta no dispersivo (NDUV), sensor electroquímico para oxígeno, sensores de temperatura y humedad.

- Resolución: FID; 0 – 10.000 ppm.  
NDIR; 0 – 8% ajustado a 1000 ppm.



*Figura 2.4. Equipo de medición de gases SEMTECH-D.*

#### **2.1.4 Equipo de medición de gases SEMTECH-G**

Equipo utilizado para la medición de gases de escape generados por la camioneta en las pruebas experimentales.

- Fabricante: Sensor, Inc.
- Modelo: Semtech-G.
- Año: 1995.
- Sensores: Detector de llama ionizante (FID), analizador ultravioleta no dispersivo (NDUV), sensor electroquímico para oxígeno, sensores de temperatura y humedad.
- Resolución: FID; 0-10.000 ppm.  
NDIR; 0 – 8% ajustado a 1.000 ppm.



*Figura 2.5. Equipo de medición de gases SEMTECH-G.*

#### **2.1.5 Equipo de medición de gases TESTO**

Equipo utilizado para la medición de gases contaminantes y corroboración de los niveles de gases medidos por los demás equipos.

- Marca: TESTO.
- Modelo: 340.
- Rango: 0 – 50.000 ppm CO.  
0 – 10% vol. CO<sub>2</sub>.  
0 – 25% vol. O<sub>2</sub>.

0 – 4.000 ppm NO.

0 – 500 ppm NO<sub>2</sub>.

- Resolución: 1% vol.; 1 ppm.



*Figura 2.6. Equipo de medición de gases TESTO.*

### **2.1.6 Tubo de flujómetro de diámetro 2,5"**

Tubo de flujómetro ExFM empleado para el registro del caudal másico de gases de escape, siendo instalado a continuación del tubo de escape de la camioneta. Las sondas de emisiones se conectan entre este y los equipos SEMTECH.

- Fabricante: Sensors, Inc.
- Largo: 63,5 cm.
- Diámetro interno: 60 mm.
- Diámetro externo 63 mm.
- Sensores: 5 sensores de presión al interior del tubo permiten tener la información suficiente para conocer el flujo volumétrico, el cual envía la información al equipo y su posterior procesamiento.



*Figura 2.7. Tubo de flujómetro de diámetro 2,5".*

### **2.1.7 Flujómetro SEMTECH ExFM**

Equipo utilizado para la medición del flujo de escape proveniente de la camioneta.

- Marca: SEMTECH.

- Modelo: ExFM 2,5”.
- Diámetro de analizador: 2,5”.



*Figura 2.8. Flujómetro SEMTECH ExFM.*

### **2.1.8 Balanza analítica digital**

Instrumento utilizado para conocer el consumo de combustible de la camioneta mediante la medición en tiempo real de la variación de masa del estanque de diesel.

- Marca: Snowrex.
- Modelo: NHV-30.
- Rango: 0 – 30.000 g.
- Resolución: 0,01 g.



*Figura 2.9. Balanza analítica digital.*

### **2.1.9 Estanque auxiliar**

Estanque utilizado para la contención del diesel utilizado en la camioneta, el cual se posiciona sobre la balanza para llevar el registro en tiempo real.



*Figura 2.10. Estanque auxiliar.*

### **2.1.10 Controlador de flujo**

Instrumento empleado para conocer el flujo másico de hidrógeno inyectado en el motor.

- Marca: Aalborg.
- Modelo: GFC57.
- Rango: 0 – 200 l/min de aire.
- Resolución:  $\pm 3$  l/min de aire en rango 40 – 200 l/min;  $\pm 6$  l/min de aire en rango 0 – 40 l/min.
- Escala calibrada a 1 sml.



*Figura 2.11. Controlador de flujo.*

### **2.1.11 Gases patrones de calibración**

Gases utilizados para la correcta calibración de los equipos de medición de emisiones de gases de escape.

- Marca: Indura.
- Gases: Nitrógeno, propano, dióxido de carbono y monóxido de carbono.



*Figura 2.12. Gases patrones de calibración.*

## **2.2 Procedimientos**

### **2.2.1 Estado de filtros en los equipos de medición**

Con el fin de garantizar una precisa evaluación de las emisiones de gases de escape, se lleva a cabo una verificación del estado de los filtros utilizados en cada equipo de medición. Los equipos de medición SEMTECH tienen incorporados diversos filtros, siendo los más relevantes los filtros de material particulado y filtros de condensado de agua. Ambos son sometidos a inspección y reemplazados en caso de ser necesario. El filtro de material particulado desempeña un papel crucial al proteger los componentes internos del equipo de la contaminación presente en la muestra. Este filtro es sustituido por uno nuevo antes de iniciar las mediciones. Por otro lado, se verifica la presencia de agua en los filtros de condensado y, de manera similar, se procede a su reemplazo por nuevos antes de iniciar las pruebas.

En cuanto al equipo de medición Testo, también cuenta con un filtro de papel para material particulado, el cual es reemplazado por uno nuevo antes de iniciar las pruebas. Al igual que los equipos SEMTECH, el equipo de medición Testo dispone de una trampa para el condensado de agua, la cual es vaciada antes de dar comienzo a las pruebas.

### **2.2.2 Precalentamiento de equipos**

Con el propósito de garantizar un funcionamiento adecuado, se requiere encender los equipos previo al inicio de las mediciones. Este período de tiempo permite que los diferentes sensores del equipo alcancen las temperaturas óptimas de operación, las cuales suelen ser de aproximadamente 60 minutos en condiciones ambientales normales. Del mismo modo, si se planea llevar a cabo mediciones en temperaturas bajas, se debe añadir al menos 30 minutos adicionales al proceso de precalentamiento.

### **2.2.3 Calibración de los equipos de medición**

Después de verificar el estado de los filtros y realizar el precalentamiento de los equipos, se lleva a cabo la calibración de los dispositivos de medición. Este proceso se realiza antes de iniciar las pruebas con el fin de obtener mediciones precisas. Tanto los equipos SEMTECH como el equipo Testo requieren calibración. En el caso del equipo Testo, la calibración se realiza automáticamente al encenderlo, siendo un proceso simple de llevar a cabo. En cuanto a los equipos SEMTECH, la calibración consta de tres pasos que se describen a continuación:

- Cero: El primer paso consiste en establecer un punto de referencia para la medición, llevando todos los parámetros a un valor cero. Esto se logra utilizando un gas patrón que, en este caso, es nitrógeno puro. Dentro del programa de medición, se realiza la medición del gas patrón, asignando el valor cero a la concentración de los gases en la muestra.
- Audit: Después del proceso de cero, se realiza la auditoría (Audit), que implica medir un cilindro de gas que contiene un gas patrón con concentraciones conocidas. Si este proceso es exitoso, se procede a realizar

las mediciones de gases. En caso de que falle, se debe llevar a cabo el proceso de Span.

- Span: Consiste en ajustar las concentraciones medidas por el equipo al valor de concentración conocido del gas patrón. Una vez finalizado el proceso de Span, se debe realizar nuevamente la auditoría (Audit) para confirmar que la medición realizada por el equipo es correcta y tiene un error porcentual de la medición menor al 3%.

Después de cada prueba y antes de comenzar la siguiente medición, es necesario realizar el proceso de auditoría (Audit) para verificar que el equipo siga calibrado. Una vez que el equipo completa exitosamente el proceso de auditoría y la medición se mantiene dentro del rango de error aceptable, se continúa con medir las emisiones en la siguiente prueba experimental.

#### **2.2.4 Pruebas**

Las pruebas se llevan a cabo en un motor de una camioneta diésel, instalada en un freno dinamométrico de rodillo. Este freno aplica carga directamente a las ruedas de la camioneta, simulando condiciones dinámicas de funcionamiento. Se sigue un ciclo de conducción compuesto por una fase inicial que simula condiciones de conducción en ciudad a baja velocidad, y otra fase que recrea condiciones de conducción en carretera a altas velocidades. Durante estas pruebas, un conductor colaba operando el acelerador de la camioneta siguiendo las instrucciones del freno dinamométrico. El conductor acelera y desacelera para seguir el ciclo de conducción predefinido por el ordenador.

Para medir las emisiones en los gases de escape, se instalan analizadores de gases (SEMTECH y TESTO) en el tubo de escape de la camioneta. Estos equipos registraron la información de las emisiones en intervalos de 1 segundo. Además, para determinar el consumo de combustible de la camioneta, se interviene la línea de combustible del tanque. El tubo de admisión de combustible es redirigido desde el tanque original hacia un tanque externo de combustible, el cual se coloca sobre una balanza digital. Esto permite registrar el consumo experimental de combustible.

A través de los sensores presentes en los equipos se obtienen las concentraciones de CO<sub>2</sub>, CO, O<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, HC, H<sub>2</sub>O, la cantidad de humedad en el aire y el flujo másico de gases de escape, donde además el consumo de combustible es medido segundo a segundo por una balanza durante la prueba. Las pruebas realizadas son ciclos de conducción, los cuales se dividen en cuatro grupos:

- Línea Base: Camioneta funcionando únicamente con diesel.
- Mapa 1: Camioneta funcionando con hidrógeno y diesel, con un porcentaje de sustitución energética de H<sub>2</sub> de 2%.
- Mapa 2: Camioneta funcionando con hidrógeno y diesel con un porcentaje de sustitución energética de H<sub>2</sub> de 9%.
- Mapa 3: Camioneta funcionando con hidrógeno y diesel con un porcentaje de sustitución energética de H<sub>2</sub> de 13%.

De manera adicional se realiza un análisis elemental al diesel utilizado, para conocer su composición en detalle.

*Tabla 2.1. Análisis elemental de muestra de diesel utilizado.*

| <b>Análisis</b> | <b>Unidad</b>         | <b>Muestra Diesel</b> |
|-----------------|-----------------------|-----------------------|
| Carbono         | [g C/100g de muestra] | 86,0 ± 0,2            |
| Hidrógeno       | [g H/100g de muestra] | 13,1 ± 0,2            |
| Nitrógeno       | [g N/100g de muestra] | 1,39 ± 0,04           |
| Oxígeno         | [g O/100g de muestra] | 1,0 ± 0,1             |
| Azufre          | [g S/100g de muestra] | <0,4                  |

### 2.3 Error estimación consumo de combustible

Se utilizan las ecuaciones de cada uno de los métodos explicados para obtener la relación aire-combustible y, en conjunto con la ecuación (14) del “Método Unión Europea” para la obtención del flujo de másico de aire, se logra llegar al flujo másico de combustible despejando este de la ecuación (1).

Para poder cuantificar la diferencia existente con respecto a la determinación experimental realizada y lo que se calcula a partir de los métodos, se utiliza el error relativo, definido como:

$$\%e_{relativo} = \frac{|experimental - teórico|}{experimental} \cdot 100 \quad (21)$$

Donde el experimental corresponde a la medición realizada directamente a la cantidad de combustible con la balanza, mientras que el teórico corresponde a lo calculado a partir de los métodos.

Al hacer funcionar la camioneta únicamente con diesel, se obtiene que los métodos que tienen asociado un menor porcentaje de error son el de la Norma Europea y el de Heywood basado en carbono [4]. Si se calcula además este mismo error para las pruebas con sustitución de hidrógeno, se obtiene que estos dos métodos siguen siendo los que tienen un porcentaje de error más bajo al momento de predecir el diesel consumido.

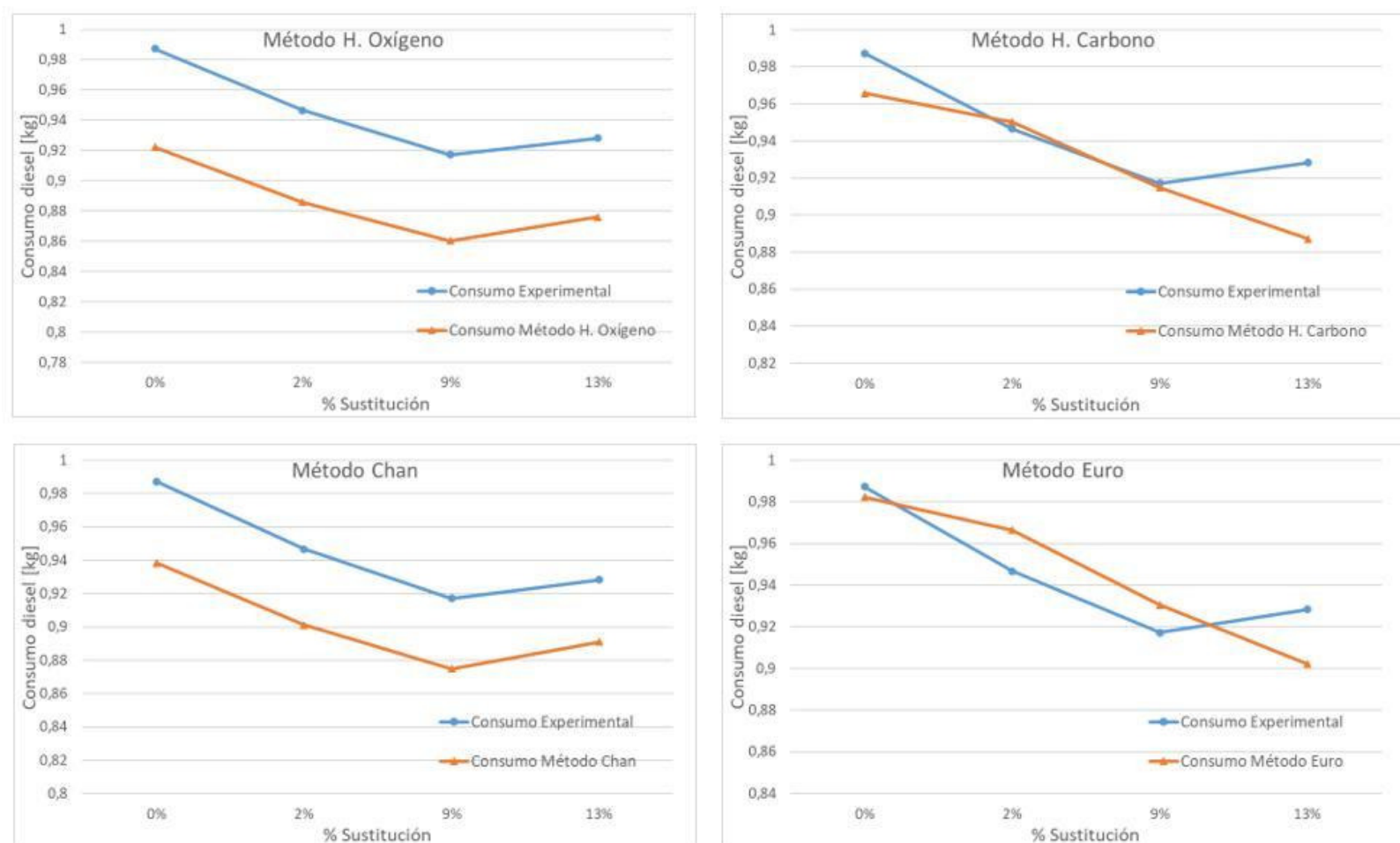


Figura 2.13. Estimación consumo de diesel para los distintos porcentajes de sustitución.

