



UNIVERSIDAD  
DE MÁLAGA



## ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES

Grado de Ingeniería en Tecnologías Industriales (Giti)

# TRABAJO FIN DE GRADO

## ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DE LA TEMPERATURA DEL FOCO CALIENTE EN UN MOTOR STIRLING PARA CRIOGENIZACIÓN.

*Influence study of hot focus temperature on a stirling engine for cryogenization.*

Realizado por  
**Núñez Gevorkian, Daniel.**  
Tutorizado por  
**Auñón Hidalgo, Juan Antonio.**  
Departamento  
**Departamento de Ingenierías Mecánicas, Térmicas y de Fluidos.**

UNIVERSIDAD DE MÁLAGA

Málaga, diciembre de 2020



## **Agradecimientos**

Agradezco a mis padres, [REDACTED] que me hayan dado la oportunidad de poder llegar hasta el punto en el que me encuentro y de que hayan depositado, desde el primer día, toda su confianza en mí. Sin vuestro apoyo moral, emocional y económico jamás hubiera logrado pasar el primer año del curso y por ello y mucho más, os debo todo mi agradecimiento, respeto y admiración. Muchas gracias, papá y mamá.



Resumen:

La Universidad de Málaga (UMA) adquiere un motor Stirling-ZIF1000 y tras un estudio de su funcionamiento, así como de sus distintas aplicaciones en la industria, se decide llevar a cabo el presente proyecto, que consiste fundamentalmente en analizar la influencia del aumento de la temperatura de entrada del líquido refrigerante al motor con el objeto de conseguir obtener líquido refrigerante a una temperatura más elevada manteniendo la producción de aire licuado constante. De esta manera, se podría diseñar un dispositivo que genere aire licuado por un lado y agua caliente por otro, reutilizando parte de la energía que antes era desaprovechada.

**Palabras claves:** criogenización, motor stirling, ZIF1000, ensayos, laboratorio...

---

**Abstract:**

The University of Malaga (UMA) gets a Stirling-ZIF1000 engine and after a study of its operation, as well as its various applications in industry, it is decided to carry out this project, which consists fundamentally in analyzing the influence of the increase in the inlet temperature of the coolant to the engine in order to obtain coolant at a higher temperature while keeping the production of liquid air constant. In this way, a device could be designed that generates liquefied air on one side and hot water on the other, reusing part of the energy that was previously wasted.

**Keywords:** cryogenic, stirling engine, ZIF1000, test, laboratory...



**DECLARACIÓN DE ORIGINALIDAD DEL  
PROYECTO/TRABAJO FIN DE GRADO**

D./ Dña.: Daniel Núñez Gevorkian

DNI/Pasaporte: [REDACTED]      Correo electrónico: [REDACTED]

Titulación: Grado en Ingeniería en Tecnologías Industriales (Giti)

Título del Proyecto/Trabajo: Estudio de la influencia de la temperatura del foco caliente en un motor Stirling para criogenización.

**DECLARA BAJO SU RESPONSABILIDAD**

Ser autor/a del texto entregado y que no ha sido presentado con anterioridad, ni total ni parcialmente, para superar materias previamente cursadas en esta u otras titulaciones de la Universidad de Málaga o cualquier otra institución de educación superior u otro tipo de fin.

Así mismo, declara no haber trasgredido ninguna norma universitaria con respecto al plagio ni a las leyes establecidas que protegen la propiedad intelectual, así como que las fuentes utilizadas han sido citadas adecuadamente.