Cabe destacar que el “Método USM” no se incluyó dentro de la Figura 12 debido a que su predicción del diesel consumido se encuentra muy alejado de lo medido, como se puede apreciar en el error relativo de este método. Los resultados en detalle por cada prueba se encuentran en el Anexo A.

Tabla 2.2. Promedio de los errores relativos con respecto a la masa de diesel real consumida, para cada uno de los métodos.

| Método           | % Error relativo promedio |
|------------------|---------------------------|
| Heywood- Oxígeno | 6,21                      |
| Heywood- Carbono | 1,81                      |
| Chan             | 4,59                      |
| Euro             | 1,72                      |
| USM              | 26,81                     |

## 2.4 Método desarrollado

El método desarrollado se basa principalmente en la ley de conservación de masa, es decir, el hidrógeno que ingresa al motor debe ser igual al que sale.

$$H_{in} = H_{out} \quad (22)$$

donde:

$H_{in}$ : masa de hidrógeno que ingresa al motor.

$H_{out}$ : masa de hidrógeno que sale del motor.

Es necesario, para poder llevar a cabo el método, conocer las concentraciones instantáneas de las emisiones del motor, el análisis elemental del diesel utilizado, el flujo másico de los gases de escape y la humedad relativa en el aire al momento de utilizar el motor. Se considera diesel de composición  $H_\alpha C_\beta O_\gamma N_\delta$  y un hidrógeno inyectado  $H_2$ . Por otro lado, la mezcla de diesel e hidrógeno en el motor se representará con una molécula equivalente  $H_m C_n O_r N_s$  donde sus coeficientes son calculados como se muestra en las ecuaciones (23) a la (28).

$$X_{diesel} = \frac{\frac{m_{diesel}}{PM_{diesel}}}{\frac{m_{diesel}}{PM_{diesel}} + \frac{m_{H,H_2in}}{PM_{H_2}}} \quad (23)$$

$$X_{H_2} = 1 - X_{diesel} \quad (24)$$

$$m = X_{diesel} \cdot \alpha + X_{H_2} \cdot 2 \quad (25)$$

$$n = X_{diesel} \cdot \beta \quad (26)$$

$$r = X_{diesel} \cdot \gamma \quad (27)$$

$$s = X_{diesel} \cdot \delta \quad (28)$$

donde:

$X_{diesel}$ : fracción molar de diesel.

$X_{H_2}$ : fracción molar de hidrogeno inyectado.

$m_{diesel}$ : masa de diesel.

$m_{H,H_2in}$ : masa de hidrógeno inyectado.

$PM_{diesel}$ : peso molecular del diesel.

$PM_{H_2}$ : peso molecular del hidrógeno inyectado.

El balance de masa planteado en la ecuación (22), se expresa de manera que solo dependa de la variable “ $m$ ”, correspondiente al subíndice del hidrógeno en la molécula

equivalente ( $H_mC_nO_rN_s$ ) y a partir del valor de “ $m$ ” correcto que logre la igualdad del balance de masa, calcular la cantidad de hidrógeno que se inyecta en el motor.

El hidrógeno que sale del motor (emisiones), es decir, la parte derecha del balance de masa de la ecuación (22), se determina de la siguiente manera:

$$H_{out}(m) = m_{H,HC} + m_{H,H_2O} + m_{H,H_2out} \quad (29)$$

donde:

$m_{H,HC}$ : masa de hidrógeno proveniente de los hidrocarburos no quemados emitidos.

$m_{H,H_2O}$ : masa de hidrógeno proveniente del agua emitida.

$m_{H,H_2out}$ : masa de hidrógeno proveniente del hidrógeno emitido.

El hidrógeno que ingresa al motor, es decir, la parte izquierda del balance de masa de la ecuación (22) se determina de la siguiente manera:

$$H_{in}(m) = m_{H,d} + m_{H,HR} + m_{H,H_2in} \quad (30)$$

donde:

$m_{H,d}$ : masa de hidrógeno proveniente del diesel.

$m_{H,HR}$ : masa de hidrógeno proveniente del agua en el aire (humedad relativa).

$m_{H,H_2in}$ : masa de hidrógeno proveniente del hidrógeno inyectado.

El método desarrollado tiene cuatro variaciones, donde se utiliza el cálculo de combustible de las dos formas que tuvieron mejor desempeño según la Tabla 2. Estas cuatro variaciones se agrupan de la siguiente manera:

- Métodos “Equivalentes”: Se considera la molécula de combustible equivalente, es decir, diesel e hidrógeno ( $H_mC_nO_rN_s$ ) para todos los cálculos. Estas dos variantes se denominan “Euro-Equivalente” y “H.Carbono-Equivalente”.
- Métodos “Diesel”: Se considera la molécula del diesel original ( $H_\alpha C_\beta O_\gamma N_\delta$ ) de combustible para los cálculos, a excepción de la concentración de agua emitida, donde se utiliza la molécula equivalente. Estas dos variantes se denominan “Euro-Diesel”, y “H.Carbono-Diesel”.

## 2.4.1 Métodos “Equivalente”

### 2.4.1.1 Hidrógeno que sale del motor ( $H_{out}$ )

#### 2.4.1.1.1 Masa de hidrógeno proveniente de los hidrocarburos no quemados ( $m_{H,HC}$ ):

El cálculo de la masa de hidrógeno que proviene de los HC se realiza en base al Reglamento de la Unión Europea [6], donde se establece una constante ( $u_{gas}$ ) para ciertos gases de escape de un motor, que permite calcular a partir de esta, las emisiones másicas instantáneas de un determinado gas de escape. Se aplica la ecuación (31), la cual en este caso en particular es aplicada para los hidrocarburos no quemados:

$$m_{HC,i} = u_{HC} \cdot \zeta_{HC} \cdot m_{escape,i} \quad (31)$$

donde:

$m_{HC,i}$ : masa de HC en el i-ésimo instante.

$u_{HC}$ : relación entre la densidad del HC y la densidad global del escape, siendo para HC y diesel 0,000482 [6].

$\zeta_{HC}$ : concentración en base húmeda de HC [ppm]

$m_{escape,i}$ : masa de gases de escape en el i-ésimo instante.

Ahora, la masa de hidrocarburos no quemados total se encuentra dada por la suma de todos los “instantes”:

$$m_{HC} = \sum_{i=1}^n m_{HC,i} \quad (32)$$

donde:

$m_{HC}$ : masa de HC total.

$n$ : cantidad de segundos que dura la prueba.

Por lo tanto, la masa total de hidrógeno que proviene de los hidrocarburos no quemados está dada por la masa de hidrocarburos multiplicada por la fracción másica del hidrógeno en el hidrocarburo en cuestión, en este caso, la concentración de hidrocarburos no quemados es expresada como metano ( $CH_4$ ).

$$m_{H,HC} = m_{HC} \cdot \frac{4 \cdot PM_H}{PM_{CH_4}} \quad (33)$$

#### 2.4.1.1.2 Masa de hidrógeno proveniente del agua emitida ( $m_{H,H_2O}$ )

Para poder determinar la cantidad de agua que se emite, se considera la siguiente ecuación de combustión, basada en la ecuación (4), pero en los reactantes se utiliza el combustible equivalente ( $H_mC_nO_rN_s$ ), que es la suma del hidrógeno inyectado y diesel.

$$\begin{aligned} w \cdot C_nH_mO_rN_s + \frac{n_{O_2}}{\phi} (O_2 + 3.773N_2) \\ = n_p (\tilde{x}_{CH_4}CH_4 + \tilde{x}_{CO}CO + \tilde{x}_{CO_2}CO_2 + \tilde{x}_{O_2}O_2 + \tilde{x}_{N_2}N_2 \\ + \tilde{x}_{NO}NO + \tilde{x}_{NO_2}NO_2 + \tilde{x}_{H_2O}H_2O + \tilde{x}_{H_2}H_2) \end{aligned} \quad (34)$$

donde:

$w$ : número instantáneo de moles de combustible equivalente.

Si se realiza un balance de carbono a la ecuación (34) y se despeja la cantidad instantánea del número de moles de los productos de escape ( $n_p$ ), se obtiene:

$$n_p = \frac{w \cdot n}{[CH_4] + [CO_2] + [CO]} \quad (35)$$

donde:

[ ]: concentración en base húmeda [%].

En el caso del “Euro-Equivalente”, para poder obtener los moles instantáneos de diesel, se utilizan la ecuaciones (16) y (17) con el fin de obtener la relación aire-combustible, considerando como combustible el equivalente de diesel e hidrógeno ( $H_mC_nO_rN_s$ ). En tanto, para el “H.Carbono-Equivalente” se utiliza la ecuación (8), considerando igualmente como combustible el equivalente. Con la relación aire-combustible calculada se utiliza la ecuación (14) para determinar la masa de aire y, finalmente, determinar el flujo de combustible instantáneo con la ecuación (1). Con la masa de combustible instantánea conocida, se procede a calcular la cantidad de moles instantáneo de combustible.

$$w = \frac{m_{comb,i}}{PM_{comb}} \quad (36)$$

donde:

$m_{comb,i}$ : masa de combustible equivalente instantáneo ( $H_mC_nO_rN_s$ ).

$PM_{comb}$ : peso molecular del combustible equivalente ( $H_mC_nO_rN_s$ ).

La masa del agua instantánea se calcula a partir del  $n_p$  y la concentración de agua:

$$m_{H_2O,i} = n_p \cdot [H_2O] \cdot PM_{H_2O} \quad (37)$$

donde:

$m_{H_2O,i}$ : masa de agua instantánea emitida.

$[H_2O]$ : concentración de agua emitida [%].

Siendo la concentración de agua  $[H_2O]$  calculada a partir de la ecuación utilizada en el libro “Internal Combustion Engine Fundamental” [4], cuando las concentraciones de gases son completamente secas:

$$[H_2O] = \frac{m}{2n} \cdot \frac{[CO] + [CO_2]}{\left[1 + \frac{[CO]}{(K \cdot [CO_2])} + \frac{m}{2n} \cdot ([CO] + [CO_2])\right]} \quad (38)$$

donde:

$[CO_2]$ : concentración de dióxido de carbono en base seca [%].

$[CO]$ : concentración de monóxido de carbono en base seca [%].

$m$ : coeficiente del hidrógeno en la molécula equivalente ( $H_mC_nO_rN_s$ ).

$n$ : coeficiente del carbono en la molécula equivalente ( $H_mC_nO_rN_s$ ).

$K$ : constante empírica determinada a partir de los datos de composición de los gases de escape, se usan comúnmente valores de 3,5 y 3,8, usando en este método 3,5.

Finalmente, la masa de hidrógeno proveniente del agua se calcula a partir de la suma de las masas instantáneas de agua calculadas y la fracción másica del hidrógeno en el agua.

$$m_{H_2O} = \sum_{i=1}^n m_{H_2O,i} \quad (39)$$

$$m_{H,H_2O} = m_{H_2O} \cdot \frac{2 \cdot PM_H}{PM_{H_2O}} \quad (40)$$

donde:

$m_{H_2O}$ : masa de agua total emitida.

$n$ : cantidad de segundos que dura la prueba.

#### 2.4.1.1.3 Masa de hidrógeno proveniente del hidrógeno emitido ( $m_{H,H_2out}$ )

La concentración de hidrógeno emitido se calcula a partir de la ecuación utilizada en el libro “Internal Combustion Engine Fundamental” [4], cuando las concentraciones de gases son completamente secas:

$$[H_2] = \frac{[CO] \cdot [H_2O]}{K \cdot [CO_2]} \quad (41)$$

Con la concentración de hidrógeno emitida se puede obtener la masa de hidrógeno instantánea emitida a partir de la ecuación (42), para, con la suma de estas, obtener la masa de hidrógeno proveniente del hidrógeno emitido:

$$m_{H_2,i} = n_p \cdot [H_2] \cdot PM_{H_2} \quad (42)$$

$$m_{H,H_2out} = \sum_{i=1}^n m_{H_2,i} \quad (43)$$

donde:

$m_{H_2,i}$ : masa de hidrógeno instantánea emitida.

$n$ : cantidad de segundos que dura la prueba.

#### 2.4.1.2 Hidrógeno que ingresa al motor ( $H_{in}$ )

##### 2.4.1.2.1 Masa de hidrógeno proveniente del diesel ( $m_{H,d}$ )

Para el cálculo de hidrógeno que proviene del diesel, es necesario conocer la cantidad de hidrógeno presente en 100 gramos de diesel, este dato proviene del análisis elemental realizado al diesel.

$$m_{H,d} = m_{diesel}[g] \cdot \frac{Análisis\ elemental_H}{100 [g]_{diesel}} \quad (44)$$

donde:

$Análisis\ elemental_H$ : masa de hidrógeno presente en 100 gramos de diesel.

La masa de diesel, en el caso del “Euro-Equivalente” se calcula a través de las ecuaciones (16) y (17) obteniendo la relación aire-combustible, considerando como combustible el equivalente del diesel e hidrógeno ( $H_mC_nO_rN_s$ ). En tanto, para el “H.Carbono-Equivalente” se utiliza la ecuación (8), considerando igualmente como combustible el equivalente. Con la relación aire-combustible calculada se utiliza la ecuación (14) para determinar la masa de aire y luego la ecuación (1) para determinar el flujo de combustible total.

#### 2.4.1.2.2 Masa de hidrógeno proveniente del agua en el aire ( $m_{H,HR}$ )

La masa de hidrógeno proveniente de la humedad del aire se calcula a partir del valor del contenido de humedad en el aire, este valor puede ser medido por un equipo, o puede ser encontrado a partir de una carta psicométrica, conociendo la humedad relativa del aire. Para determinar el agua que aporta finalmente el hidrógeno, se tiene que:

$$m_{aire\ húmedo} = m_{agua} + m_{aire\ seco} \quad (45)$$

$$CHR = \frac{m_{agua}}{m_{aire\ seco}} \quad (46)$$

donde:

$m_{aire\ húmedo}$ : masa de aire húmedo.

$m_{agua}$ : masa de agua.

$m_{aire\ seco}$ : masa de aire seco.

$CHR$ : contenido de humedad en el aire.