En Málaga, a 11 de noviembre de 2020

Fdo.:  
[REDACTED]

---

## ÍNDICE DE MEMORIA

---

<b>1.</b>	<b>Introducción.....</b>	<b>11</b>
1.1.	<i>Objetivo .....</i>	11
1.2.	<i>Antecedentes, alcance y motivación .....</i>	11
1.3.	<i>Estado del arte .....</i>	12
1.3.1.	<i>Introducción a los Motores Stirling.....</i>	12
1.3.2.	<i>Tipos de motores Stirling .....</i>	14
1.3.3.	<i>Aplicaciones del motor Stirling en la actualidad.....</i>	16
1.3.4.	<i>Principios teóricos. Ciclo Stirling ideal. Ciclo Stirling invertido .....</i>	22
1.4.	<i>Motor Stirling modelo ZIF-1002 .....</i>	28
1.4.1.	<i>Breve resumen histórico.....</i>	28
1.4.2.	<i>Antecedentes.....</i>	29
1.4.3.	<i>Principal finalidad de la máquina ZIF-1002 .....</i>	29
1.4.4.	<i>Componentes esenciales para el funcionamiento de la máquina ZIF-1002 .....</i>	30
1.4.5.	<i>Ciclo Stirling en ZIF-1002; proceso de criogenización del aire.....</i>	38
1.4.6.	<i>Circuito de refrigeración del motor Stirling ZIF-1002 .....</i>	41
<b>2.</b>	<b>Descripción, diseño e implementación.....</b>	<b>44</b>
2.1.	<i>Objetivo, diseño e implementación del circuito modificado de refrigeración .....</i>	44
2.2.	<i>Modificación de las instrucciones de puesta en marcha de la máquina Stirling ZIF-1002.....</i>	49
2.3.	<i>Descripción de la metodología de la toma de datos y transcripción de estos al ordenador mediante el software Matlab.....</i>	54
2.3.1.	<i>Grabación de vídeo del ensayo.....</i>	54
2.3.2.	<i>Transcripción de datos del vídeo del ensayo .....</i>	54
2.3.3.	<i>Interpretación de datos a través del script “interpretedeensayo.m” y “comparadorensayos.m” .....</i>	56
2.4.	<i>Instrucciones de uso de los scripts de Matlab: “interpreteensayo.m” y “comparadorensayos.m” .....</i>	58
2-	<i>Lectura de tablas Excel .....</i>	58
2.5.	<i>Descripción de los distintos estados de funcionamiento .....</i>	62
2.5.1.	<i>Presión de helio y presión de trabajo .....</i>	62
2.5.2.	<i>Tapa de entrada de aire .....</i>	62
2.5.3.	<i>Influencia de la presión en los parámetros característicos del ensayo .....</i>	62

2.5.4. Recirculación de líquido refrigerante.....	63
2.6. <i>Descripción de los parámetros característicos y cálculos más importantes</i> .....	64
2.6.1. Parámetros característicos medidos.....	64
2.6.2. Variables calculadas.....	67
<b>3. Toma de datos, resultados y análisis .....</b>	<b>71</b>
3.1. <i>Descripción del apartado.....</i>	71
3.2. <i>Comparativa y análisis de resultados.</i> .....	72
3.2.1. Resultados y análisis de la influencia de la tapa de entrada de aire y resultados .....	72
3.2.2. Resultados y análisis de la influencia de la variación de presión de trabajo en el motor y resultados .....	91
3.2.3. Resultados y análisis de la influencia de la temperatura de entrada de agua en el motor .....	110
<b>4. Conclusiones y futuras líneas de trabajo .....</b>	<b>124</b>
<b>5. Bibliografía.....</b>	<b>126</b>

---

## ÍNDICE DE ANEXOS

---

6.	<b>ANEXO 1: Código “interpreteensayo.m” .....</b>	<b>1</b>
7.	<b>ANEXO 2: Código “comparadorensayos.m” .....</b>	<b>15</b>
8.	<b>ANEXO 3: Gráficas .....</b>	<b>29</b>
8.1.	<i>Ensayo 1: sin tapa de entrada de aire y 19 bares de presión de trabajo.....</i>	29
8.2.	<i>Ensayo 2: con tapa de entrada de aire y 19 bares de presión de trabajo. ....</i>	36
8.3.	<i>Ensayo 3: con tapa de entrada de aire y 18 bares de presión de trabajo. ....</i>	42
8.4.	<i>Ensayo 4: sin tapa de entrada de aire y 18 bares de presión de trabajo.....</i>	48
8.5.	<i>Ensayo 6: sin tapa de entrada de aire y 16 bares de presión de trabajo.....</i>	54
8.6.	<i>Ensayo 9: sin tapa de entrada de aire, 15 bares de presión de trabajo y Tentagua = 24.45°C. ....</i>	60
8.7.	<i>Ensayo 7: sin tapa de entrada de aire, 15 bares de presión de trabajo y Tentagua = 27.15°C .....</i>	66

# **MEMORIA**

---

## **1. Introducción**

---

### **1.1. Objetivo**

El objetivo del presente Trabajo de Fin de Grado es el estudio de la influencia de las variables que afectan al funcionamiento del motor Stirling “ZIF 1002”, haciendo hincapié en la influencia de la temperatura del foco caliente. Dicha temperatura es analizada con la finalidad de desarrollar una modificación en el circuito de refrigeración para conseguir que el motor sea capaz de producir agua caliente invirtiendo parte de la energía que antes no era aprovechada, aumentando de esta forma la eficiencia energética y ofreciendo, entre otras mejoras, mayor diversidad en su posible uso futuro.

Además del objetivo principal descrito, también se desarrollan, entre otras, diferentes técnicas de medición, toma y procesamiento de datos mediante el desarrollo de dos script con el software “Matlab”, se exponen análisis de cambios en el motor con y sin la modificación en el sistema de recirculación y se estudia la variación de los distintos rendimientos de la máquina bajo diferentes condiciones de funcionamiento.

### **1.2. Antecedentes, alcance y motivación**

El presente trabajo forma parte de la investigación de motores Stirling, poniendo en práctica posibles modificaciones en el ciclo que supongan aumentos en su rendimiento, versatilidad de uso, aumento de eficiencia mediante el aprovechamiento de energía, etc. La puesta en práctica de este trabajo ha sido posible gracias a que el departamento de “Máquinas y Motores Térmicos” de la “Escuela de Ingenierías Industriales” perteneciente a la “Universidad de Málaga” adquirió el motor en cursos pasados para ofrecer a los alumnos de los distintos grados y másteres la posibilidad de realizar estudios y modificaciones en el mismo para los distintos “Trabajos de Fin de Grado” y los “Trabajos

de Fin de Máster”. Además, es importante destacar que el presente proyecto ha sido posible gracias al anterior TFG realizado por Alejandro Hidalgo Pérez, cuyos méritos se han basado, principalmente, en preparar distintos cuadros de medidas y mediciones que ofrecen la posibilidad de estudiar en cada instante las variables más influyentes en el funcionamiento de la máquina.

La realización del presente Trabajo Fin de Grado (TFG) surge a raíz de una propuesta realizada por el tutor del proyecto, D. Juan Antonio Auñón Hidalgo, profesor de la “Escuela de Ingenierías Industriales” perteneciente al “Departamento de Máquinas y Motores Térmicos” de la “Universidad de Málaga”. El motivo por el cual se propone estudiar el motor Stirling de este trabajo y llevar a cabo una modificación en su funcionamiento, es fruto de la necesidad de conocer mejor la tecnología de este tipo de máquinas, ya que tiene un gran potencial para aumentar su competitividad frente a otras formas de producir energía. Se es consciente de este hecho dado el crecimiento de estudios e investigaciones en los últimos años. Ante los problemas medioambientales existentes en nuestro planeta y la necesidad de encontrar energías que sean renovables y que no impacten de forma destructiva el medioambiente, se vuelve a tomar interés por analizar esta interesante tecnología, ya que tiene multitud de aplicaciones de las que se puede sacar partido dada su gran ventaja, puede funcionar con cualquier método de aporte de calor, lo que lo hace viable para poder emplearse como fuente de energía no contaminante o incluso aprovechando el calor que desechan otros métodos de obtención de energía.