Reemplazando la ecuación (46) en la ecuación (45) y despejando la masa de aire seco:

$$m_{aire\ húmedo} = CHR \cdot m_{aire\ seco} + m_{aire\ seco}$$

$$m_{aire\ seco} = \frac{m_{aire\ húmedo}}{(CHR + 1)} \quad (47)$$

Por lo tanto, el agua en el aire se obtiene reemplazando la ecuación (47) en la ecuación (46):

$$m_{agua} = \left( \frac{CHR}{CHR + 1} \right) m_{aire\ húmedo} \quad (48)$$

Conociendo la masa de agua se puede determinar la masa de hidrógeno ligada a esta, con la fracción másica del hidrógeno en el agua, es decir:

$$m_{H,HR} = m_{agua} \cdot \frac{2 \cdot PM_H}{PM_{H_2O}} \quad (49)$$

#### 2.4.1.2.3 Masa de hidrógeno proveniente del hidrógeno inyectado ( $m_{H,H_2in}$ )

Por último, la masa de hidrógeno inyectado se determina reemplazando las ecuaciones (23) y (24) en la ecuación (25).

$$m = X_{diesel} \cdot \alpha + (1 - X_{diesel}) \cdot 2$$

$$m = X_{diesel} \cdot (\alpha - 2) + 2$$

$$m = \left( \frac{\frac{m_{diesel}}{PM_{diesel}}}{\frac{m_{diesel}}{PM_{diesel}} + \frac{m_{H,H_2in}}{PM_{H_2}}} \right) \cdot (\alpha - 2) + 2 \quad (50)$$

Lo que se busca es poder encontrar la masa de hidrógeno inyectado en función de la variable “ $m$ ” de la molécula equivalente, por lo que de la ecuación (50) se debe despejar  $m_{H,H_2in}$ .

$$(m - 2) \cdot \left( \frac{m_{diesel}}{PM_{diesel}} + \frac{m_{H,H_2in}}{PM_{H_2}} \right) = \left( \frac{m_{diesel}}{PM_{diesel}} \right) \cdot (\alpha - 2)$$

$$\left( \frac{m_{H,H_2in}}{PM_{H_2}} \right) = \frac{m_{diesel}}{PM_{diesel}} \left( \frac{\alpha - 2}{m - 2} \right) - \frac{m_{diesel}}{PM_{diesel}}$$

$$m_{H,H_2in} = \frac{m_{diesel}}{PM_{diesel}} \left( \frac{\alpha - 2}{m - 2} - 1 \right) \cdot PM_{H_2} \quad (51)$$

Se puede apreciar que dentro del cálculo del hidrógeno proveniente del hidrógeno inyectado ( $m_{H,H_2in}$ ) se requiere la masa de diesel, en el caso del “Euro-Equivalente” se utilizan las ecuaciones (16) y (17) para obtener la relación aire-combustible, considerando como combustible el equivalente del diesel e hidrógeno ( $H_mC_nO_rN_s$ ). En tanto, para el “H.Carbono-Equivalente” se utiliza la ecuación (8), considerando igualmente como combustible el equivalente. Con la relación aire-combustible calculada se utiliza la ecuación (14) para determinar la masa de aire y luego la ecuación (1) para determinar el flujo de combustible total.

## 2.4.2 Métodos “Diesel”

### 2.4.2.1 Hidrógeno que sale del motor ( $H_{out}$ )

#### 2.4.2.1.1 Masa de hidrógeno proveniente de los hidrocarburos no quemados ( $m_{H,HC}$ )

La obtención de la masa de hidrógeno proveniente de los hidrocarburos no quemados se calcula de la misma forma que en los métodos “Equivalentes”, es decir, a partir de las ecuaciones (31), (32) y (33).

#### 2.4.2.1.2 Masa de hidrógeno proveniente del agua emitida ( $m_{H,H_2O}$ )

Para el caso de la masa de hidrógeno proveniente del agua emitida, se considera en la ecuación de combustión, a diferencia de la ecuación (34), por separado el diesel ( $H_\alpha C_\beta O_\gamma N_\delta$ ) e hidrógeno en los reactantes.

$$\begin{aligned} z \cdot H_2 + w \cdot C_\alpha H_\beta O_\gamma N_\delta + \frac{n_{O_2}}{\phi} (O_2 + 3.773 N_2) \\ = n_p (\tilde{x}_{CH_4} CH_4 + \tilde{x}_{CO} CO + \tilde{x}_{CO_2} CO_2 + \tilde{x}_{O_2} O_2 + \tilde{x}_{N_2} N_2 \\ + \tilde{x}_{NO} NO + \tilde{x}_{NO_2} NO_2 + \tilde{x}_{H_2O} H_2O + \tilde{x}_{H_2} H_2) \end{aligned} \quad (52)$$

donde:

w: número instantáneo de moles de diesel.

z: número instantáneo de moles de hidrógeno.

Si se realiza un balance de carbono a la ecuación (52) y se despeja la cantidad instantánea del número de moles de los productos de escape ( $n_p$ ), se obtiene:

$$n_p = \frac{w \cdot \alpha}{[CH_4] + [CO_2] + [CO]} \quad (53)$$

donde:

[ ]: concentración en base húmeda [%].

En el caso del “Euro-Diesel”, para determinar los moles instantáneos de diesel, se utilizan las ecuaciones (16) y (17) para obtener la relación aire-combustible, considerando como combustible el diesel ( $H_\alpha C_\beta O_\gamma N_\delta$ ). En tanto, para el “H.Carbono-Diesel” se utiliza la ecuación (8), considerando igualmente como combustible el diesel. Con la relación aire-combustible calculada se utiliza la ecuación (14) para determinar la masa de aire y, finalmente, determinar el flujo de combustible instantáneo con la ecuación (1). Con la masa de combustible instantánea conocida, se procede a calcular la cantidad de moles instantáneos de diesel.

$$w = \frac{m_{diesel,i}}{PM_{diesel}} \quad (54)$$

donde:

$m_{diesel,i}$ : masa de diesel instantáneo.

$PM_{diesel}$ : peso molecular del diesel.

Finalmente, la masa de hidrógeno proveniente del agua se calcula a partir de las mismas ecuaciones que en los métodos “Equivalentes”, es decir, ecuaciones (37), (38), (39) y (40).

#### 2.4.2.1.3 Masa de hidrógeno proveniente del hidrógeno emitido ( $m_{H,H_2out}$ )

La obtención de la masa de hidrógeno proveniente del hidrógeno emitido se calcula de la misma forma que en los métodos “Equivalentes”, es decir, a partir de las ecuaciones (41), (42) y (43).

#### 2.4.2.2 Hidrógeno que ingresa al motor ( $H_{in}$ )

##### 2.4.2.2.1 Masa de hidrógeno proveniente del diesel ( $m_{H,d}$ )

Se utiliza, al igual que en los métodos “Equivalentes”, la ecuación (44), siendo la diferencia, la manera en la que se calcula la masa de diesel en la ecuación, en el caso del “Euro-Diesel” se utilizan las ecuaciones (16) y (17) para obtener la relación aire-combustible, considerando como combustible el diesel ( $H_\alpha C_\beta O_\gamma N_\delta$ ). En tanto, para el “H.Carbono-Diesel” se utiliza la ecuación (8), considerando igualmente como combustible el diesel. Con la relación aire-combustible calculada se utiliza la ecuación (14) para determinar la masa de aire y luego la ecuación (1) para determinar el flujo de combustible total.

##### 2.4.2.2.2 Masa de hidrógeno proveniente del agua en el aire ( $m_{H,HR}$ )

La obtención de la masa de hidrógeno proveniente del agua en el aire se calcula de la misma forma que en los métodos “Equivalentes”, es decir, se obtiene utilizando desde la ecuación (45) a la ecuación (49).

##### 2.4.2.2.3 Masa de hidrógeno proveniente del hidrógeno inyectada ( $m_{H,H_2in}$ )

Se utilizan, al igual que en los métodos “Equivalentes”, las ecuaciones (50) y (51), a excepción de la manera en la que se calcula la masa de diesel en la ecuación, en el caso del “Euro-Diesel” se utilizan las ecuaciones (16) y (17) para obtener la relación aire-combustible, considerando como combustible el diesel ( $H_\alpha C_\beta O_\gamma N_\delta$ ). En tanto, para el “H.Carbono-Diesel” se utiliza la ecuación (8), considerando igualmente como combustible el diesel. Con la relación aire-combustible calculada se utiliza la ecuación (14) para determinar la masa de aire y luego la ecuación (1) para determinar el flujo de combustible total.

### 3 Resultados

Para la validación del método desarrollado, se trabaja con las pruebas realizadas en la sede de Viña del Mar de la USM, donde se llevan a cabo mediciones a una camioneta Mitsubishi L200, midiendo las concentraciones de CO<sub>2</sub>, CO, O<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, HC, H<sub>2</sub>O, la cantidad de humedad en el aire, el flujo másico de gases de escape, el consumo de diesel y la cantidad de hidrógeno inyectado. Además, se tiene el análisis elemental del diesel utilizado en las pruebas.

Las pruebas realizadas son ciclos de conducción, los cuales se dividen en cuatro grupos:

- Línea Base: Camioneta funcionando únicamente con diesel.
- Mapa 1: Camioneta funcionando con hidrógeno y diesel, con un porcentaje de sustitución energética de H<sub>2</sub> de 2%.
- Mapa 2: Camioneta funcionando con hidrógeno y diesel con un porcentaje de sustitución energética de H<sub>2</sub> de 9%.
- Mapa 3: Camioneta funcionando con hidrógeno y diesel con un porcentaje de sustitución energética de H<sub>2</sub> de 13%.

El indicador para corroborar que los cálculos son correctos, será a partir del balance de masa de la ecuación (22) donde las masas de hidrógeno deben ser iguales, por lo tanto, la resta entre ellas debe ser igual a cero.

$$H_{in} - H_{out} = 0 \quad (55)$$

Además, el porcentaje de error de la masa de hidrógeno calculada corresponde al error relativo entre el hidrógeno inyectado (experimental), medido en la prueba y el calculado a partir del método desarrollado (teórico), tal como se expresa en la ecuación (21).

#### 3.1 Línea Base

Se realizan diez pruebas con la camioneta operando únicamente con diesel como combustible, es por esto que los métodos “Diesel” son los únicos que se pueden aplicar. Si bien en estas pruebas no se predice la masa de hidrógeno inyectado, debido a que es cero, aplicar el método desarrollado en Línea Base sirve para apreciar si el método está calculando de manera correcta la masa de hidrógeno que ingresa y que sale del motor, haciendo que se cumpla la ecuación (55).

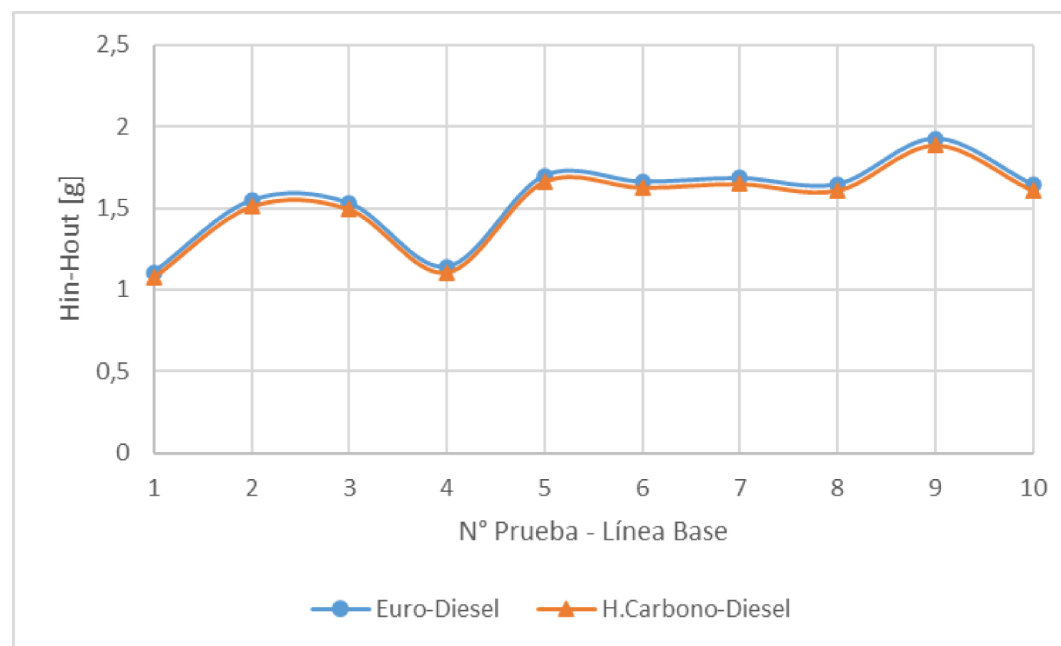


Figura 3.1. Masa de hidrógeno que ingresa al motor menos masa de hidrógeno que sale del motor Línea Base, para los Métodos “Euro-Diesel” y “H.Carbono-Diesel”.

Se puede apreciar en la Figura 13, que la resta entre las masas de hidrógeno no da exactamente cero, sino que valores cercanos. En “Euro-Diesel” se tiene un promedio de 1,56 gramos para la ecuación (55), mientras que en “H.Carbono-Diesel” es de 1,52 gramos.

### 3.2 Sustitución energética 2%

Se realizan ocho pruebas la camioneta opera con diesel e hidrógeno, con un porcentaje de sustitución energética de hidrógeno de un 2% promedio. Para este primer mapa se utilizan las cuatro variaciones del método desarrollado, cambiando el valor de “m” correspondiente al subíndice del hidrógeno en la molécula equivalente ( $H_mC_nO_rN_s$ ).

Tabla 3.1. Masa de hidrógeno inyectado en el motor para pruebas con sustitución 2%.

| N° Prueba | Masa de hidrógeno inyectado [g] |
|-----------|---------------------------------|
| 1         | 7,73                            |
| 2         | 6,26                            |
| 3         | 6,34                            |
| 5         | 6,42                            |
| 6         | 7,45                            |
| 7         | 5,64                            |
| 8         | 7,07                            |
| 9         | 6,06                            |

### 3.2.1 “Euro-Equivalente”

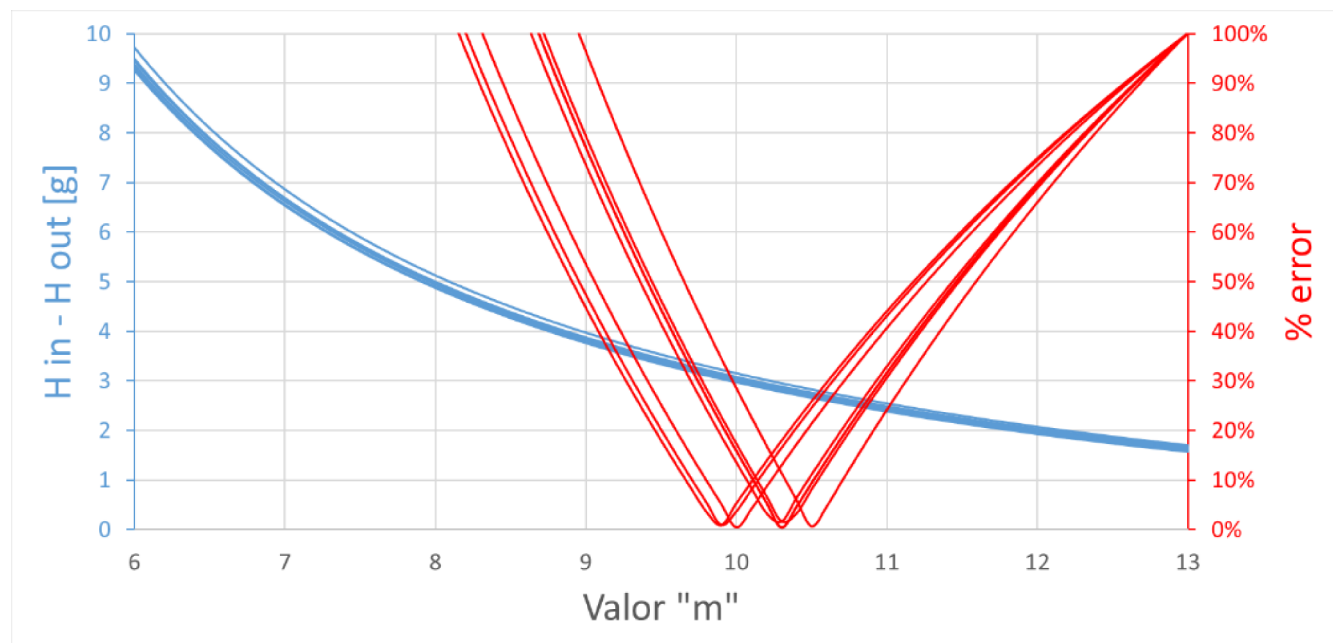


Figura 3.2. Variación de la masa de hidrógeno que ingresa al motor menos la que sale del motor y el porcentaje de error al cambiar el valor de “m”; para “Euro-Equivalente” en sustitución 2%..