### 1.3. Estado del arte

#### 1.3.1. Introducción a los Motores Stirling

Un Motor Stirling es una máquina de combustión externa que funciona en un ciclo regenerativo termodinámicamente cerrado, con compresión y expansión cíclicas del fluido de trabajo a diferentes niveles de temperatura. Entendemos por *regenerativo* que intercambia y almaceno calor y por *ciclo cerrado* que el fluido del ciclo está constantemente contenido en el sistema. El fluido, que puede ser aire, nitrógeno, hidrógeno o helio, aumenta de presión debido a que recibe calor del foco caliente, lo cual

provoca que se expanda y se desplace en la dirección del calor hacia el foco frío, donde se produce el efecto contrario; el fluido se contrae debido a la disminución de temperatura y vuelve al punto inicial, comenzando de nuevo el ciclo. Véase en la siguiente imagen uno de los motores Stirling más simples que existen.



Figura 1. Recuperado de <https://www.practicaciencia.com> - Motor Stirling de baja temperatura. Una de las configuraciones de Stirling más básicas que existen.

El funcionamiento de este es parecido al descrito anteriormente, ante un aporte de calor en el foco caliente (parte inferior del cilindro del dispositivo) el aire situado en el interior del cilindro se expande, elevando el pequeño pistón hacia arriba y generando medio giro del cigüeñal. El aire expandido se desplaza también a la parte superior del cilindro (el foco frío), enfriándose. Al haberse enfriado y con ayuda de la inercia del volante de inercia, el aire vuelve a desplazarse al foco caliente, produciendo el siguiente giro del cigüeñal y comenzando de nuevo el proceso.

El motivo principal por el cual los motores Stirling no han tenido la misma repercusión que otros motores de combustión, como pueden ser los basados en el ciclo Otto o el Diésel, es la eficiencia, y es que el ciclo Stirling tiene una eficiencia que depende de la diferencia de temperaturas entre el foco caliente y el foco frío, al igual que el ciclo de Carnot, por lo que suele tener una eficiencia energética baja.

### 1.3.2. Tipos de motores Stirling

A pesar de que, dados los crecientes avances en este tipo de tecnología, existen numerosos tipos de motores Stirling, a continuación, se describirán aquellas configuraciones que son más comunes y que facilitarán el posterior entendimiento del funcionamiento del motor Stirling protagonista del presente proyecto.

#### Stirling tipo Alpha

Esta configuración se caracteriza por tener dos pistones en cilindros separados y conectados por el calentador, el regenerador y el refrigerador. El desfase entre los dos pistones hace que el aire, pase de un cilindro a otro calentándose, enfriándose y realizando el trabajo que permite el funcionamiento del motor.

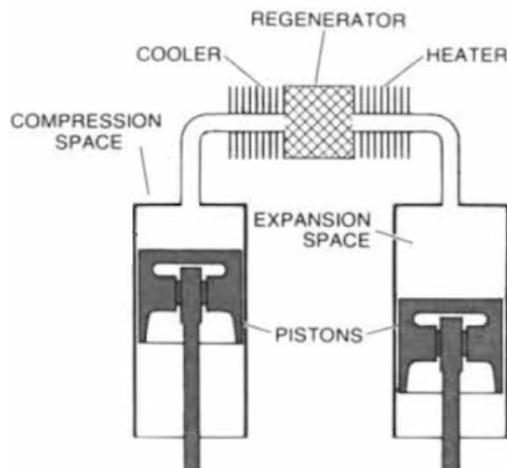


Figura 2. Recuperado de <https://cuadernodelingeniero.wordpress.com/> - Configuración tipo Alpha del motor Stirling.

## Stirling tipo Beta

Su diseño es similar al de la patente original del motor Stirling, contando con un pistón concéntrico al desplazador y en el mismo cilindro. En el mismo cilindro se encuentra el foco caliente y el foco frío. El movimiento del pistón y el desplazador están desfasados 90 grados gracias al movimiento de un cigüeñal que permite funcionar al motor. Desde el punto de vista termodinámico es el motor Stirling más eficaz.

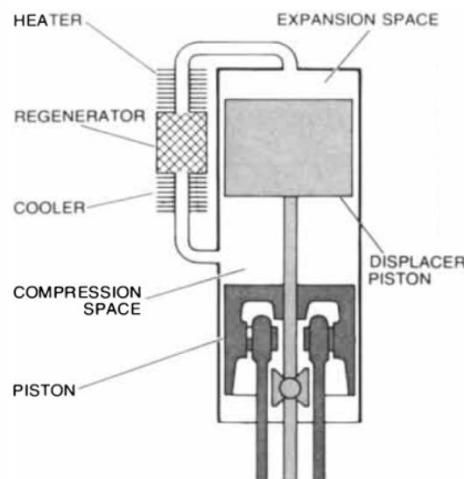


Figura 3. Recuperado de <https://cuadernodelingeniero.wordpress.com/> - Configuración tipo Beta del motor Stirling.

### **Stirling tipo Gamma**

En este caso el diseño es parecido al de tipo beta, también utiliza un desplazador, pero en este caso ambos están en cilindros distintos por lo que el espacio de compresión está dividido entre los dos cilindros que están unidos de forma que el calentador, el refrigerador y el regenerador se encuentran normalmente entre los pistones.

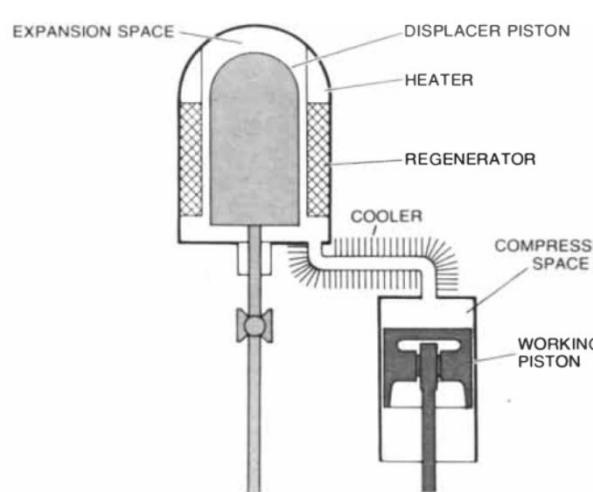


Figura 4. Recuperado de <https://cuadernodelingeniero.wordpress.com/> - Configuración tipo Beta del motor Stirling.

#### **1.3.3. Aplicaciones del motor Stirling en la actualidad**

El hecho de ser un motor de combustión externa permite utilizar una gran variedad de combustibles (incluidos los no fósiles). Thombare, D. G., & Verma, S. K. (2008) afirman en su artículo que también existen otras propiedades que pueden resultar atractivas como un consumo bajo de combustibles con una combustión más limpia, además de una buena eficiencia, una temperatura de operación baja, así como un nivel de ruido también bajo.

A continuación, se verán una serie de aplicaciones tan comunes como peculiares del motor Stirling en industrias como la del automóvil, la naval, en centrales eléctricas....

## Vehículos experimentales de la NASA

Es cuando menos curioso que un siglo y medio después del desarrollo del primer motor Stirling este haya sido parte de experimentos para crear un vehículo que pudiera moverse sin necesidad de combustibles fósiles. Estos experimentos fueron llevados adelante por la NASA.

Alrededor de los años 70's, la NASA fue encargada por el gobierno estadounidense de crear un motor que pusiera fin a la dependencia de los combustibles extranjeros y lo hizo instalando un motor Stirling en coches de la marca AMC, empresa que se encargó de suministrar el prototipo de vehículo para instalar dicho motor.



Figura 5. Recuperado de <https://www.hemmings.com/> - Prototipo de vehículo AMC con el motor Stirling ya instalado.

Sin embargo, un problema del Stirling es que, a pesar de tener muy buena eficiencia, no da suficiente potencia y esto resulta un gran problema se trata de automóviles. Además, otro inconveniente es que todas las máquinas térmicas dependen de las temperaturas del foco frío y caliente, siendo la de Carnot la que puede tener el máximo rendimiento posible. Es por ello por lo que no se insistió en la investigación de este tipo de tecnologías para los coches.