El menor porcentaje de error en la masa de hidrógeno inyectada se obtiene en un valor de “m” de 10,16 promedio, asociado a este valor se tiene que la resta entre las masas de hidrogeno que ingresan y salen del motor es de 1,98 gramos.

### 3.2.2 “Euro-Diesel”

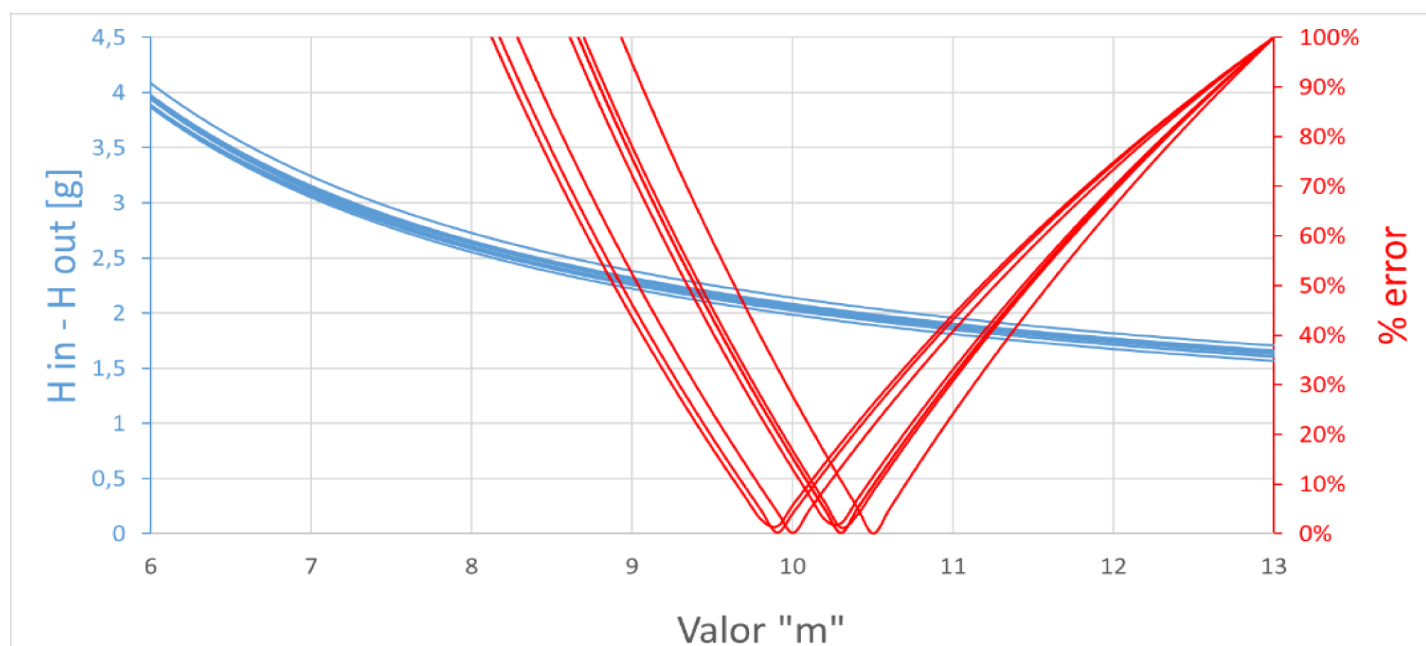


Figura 3.3. Variación de la masa de hidrógeno que ingresa al motor menos la que sale del motor y el porcentaje de error al cambiar el valor de “m”; para “Euro-Diesel” en sustitución 2%..

El menor porcentaje de error en la masa de hidrógeno inyectada se obtiene en un valor de “m” de 10,19 promedio, asociado a este valor se tiene que la resta entre las masas de hidrogeno que ingresan y salen del motor es de 2,02 gramos.

### 3.2.3 “H.Carbono-Equivalente”

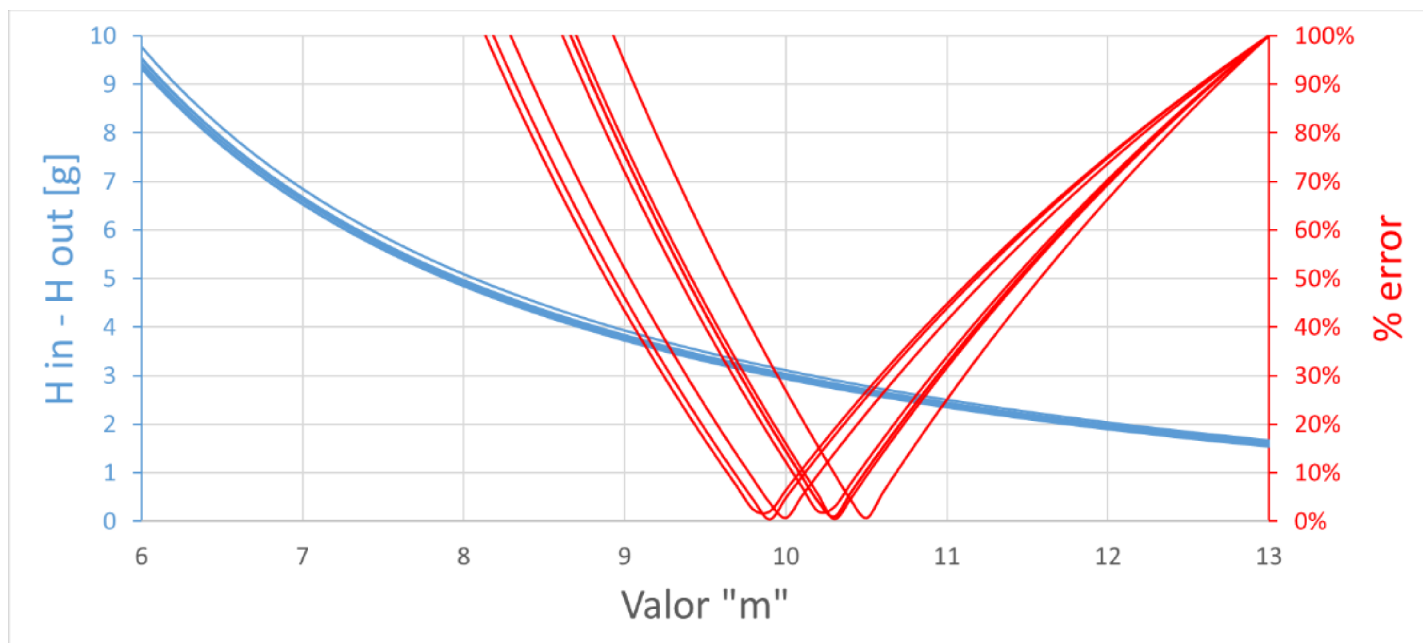


Figura 3.4. Variación de la masa de hidrógeno que ingresa al motor menos la que sale del motor y el porcentaje de error al cambiar el valor de “m”; para “H.Carbono-Equivalente” en sustitución 2%.

El menor porcentaje de error en la masa de hidrógeno inyectada se obtiene en un valor de “m” de 10,13 promedio, asociado a este valor se tiene que la resta entre las masas de hidrogeno que ingresan y salen del motor es de 2,91 gramos.

### 3.2.4 “H.Carbono-Diesel”

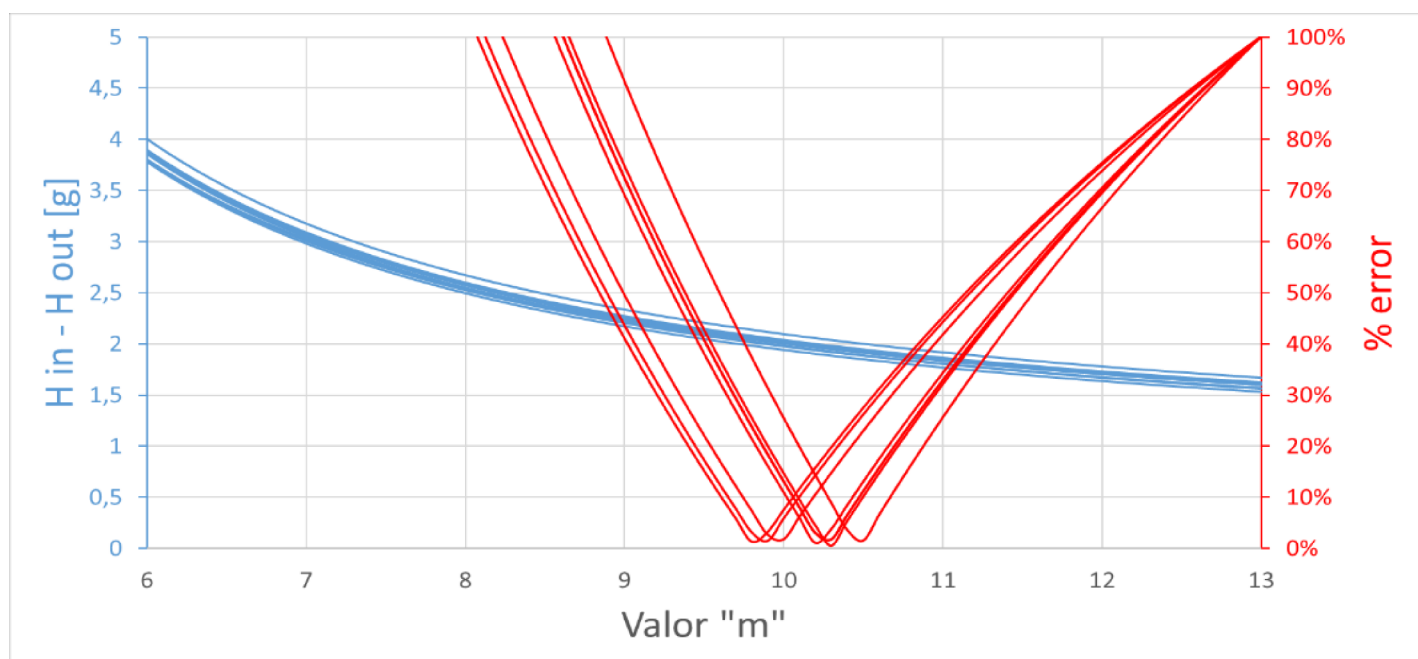


Figura 3.5. Variación de la masa de hidrógeno que ingresa al motor menos la que sale del motor y el porcentaje de error al cambiar el valor de “m”; para “H.Carbono-Diesel” en sustitución 2%.

El menor porcentaje de error en la masa de hidrógeno inyectada se obtiene en un valor de “m” de 10,16 promedio, asociado a este valor se tiene que la resta entre las masas de hidrogeno que ingresan y salen del motor es de 1,98 gramos.

## 3.3 Sustitución energética 9%

Se realizan cinco pruebas a la camioneta con un porcentaje de sustitución energética de hidrógeno de un 9% promedio. Para este segundo mapa se utilizan las cuatro variaciones del método desarrollado, cambiando el valor de “m” correspondiente al subíndice del hidrógeno en la molécula equivalente ( $H_mC_nO_rN_s$ ).

Tabla 3.2. Masa de hidrógeno inyectado en el motor para pruebas con sustitución 9%.

| N° Prueba | Masa de hidrógeno inyectado [g] |
|-----------|---------------------------------|
| 1         | 29,65                           |
| 4         | 23,98                           |
| 5         | 33,47                           |
| 6         | 17,41                           |
| 7         | 15,36                           |

3.3.1 “Euro-Equivalente”

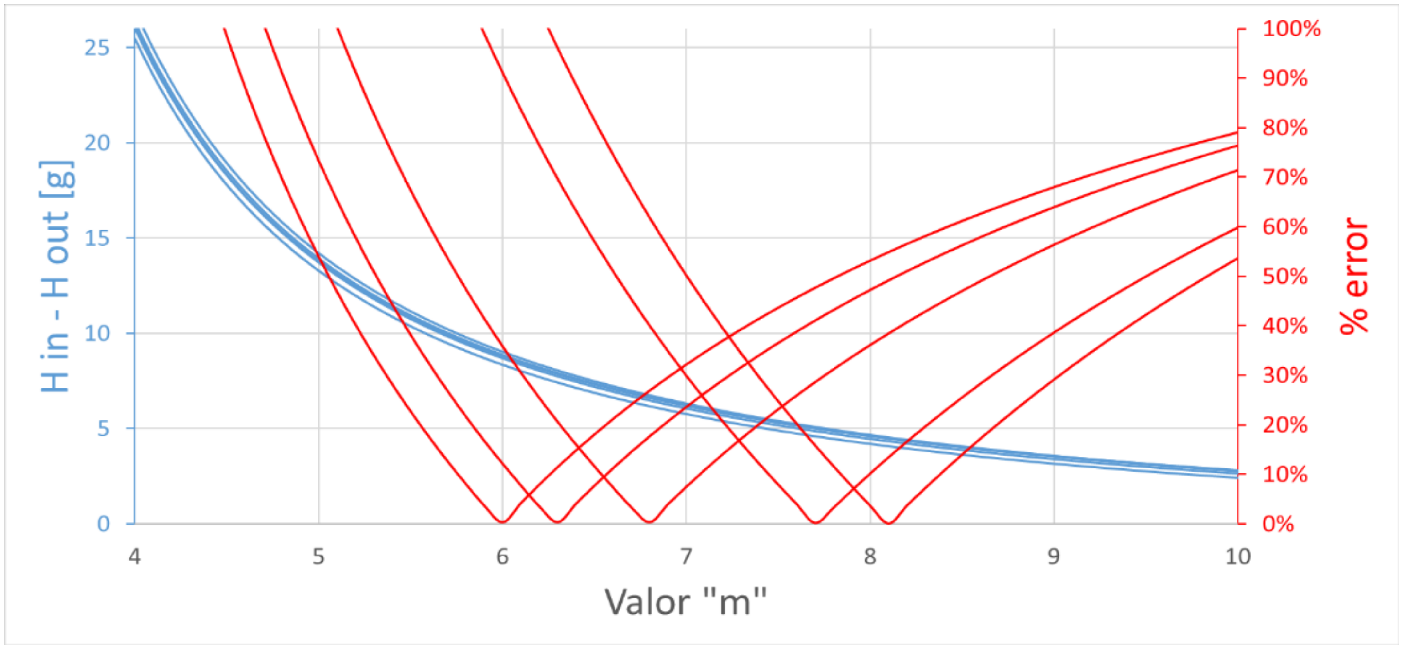


Figura 3.6. Variación de la masa de hidrógeno que ingresa al motor menos la que sale del motor y el porcentaje de error al cambiar el valor de “m”; para “Euro-Equivalente” en sustitución 9%.