## Generador de radioisótopos de la NASA

El generador avanzado de radioisótopos Stirling (ASRG) es un sistema de energía de radioisótopos desarrollado por primera vez por el Centro de Investigación Glenn de la NASA. La tecnología de conversión de energía de Stirling se utiliza para convertir el calor de desintegración radiactiva en energía eléctrica para su uso en naves espaciales. El proceso de conversión es aproximadamente cuatro veces más eficiente que los sistemas de radioisótopos anteriores para generar cantidades similares de energía, y permite que se utilice aproximadamente una cuarta del plutonio-238 como principal generador.

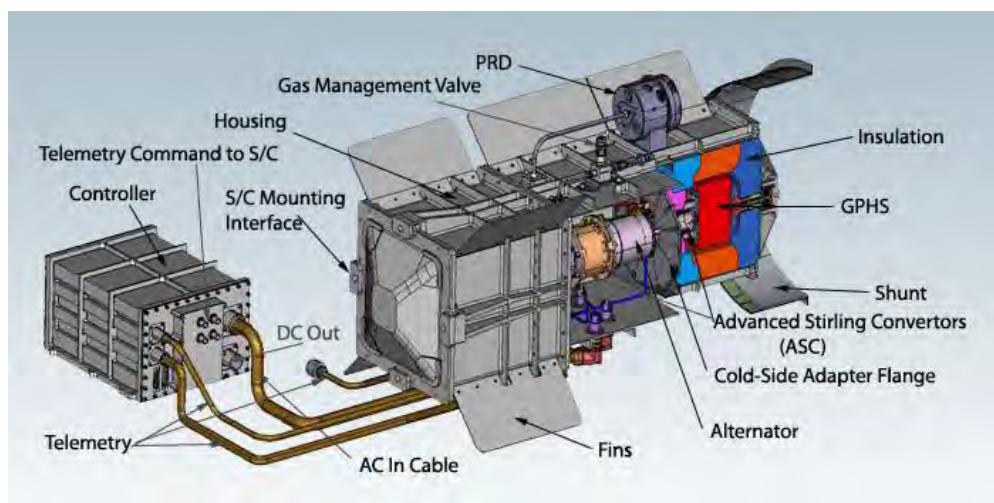


Figura 6. Recuperado de <https://es.inforandum.com/> - Diagrama del generador avanzado de radioisótopos Stirling.

## Propulsión de submarinos

El uso principal de la tecnología Stirling se engloba dentro de la Propulsión Independiente de Aire (PIA). Es decir, que la energía necesaria para la propulsión se realiza sin introducir un oxidante (aire) de la atmósfera. Thomton (1994) expuso que la PIA trata de disminuir la dependencia de los submarinos al diésel y de esta manera extender la inmersión de un par de horas a semanas.

La utilización de reactores nucleares para la propulsión de submarinos supuso un gran salto para la PIA, sin embargo, el motor Stirling también tuvo su aplicación y es que, como parte de Saab, Kockums instaló un motor Stirling con un sistema de oxígeno líquido en la submarina francesa Saga (SAAB) en la década de 1980. En 1988, hicieron su primer trabajo en la Armada sueca, instalando un motor Stirling en su primer submarino, *Näken*. Toda la experiencia acumulada y la experiencia obtenida del trabajo impulsaron la instalación de estos sistemas PIA en toda la clase del submarino Gotland de la Armada sueca, por lo que actualmente hay cinco barcos. Debido al buen funcionamiento, otros submarinos también se convirtieron a este sistema, extendiendo así el tiempo de buceo de varios días a varias semanas.