El menor porcentaje de error en la masa de hidrógeno inyectada se obtiene en un valor de “m” de 6,98 promedio, asociado a este valor se tiene que la resta entre las masas de hidrogeno que ingresan y salen del motor es de 6,45 gramos.

3.3.2 “Euro-Diesel”

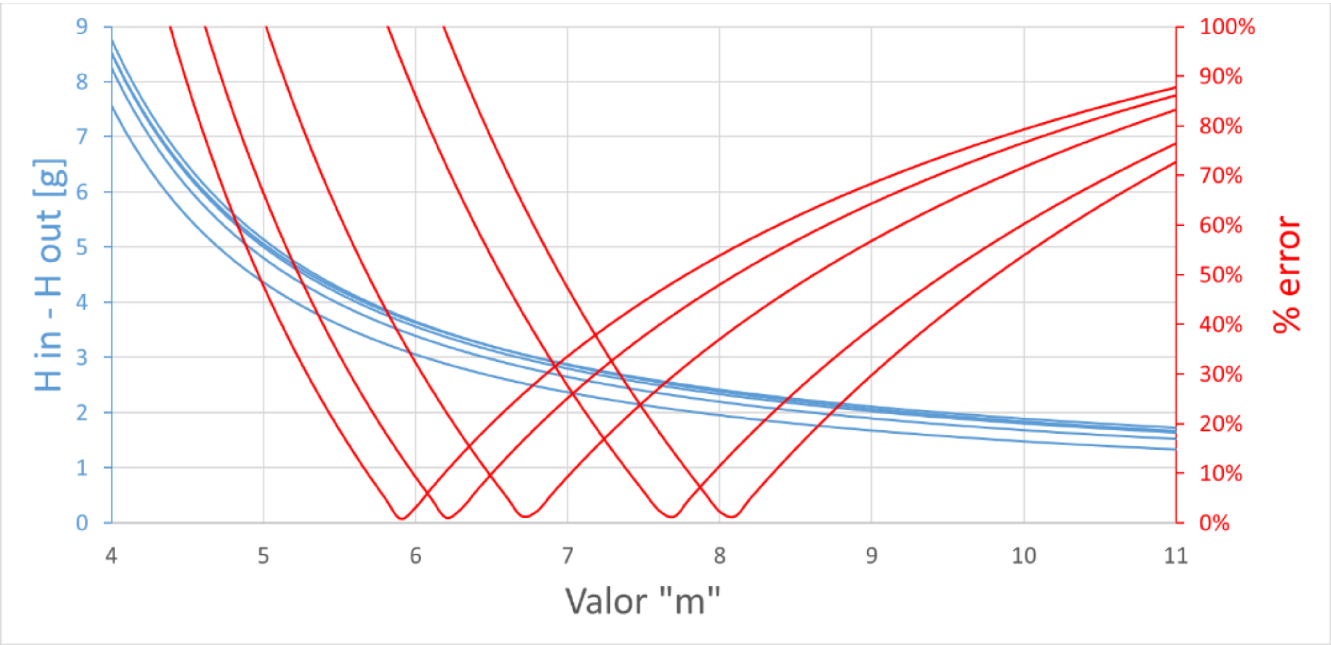


Figura 3.7. Variación de la masa de hidrógeno que ingresa al motor menos la que sale del motor y el porcentaje de error al cambiar el valor de “m”; para “Euro-Diesel” en sustitución 9%.

El menor porcentaje de error en la masa de hidrógeno inyectada se obtiene en un valor de “m” de 6,92 promedio, asociado a este valor se tiene que la resta entre las masas de hidrogeno que ingresan y salen del motor es de 2,84 gramos.

3.3.3 “H.Carbono-Equivalente”

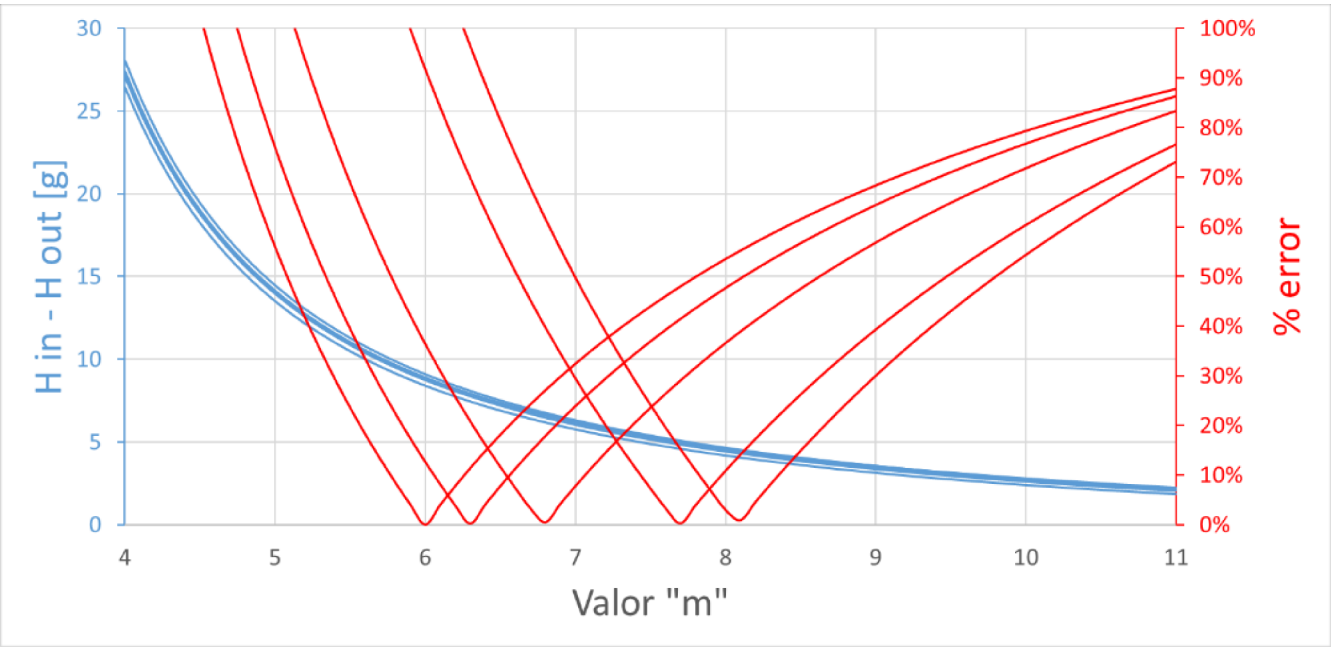


Figura 3.8. Variación de la masa de hidrógeno que ingresa al motor menos la que sale del motor y el porcentaje de error al cambiar el valor de “m”; para “H.Carbono-Equivalente” en sustitución 9%.

El menor porcentaje de error en la masa de hidrógeno inyectada se obtiene en un valor de “m” de 6,98 promedio, asociado a este valor se tiene que la resta entre las masas de hidrogeno que ingresan y salen del motor es de 6,45 gramos.

3.3.4 “H.Carbono-Diesel”

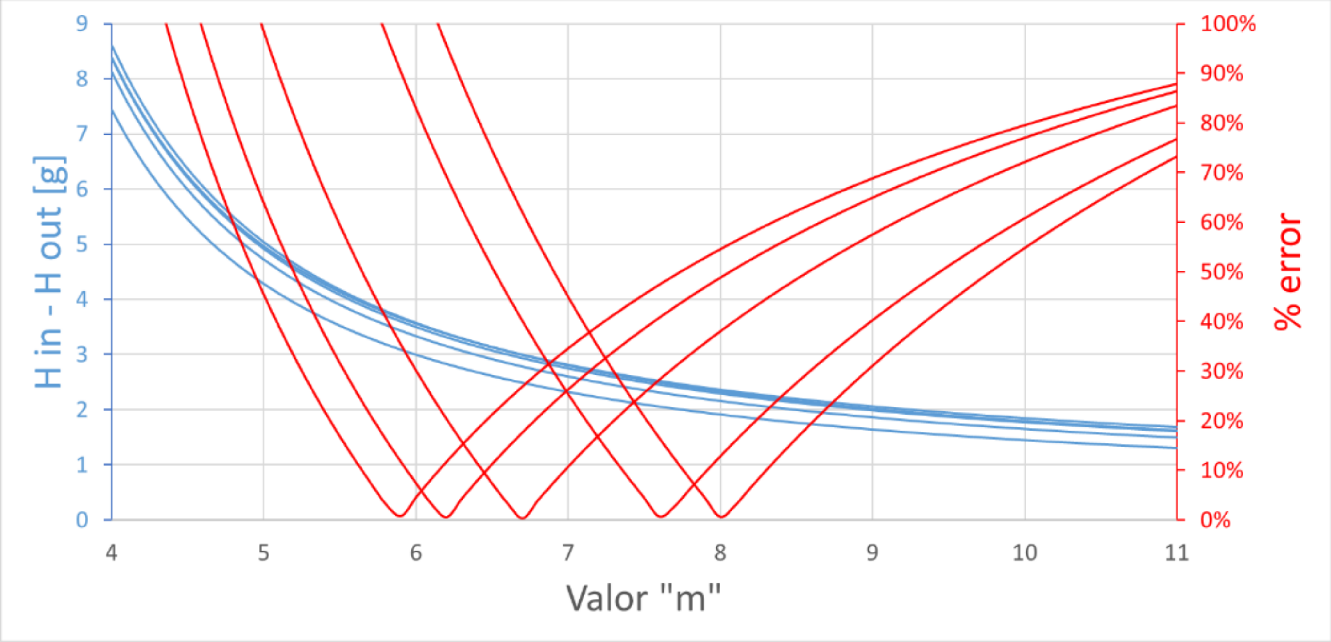


Figura 3.9. Variación de la masa de hidrógeno que ingresa al motor menos la que sale del motor y el porcentaje de error al cambiar el valor de “m”; para “H.Carbono-Diesel” en sustitución 9%.

El menor porcentaje de error en la masa de hidrógeno inyectada se obtiene en un valor de “m” de 6,88 promedio, asociado a este valor se tiene que la resta entre las masas de hidrogeno que ingresan y salen del motor es de 2,80 gramos.

3.4 Sustitución energética 13%

Se realizan nueve pruebas con un porcentaje de sustitución energética de hidrógeno de un 13% promedio. Para este tercer y último mapa se utilizan las cuatro variaciones del método desarrollado, cambiando el valor de “m” correspondiente al subíndice del hidrógeno en la molécula equivalente ( $H_mC_nO_rN_s$ ).

Tabla 3.3. Masa de hidrógeno inyectado en el motor para cada prueba con sustitución 13%.

| Nº Prueba | Masa de hidrógeno inyectado [g] |
|-----------|---------------------------------|
| 1         | 42,65                           |
| 2         | 39,00                           |
| 4         | 40,63                           |
| 5         | 40,10                           |
| 6         | 40,10                           |
| 7         | 36,83                           |
| 8         | 36,89                           |
| 9         | 37,03                           |
| 10        | 36,14                           |

### 3.4.1 “Euro-Equivalente”

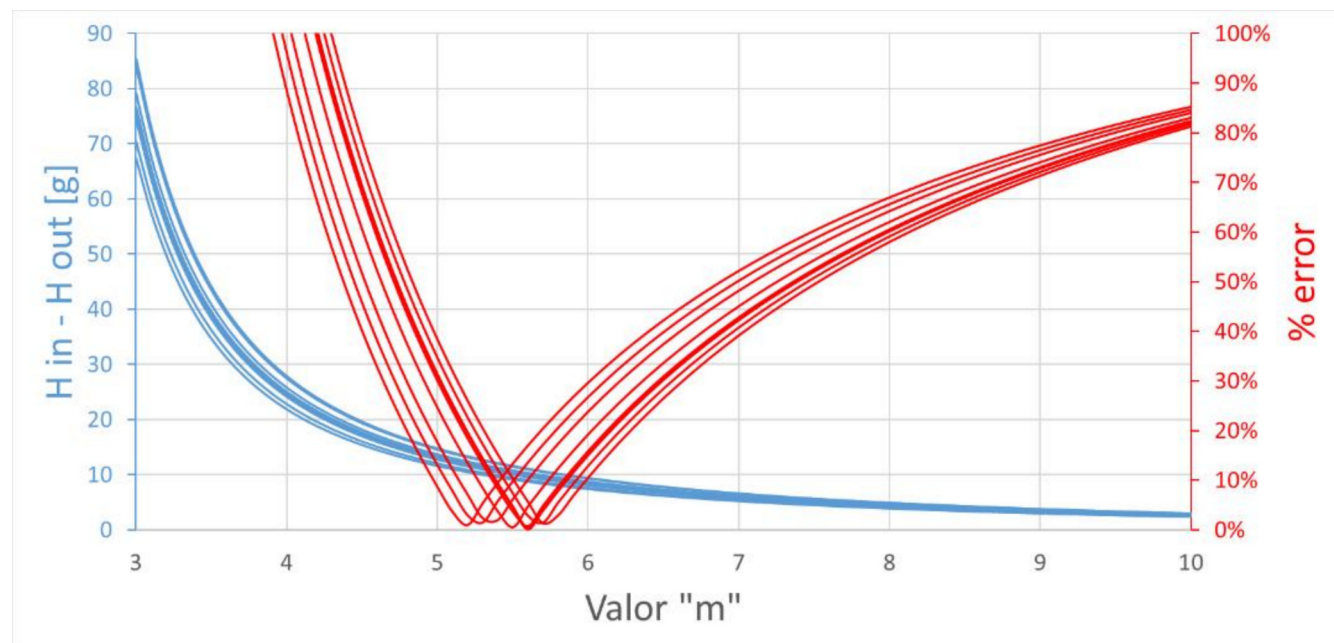


Figura 3.10. Variación de la masa de hidrógeno que ingresa al motor menos la que sale del motor y el porcentaje de error al cambiar el valor de “m”; para “Euro-Equivalente” en sustitución 13%.

El menor porcentaje de error en la masa de hidrógeno inyectada se obtiene en un valor de “m” de 5,49 promedio, asociado a este valor se tiene que la resta entre las masas de hidrogeno que ingresan y salen del motor es de 10,40 gramos.

### 3.4.2 “Euro-Diesel”

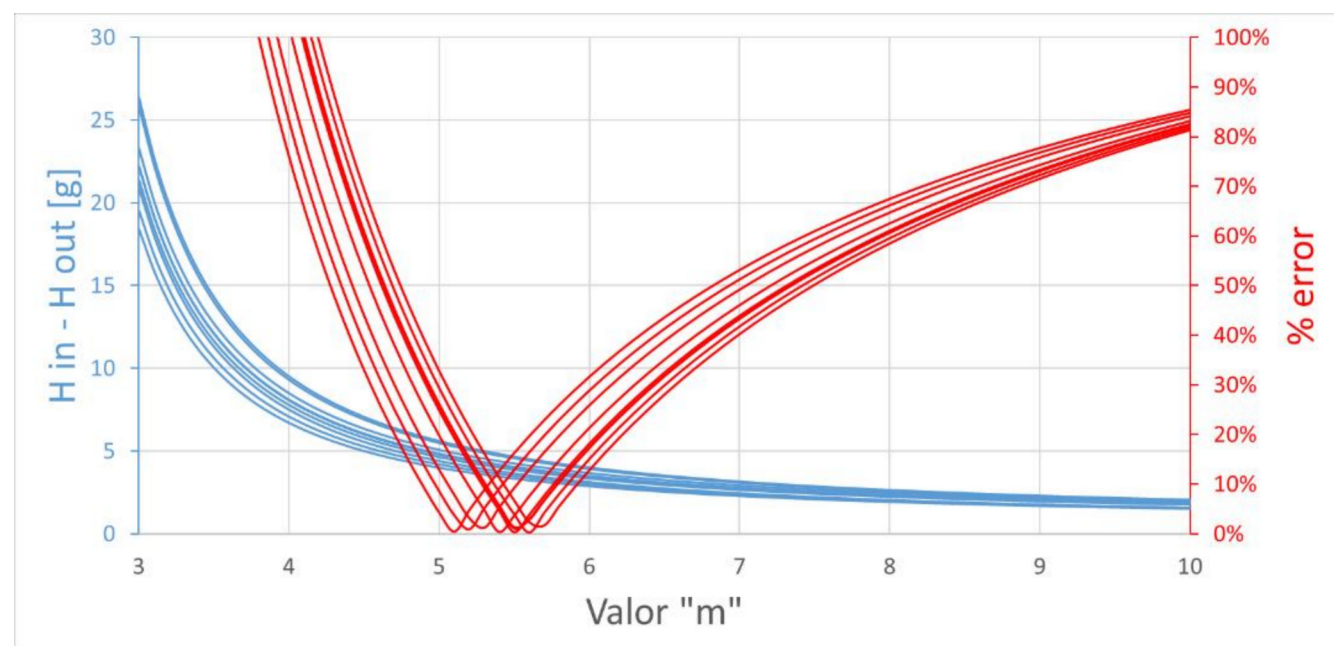


Figura 3.11. Variación de la masa de hidrógeno que ingresa al motor menos la que sale del motor y el porcentaje de error al cambiar el valor de “m”; para “Euro-Diesel” en sustitución 13%.

El menor porcentaje de error en la masa de hidrógeno inyectada se obtiene en un valor de “m” de 5,44 promedio, asociado a este valor se tiene que la resta entre las masas de hidrogeno que ingresan y salen del motor es de 4,09 gramos.

### 3.4.3 “H.Carbono-Equivalente”

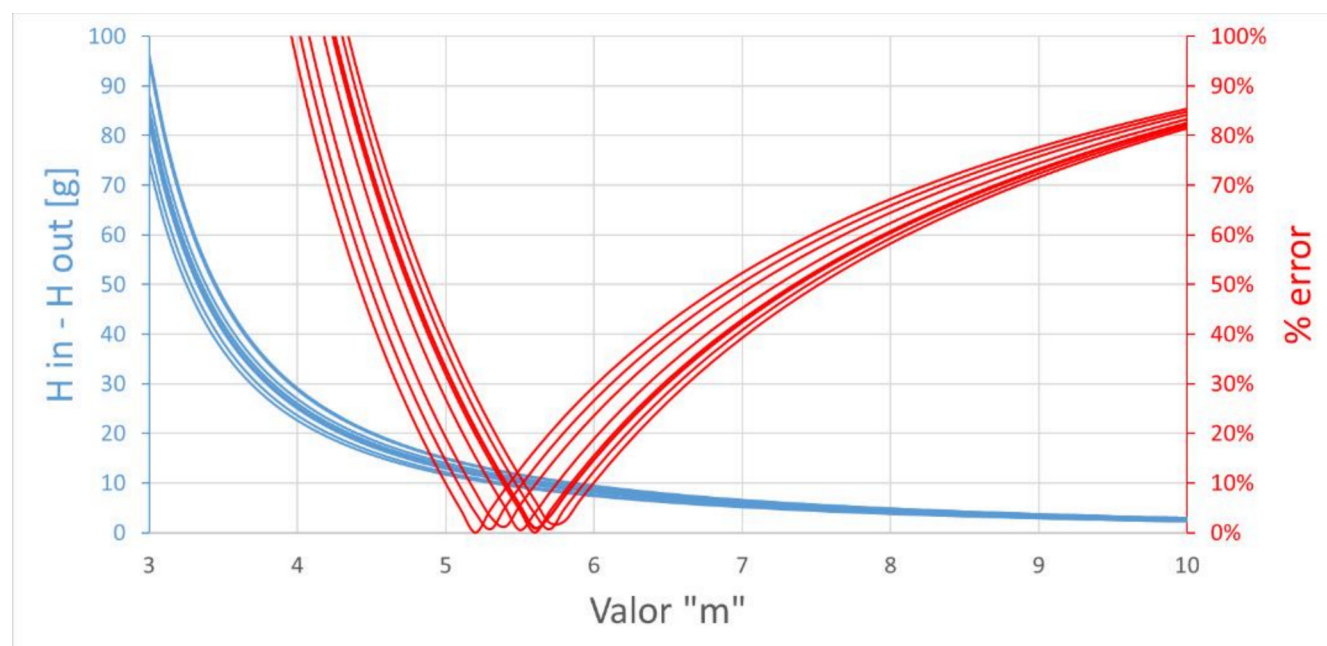


Figura 3.12. Variación de la masa de hidrógeno que ingresa al motor menos la que sale del motor y el porcentaje de error al cambiar el valor de “m”; para “H.Carbono-Equivalente” en sustitución 13%.

El menor porcentaje de error en la masa de hidrógeno inyectada se obtiene en un valor de “m” de 5,54 promedio, asociado a este valor se tiene que la resta entre las masas de hidrogeno que ingresan y salen del motor es de 10,36 gramos.

### 3.4.4 “H.Carbono-Diesel”

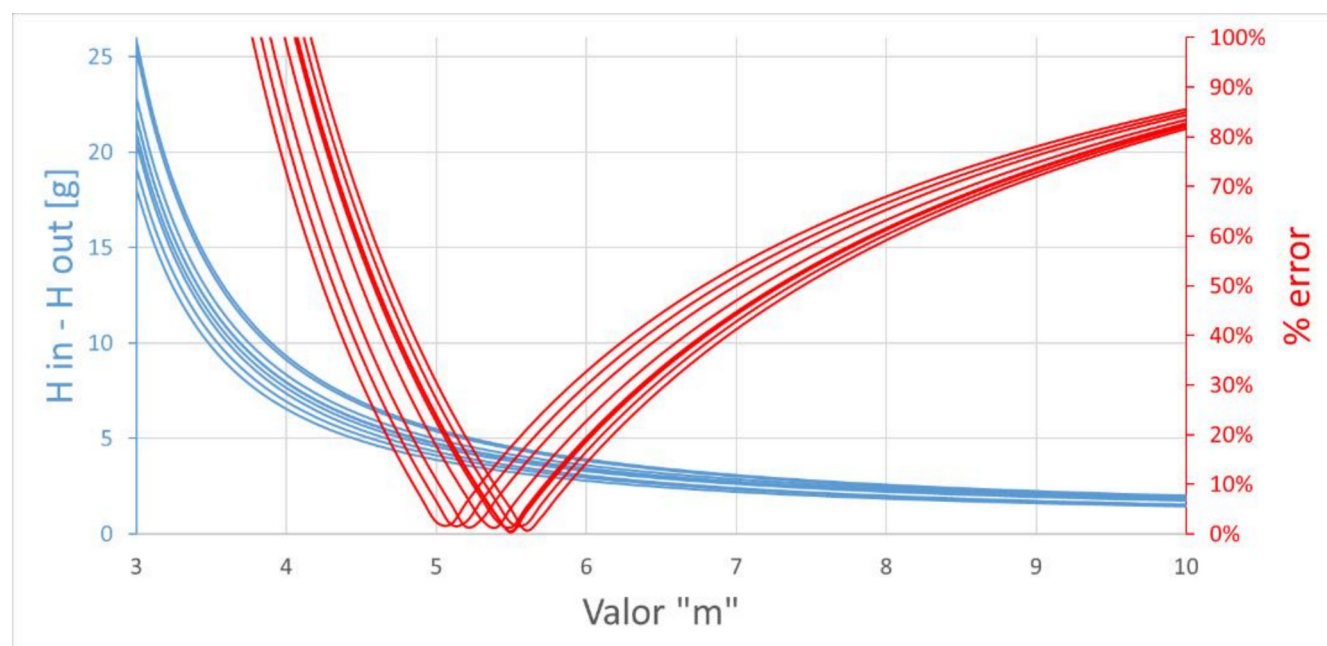


Figura 3.13. Variación de la masa de hidrógeno que ingresa al motor menos la que sale del motor y el porcentaje de error al cambiar el valor de “m”; para “H.Carbono-Diesel” en sustitución 13%.

El menor porcentaje de error en la masa de hidrógeno inyectada se obtiene en un valor de “m” de 5,35 promedio, asociado a este valor se tiene que la resta entre las masas de hidrogeno que ingresan y salen del motor es de 4,05 gramos.

## 3.5 Resumen de Resultados

A partir de la línea base se puede apreciar que el método funciona con un pequeño margen de entre uno y dos gramos de diferencia entre la masa de hidrógeno que entra versus la que sale.

Al momento de analizar los resultados de los mapas donde si existe inyección de hidrógeno, los métodos para cada uno de los mapas funcionan bien con un valor de “m” bastante parecidos entre sí (Figura 16). La diferencia entre las variantes del método radica

en el valor de la resta entre la masa de hidrógeno ingresante y la saliente, donde los métodos “Diesel” obtienen un valor menor (Figura 17). Estos valores pueden ser revisados en detalle en el Anexo B.

Por otro lado, se puede ver que las curvas en los diferentes mapas se encuentran más y en otros menos separadas, esto se debe a la variación en la masa de hidrógeno inyectada dentro de cada mapa, es decir, el mapa que tiene una varianza más alta en la masa de hidrógeno inyectado en el motor tiene las curvas de error más separadas entre sí, es por esto que los resultados de las pruebas con sustitución promedio de un 9% están más separados entre sí.

Tabla 3.4. Varianza de la masa de hidrógeno inyectada en cada mapa.

| Sustitución energética | Varianza |
|------------------------|----------|
| 2%                     | 0,52     |
| 9%                     | 59,92    |
| 13%                    | 4,92     |

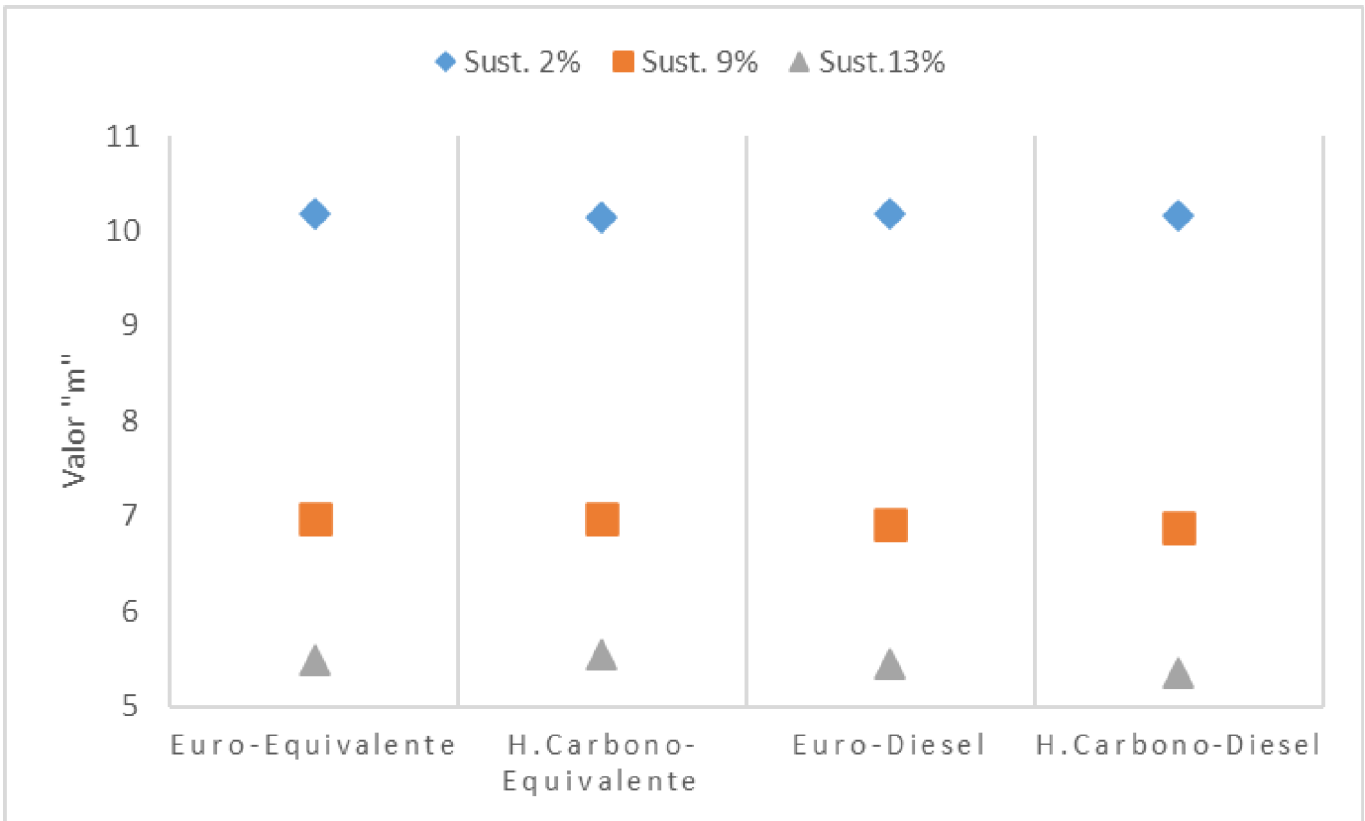


Figura 3.14. Valor de “m” correcto para cada mapa y variante del método.

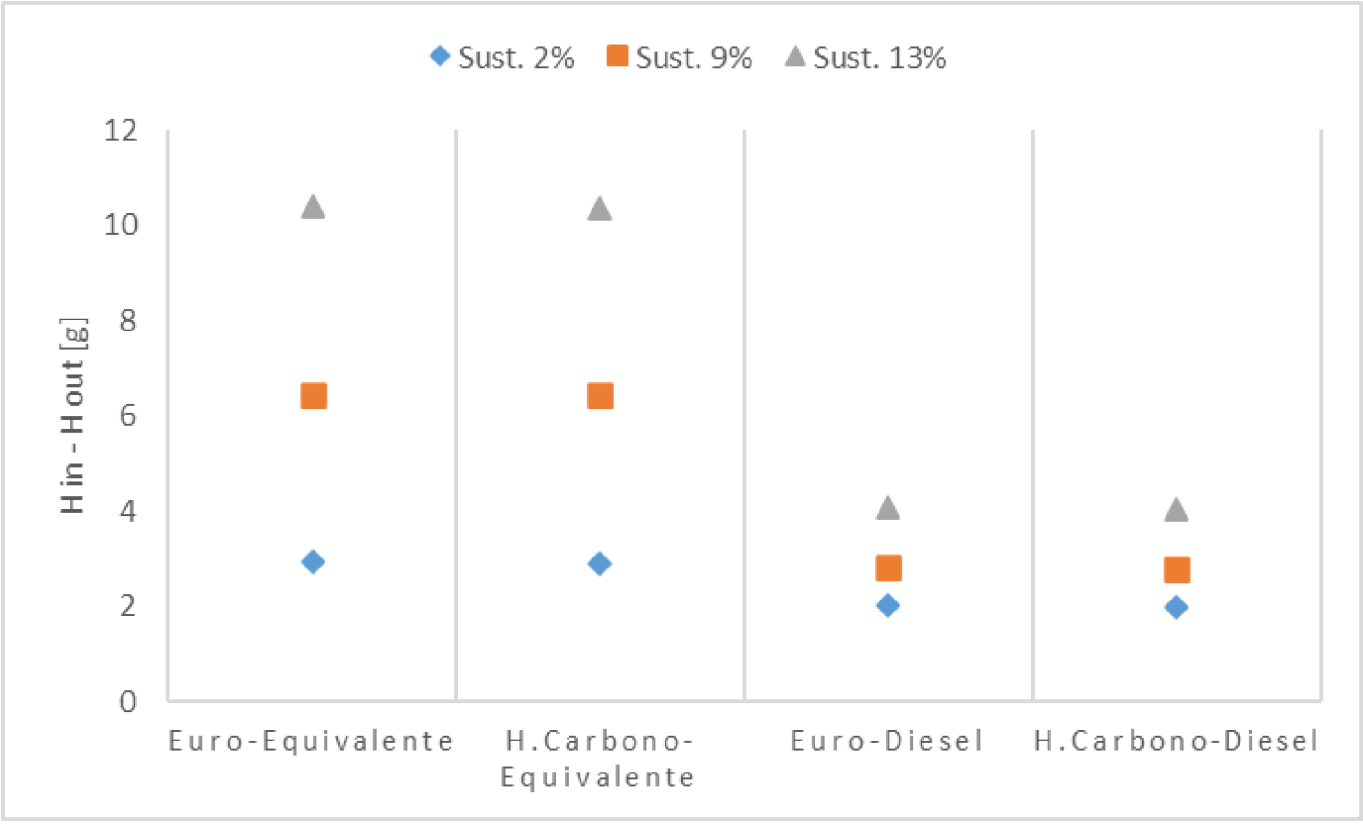


Figura 3.15. Diferencia entre hidrógeno que entra y sale del motor para cada mapa y variante del método.

## 4 Conclusiones

De acuerdo con el objetivo general, se logra desarrollar un método que predice la masa de hidrógeno inyectada en un motor que trabaja en modo dual. Este método se basa en los existentes para la de predicción de diesel a partir de la relación aire-combustible. El “Método Euro” y el “Método Heywood-Carbono” son los que consiguen mejores resultados en las pruebas realizadas, con un 1,72% y 1,82% de error relativo, respectivamente. Por lo tanto, en el método diseñado, se procede a utilizar estos dos para el cálculo de la relación aire-combustible y a través de esta, obtener la masa de combustible.

El método desarrollado tiene cuatro variaciones que se pueden agrupar en dos categorías, las que utilizan la fórmula del diesel ( $H_\alpha C_\beta O_\gamma N_\delta$ ), denominadas “Euro-Diesel” y “H.Carbono-Diesel”, y las que utilizan la fórmula de un combustible equivalente (diesel e hidrógeno inyectado ( $H_m C_n O_r N_s$ )), denominadas “Euro-Equivalente” y “H.Carbono-Equivalente”. Se busca encontrar el valor de “m” que logra la igualdad en el balance de masa ( $H_{in} = H_{out}$ ), y este es el que se utiliza para calcular la masa de hidrógeno inyectado en el motor.

La diferencia obtenida entre el hidrógeno que ingresa y sale del motor al operar únicamente con diesel, es de 1,56 [g] para el “Euro-Diesel” y 1,52 [g] para el “H.Carbono-Diesel”, siendo esto un 1% de la masa de hidrógeno circulante en el motor ( $H_{in} \approx H_{out} \approx 130$  [g]). Por otro lado, para los ciclos de conducción con sustitución de hidrógeno, la diferencia entre la masa de hidrógeno que ingresa y sale del motor, es mayor en los métodos “Equivalentes” en un 44%, 126% y 144% en los mapas con 2%, 9% y 13% de sustitución energética, respectivamente. Sin embargo, el hecho de que esta diferencia aumente con el porcentaje de sustitución no hace que suba el error relativo en la predicción de la masa de hidrógeno inyectado, el cual se mantiene en un 1% dando cuenta que el método funciona de manera precisa.

A diferencia de lo anterior, el valor de “m” correcto para el cálculo de la masa de hidrógeno inyectada en el motor es similar entre las cuatro variables del método (en todos los porcentajes de sustitución), con una variación entre sus valores de un 1% promedio.

En resumen, todos los métodos logran predecir la masa de hidrógeno inyectada de manera correcta y precisa, teniendo en cuenta que los del grupo “Diesel” cuentan con mayor precisión en cumplir el balance de masa, siendo en específico el “H.Carbono-Diesel” el más preciso en este ámbito, con 1,98 [g] de diferencia con 2% de sustitución, 2,80 [g] con 9% y 4,05 [g] con 13%.

A pesar de que el método desarrollado logra predecir la masa de hidrógeno inyectada (en sus cuatro variantes y en todas las pruebas) no se ha encontrado una forma sistemática de hallar el valor correcto de “m”, con el cual la predicción de la masa de hidrógeno tenga un bajo error.

## 5 Trabajos Futuros

A continuación, se presentan propuestas para la mejora y/o complemento de lo realizado en el presente trabajo:

- Encontrar una forma sistemática de hallar el valor de “m” a partir del cual se calcula la masa de hidrógeno inyectado.
- Realizar mediciones a ciclos de conducción donde la sustitución de hidrógeno sea mayor, para conocer hasta que porcentaje de sustitución puede trabajar el método diseñado.
- Ejecutar pruebas en ruta, utilizando equipos portátiles para la toma de datos.
- Llevar a cabo pruebas estacionarias para ver cómo se comporta el método.

## 6 Bibliografía

- [1] Ministerio de Energía, Gobierno de Chile, “Plan Nacional de Eficiencia Energética 2022-2026”, Santiago de Chile. Febrero 2022.
- [2] Ministerio de Energía, Gobierno de Chile, “Estrategia Nacional de Hidrógeno Verde”, Santiago de Chile. Noviembre 2020.
- [3] DieselNet, “EU: Cars and Light trucks, Emission Standards Europe: Cars and Light Trucks. [en línea] <<https://dieselnet.com/standards/eu/ld.php#intro>> [consulta: 23 junio 2023].
- [4] John B. Heywood, “Internal Combustion Engine Fundamental” 2ª ed, Massachusetts Institute of Technology, 1988.
- [5] S. H. Chan, “An exhaust emissions based air-fuel ratio calculation for internal combustion engines”, Nanyang Technological University, Singapore, 1996.
- [6] Unión Europea, “Reglamento (CE) n°. 692/2008 en lo que concierne a las emisiones procedentes de turismos y vehículos comerciales ligeros (Euro 6), 2016, pp.44-47.
- [7] J. R. Roncagliolo Z., “Análisis de Gases de Escape de un Motor ECh”, Universidad Técnica Federico Santa María, 2019.
- [8] P. A. Vives Jamett. “Desarrollo de una metodología para la estimación de consumo específico de combustible a partir de mediciones de emisiones en un motor a gas de ciclo Otto Kubota DG-972”. Memoria (Ing. Civil Mecánico). Valparaíso. UTFSM. Departamento de Ingeniería Mecánica. 2023.

# 7 Anexos

## 7.1 Anexo A: Estimación de consumo diesel con métodos existentes.

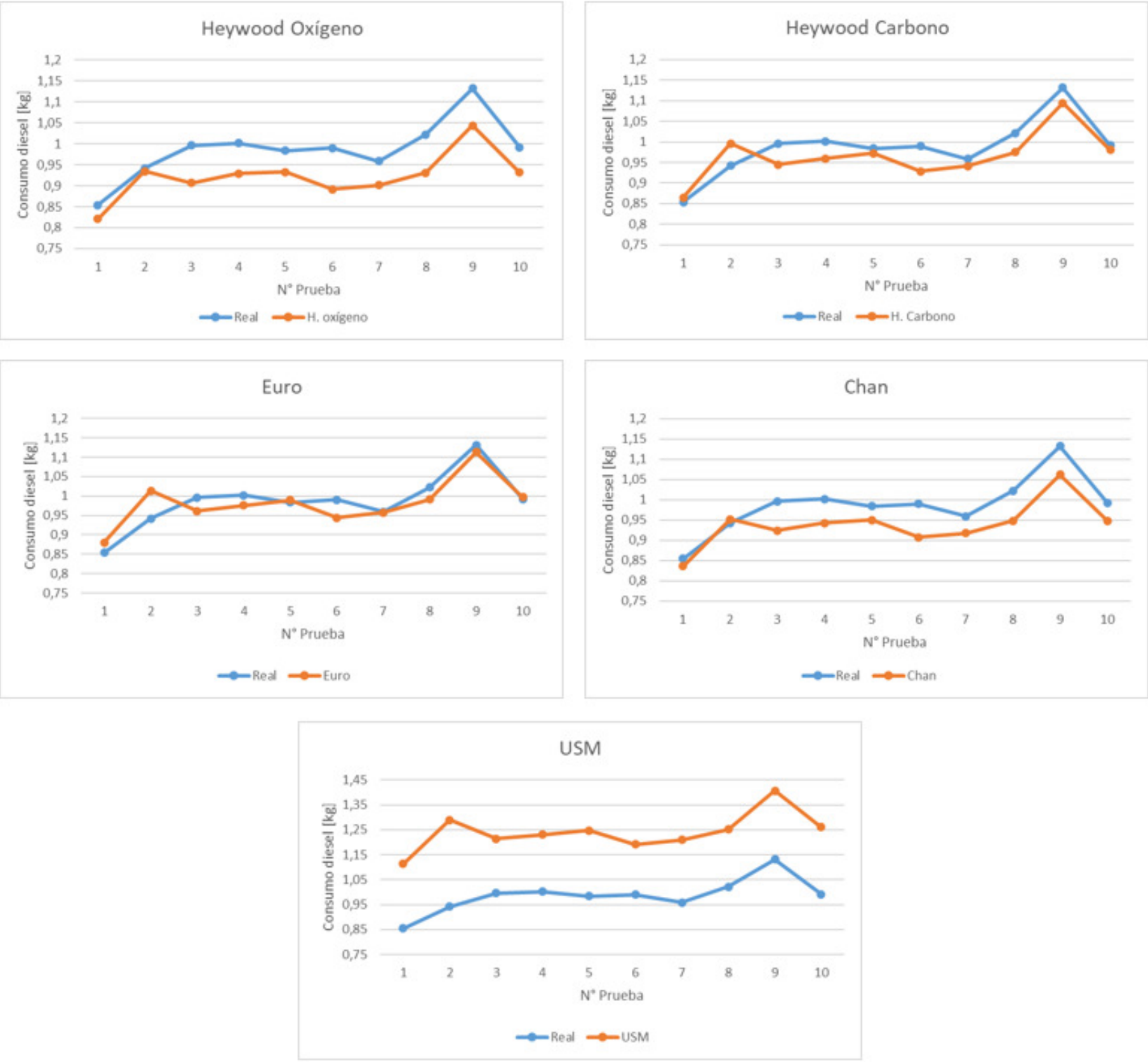


Figura 7.1A. Predicción de consumo de diesel según cada método existente en pruebas con solo diesel (Línea Base).

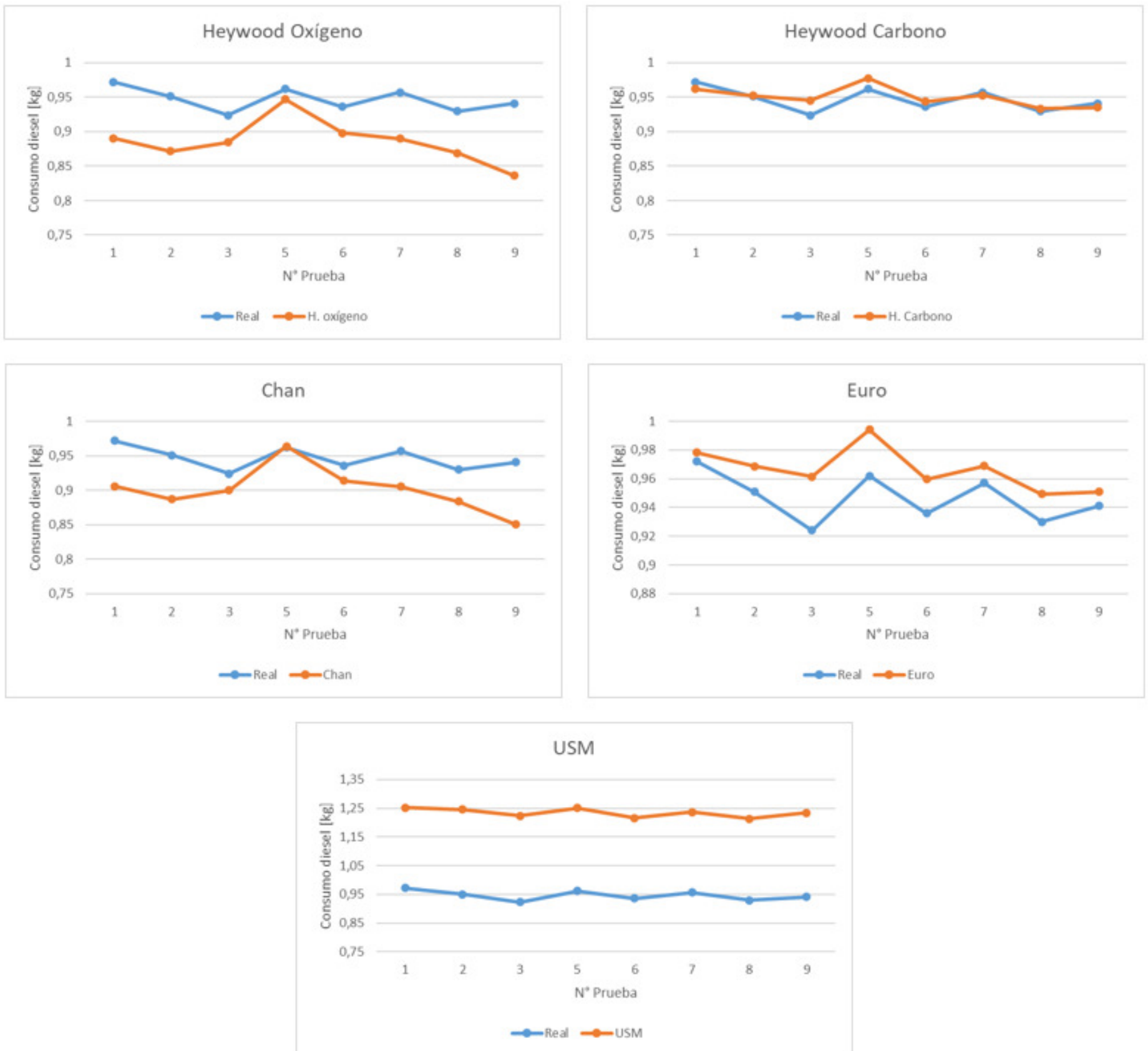


Figura 7.2A. Predicción de consumo de diesel según cada método existente en pruebas con 2% de sustitución (Mapa 1).

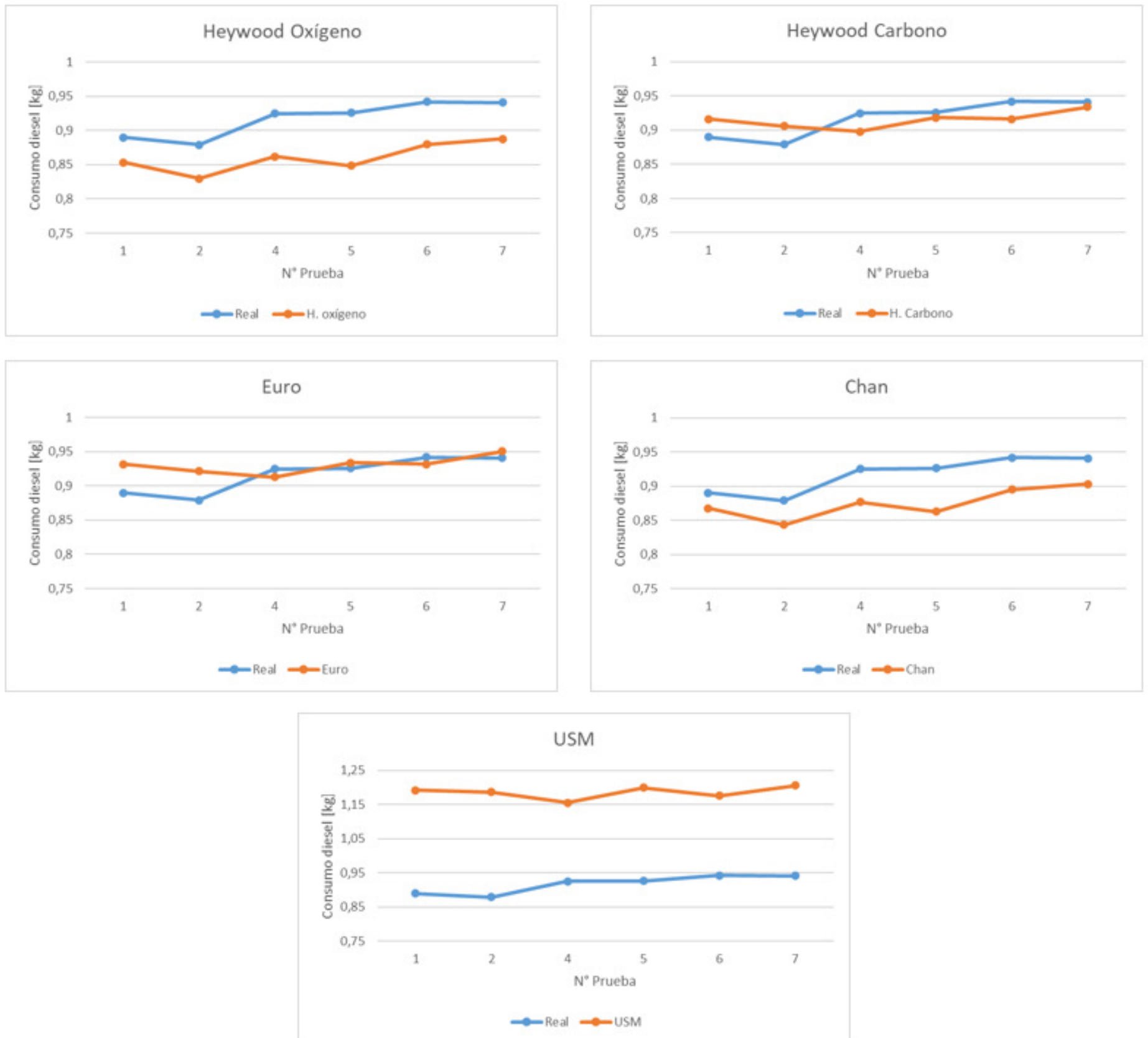


Figura 7.3A. Predicción de consumo de diesel según cada método existente en pruebas con 9% de sustitución (Mapa 2).

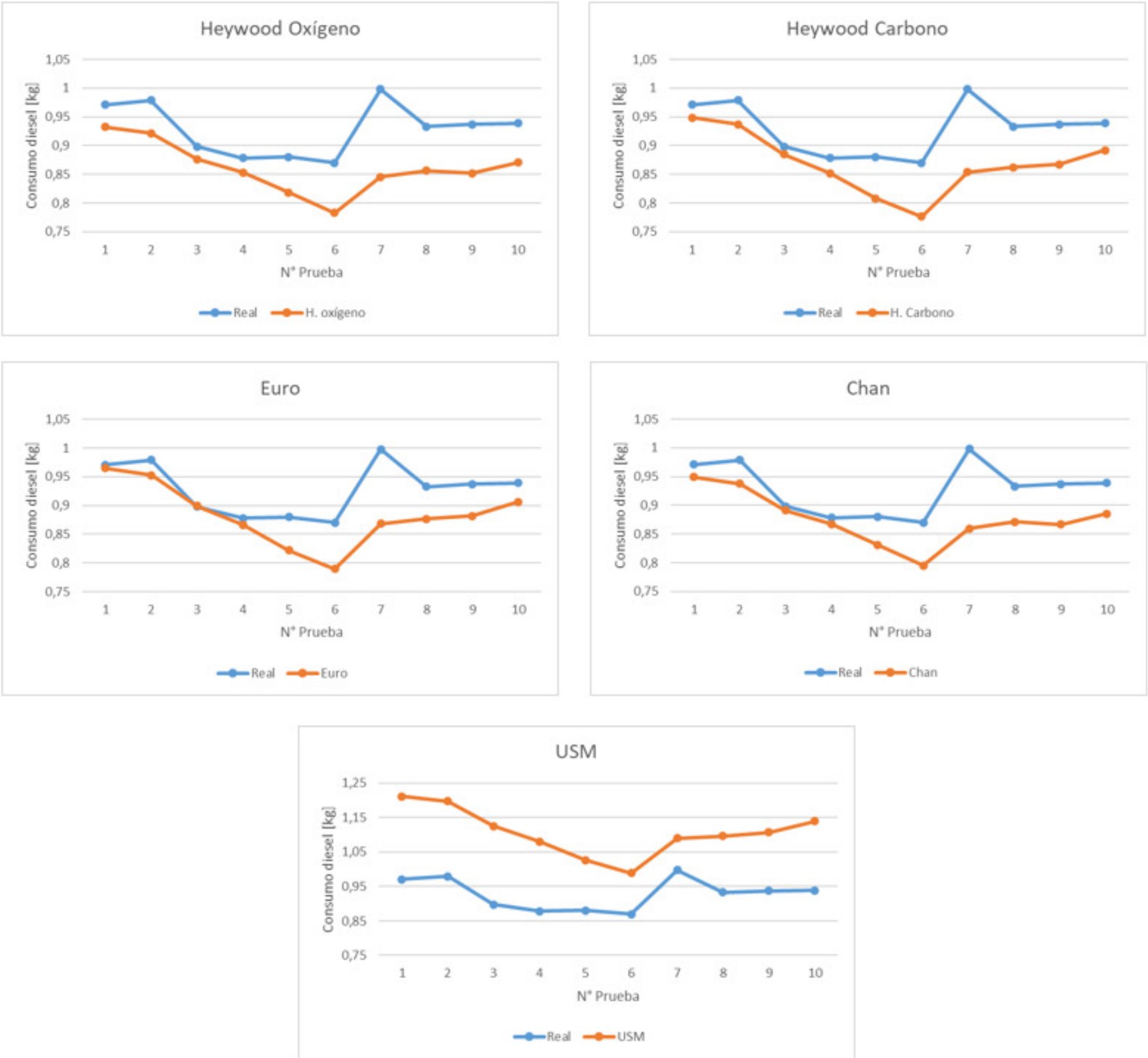


Figura 7.4A. Predicción de consumo de diesel según cada método existente en pruebas con 13% de sustitución (Mapa 3).

## 7.2 Anexo B: Valores “m” correctos para cada prueba.

*Tabla 7.1B. Valor “m” correcto, con la diferencia de hidrógeno de entrada y salida y su error relativo correspondiente, para las pruebas con sustitución 2%.*

| Sustitución 2%   |             |         |    |                        |             |         |             |             |         |                        |             |         |
|------------------|-------------|---------|----|------------------------|-------------|---------|-------------|-------------|---------|------------------------|-------------|---------|
| Euro Equivalente |             |         |    | H. Carbono Equivalente |             |         | Euro Diesel |             |         | H. Carbono Equivalente |             |         |
| Valor "m"        | H in- H out | error % |    | Valor "m"              | H in- H out | error % | Valor "m"   | H in- H out | error % | Valor "m"              | H in- H out | error % |
| 1                | 9,9         | 3,10    | 1% | 9,9                    | 3,06        | 2%      | 9,9         | 2,05        | 2%      | 9,8                    | 2,02614291  | 1%      |
| 2                | 10,3        | 2,88    | 0% | 10,3                   | 2,83        | 1%      | 10,3        | 2,02        | 0%      | 10,3                   | 1,98095637  | 2%      |
| 3                | 10,3        | 2,78    | 2% | 10,2                   | 2,80        | 2%      | 10,3        | 1,93        | 2%      | 10,2                   | 1,90625487  | 1%      |
| 4                | -           | -       | -  | -                      | -           | -       | -           | -           | -       | -                      | -           | -       |
| 5                | 10,3        | 2,96    | 0% | 10,3                   | 2,91        | 1%      | 10,3        | 2,08        | 0%      | 10,3                   | 2,03630017  | 2%      |
| 6                | 9,9         | 3,11    | 1% | 9,9                    | 3,07        | 0%      | 9,9         | 2,08        | 0%      | 9,9                    | 2,03747378  | 1%      |
| 7                | 10,5        | 2,75    | 1% | 10,5                   | 2,70        | 1%      | 10,5        | 1,98        | 0%      | 10,5                   | 1,93520613  | 2%      |
| 8                | 10          | 3,02    | 0% | 10                     | 2,97        | 1%      | 10          | 2,04        | 0%      | 10                     | 2,00073351  | 2%      |
| 9                | 10,3        | 2,80    | 2% | 10,3                   | 2,76        | 0%      | 10,3        | 1,97        | 1%      | 10,3                   | 1,92332578  | 1%      |
| 10               | -           | -       | -  | -                      | -           | -       | -           | -           | -       | -                      | -           | -       |

*Tabla 7.2B. Valor “m” correcto, con la diferencia de hidrógeno de entrada y salida y su error relativo correspondiente, para las pruebas con sustitución 9%.*

| Sustitución 9%   |             |         |    |                        |             |         |             |             |         |                        |             |         |
|------------------|-------------|---------|----|------------------------|-------------|---------|-------------|-------------|---------|------------------------|-------------|---------|
| Euro Equivalente |             |         |    | H. Carbono Equivalente |             |         | Euro Diesel |             |         | H. Carbono Equivalente |             |         |
| Valor "m"        | H in- H out | error % |    | Valor "m"              | H in- H out | error % | Valor "m"   | H in- H out | error % | Valor "m"              | H in- H out | error % |
| 1                | 6,3         | 7,74    | 0% | 6,3                    | 7,76        | 0%      | 6,2         | 3,21        | 1%      | 6,2                    | 3,14753485  | 1%      |
| 2                | -           | -       | -  | -                      | -           | -       | -           | -           | -       | -                      | -           | -       |
| 3                | -           | -       | -  | -                      | -           | -       | -           | -           | -       | -                      | -           | -       |
| 4                | 6,8         | 6,62    | 0% | 6,8                    | 6,61        | 1%      | 6,7         | 3,06        | 1%      | 6,7                    | 2,99400026  | 0%      |
| 5                | 6           | 8,37    | 0% | 6                      | 8,40        | 0%      | 5,9         | 3,15        | 1%      | 5,9                    | 3,08224236  | 1%      |
| 6                | 7,7         | 5,01    | 0% | 7,7                    | 4,97        | 0%      | 7,7         | 2,46        | 1%      | 7,6                    | 2,44624661  | 1%      |
| 7                | 8,1         | 4,55    | 0% | 8,1                    | 4,51        | 1%      | 8,1         | 2,34        | 1%      | 8                      | 2,32738313  | 1%      |
| 8                | -           | -       | -  | -                      | -           | -       | -           | -           | -       | -                      | -           | -       |
| 9                | -           | -       | -  | -                      | -           | -       | -           | -           | -       | -                      | -           | -       |
| 10               | -           | -       | -  | -                      | -           | -       | -           | -           | -       | -                      | -           | -       |

*Tabla 7.3B. Valor “m” correcto, con la diferencia de hidrógeno de entrada y salida y su error relativo correspondiente, para las pruebas con sustitución 13%.*

| Sustitución 13%  |             |            |    |                        |             |         |             |             |         |                        |             |         |
|------------------|-------------|------------|----|------------------------|-------------|---------|-------------|-------------|---------|------------------------|-------------|---------|
| Euro Equivalente |             |            |    | H. Carbono Equivalente |             |         | Euro Diesel |             |         | H. Carbono Equivalente |             |         |
| Valor "m"        | H in- H out | error %    |    | Valor "m"              | H in- H out | error % | Valor "m"   | H in- H out | error % | Valor "m"              | H in- H out | error % |
| 1                | 5,5         | 11,6459457 | 1% | 5,4                    | 4,80350108  | 0%      | 5,5         | 11,7832301  | 0%      | 5,4                    | 4,71027979  | 1%      |
| 2                | 5,7         | 10,52702   | 1% | 5,6                    | 4,41213524  | 0%      | 5,7         | 10,6238549  | 1%      | 5,6                    | 4,32591025  | 2%      |
| 3                | 5,4         | 10,4356703 | 2% | 5,3                    | 3,93007736  | 1%      | 5,4         | 10,5298565  | 1%      | 5,2                    | 3,99396111  | 1%      |
| 4                | -           | -          | -  | -                      | -           | -       | -           | -           | -       | -                      | -           | -       |
| 5                | 5,3         | 10,3835912 | 2% | 5,2                    | 3,8731745   | 1%      | 5,3         | 10,4855801  | 1%      | 5,2                    | 3,79447033  | 2%      |
| 6                | 5,2         | 10,4374204 | 1% | 5,1                    | 3,82775119  | 0%      | 5,2         | 10,5469499  | 0%      | 5,1                    | 3,75083832  | 2%      |
| 7                | 5,6         | 9,76021003 | 1% | 5,5                    | 3,88067965  | 0%      | 5,6         | 9,8344908   | 0%      | 5,5                    | 3,80443184  | 1%      |
| 8                | 5,6         | 9,94602378 | 0% | 5,5                    | 4,01631883  | 1%      | 5,6         | 10,0301266  | 1%      | 5,5                    | 3,93863093  | 1%      |
| 9                | 5,6         | 10,0208109 | 0% | 5,5                    | 4,05374474  | 1%      | 5,6         | 10,103371   | 1%      | 5,5                    | 3,97586098  | 0%      |
| 10               | 5,7         | 9,95430103 | 1% | 5,7                    | 4,00009457  | 2%      | 5,8         | 9,61757657  | 2%      | 5,6                    | 4,04427619  | 1%      |