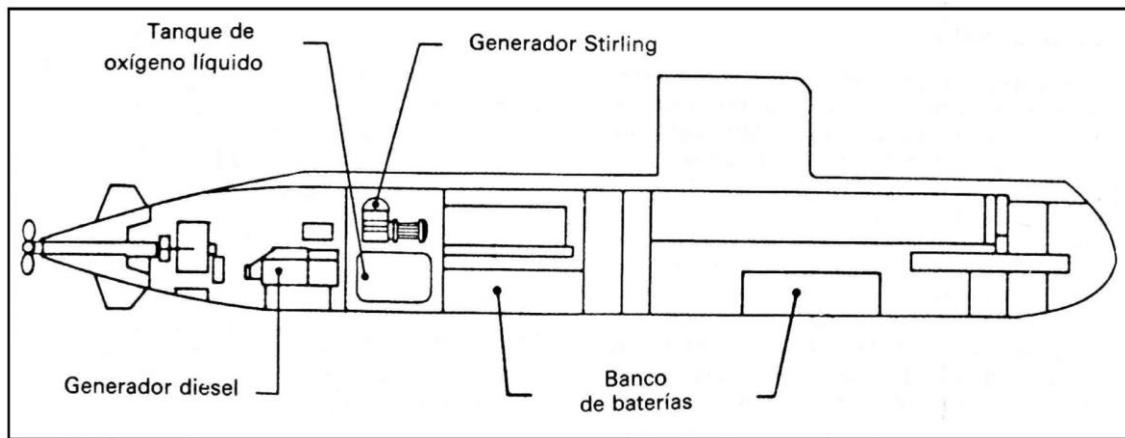


Figura 7. Recuperado de <https://www.emaze.com/@AOCQLOWCT> - Esquema básico de funcionamiento del sistema híbrido de potencia Stirling.

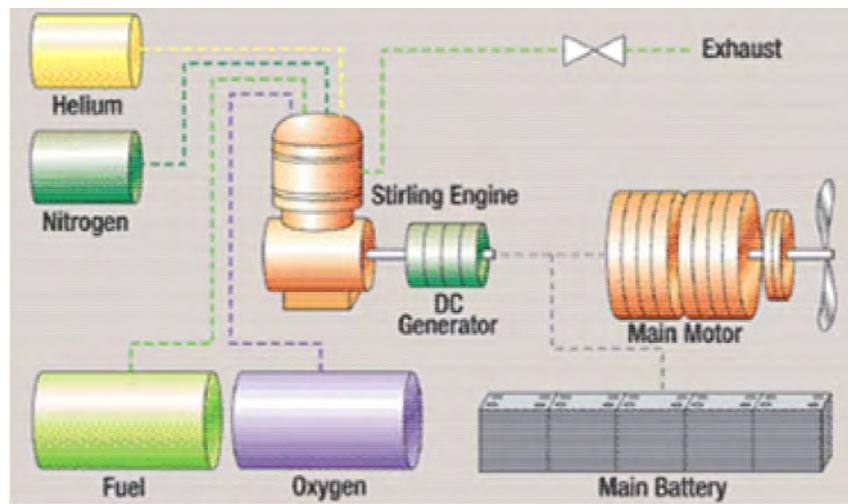


Figura 8. Recuperado de <https://revistamarina.cl/> - Principio de funcionamiento del sistema PIA con Stirling.

### Refrigeración mediante el ciclo Stirling

Al invertir el ciclo Stirling, la máquina puede funcionar como bomba de calor o máquina de refrigeración. La primera mención del motor Stirling como máquina de refrigeración se remonta a las obras de J. Herschel (1834), y la primera máquina de refrigeración fue construida por A. Kirk en 1874 (Walker y Bingham 1994). Posteriormente, como en el caso de las máquinas en modo motor, Philips logró grandes avances.

Con respecto a la aplicación de refrigeración a temperatura moderada, los trabajos de investigación mediante esta tecnología son mucho menos numerosos y los datos experimentales completos son más escasos. Esto es debido a que, al no existir un salto de temperatura elevado entre el foco caliente y el foco frío, la eficiencia del motor disminuye considerablemente.

Sunpower (Morrison, 1999) desarrolló máquinas de pistón libre que funcionan con helio como gas de trabajo a temperaturas entre  $-30^{\circ}\text{C}$  y  $+5^{\circ}\text{C}$ . Las pruebas de estas máquinas en la década de 1990 mostraron que podían alcanzar un coeficiente de rendimiento (COP) similar a los obtenidos por las máquinas que funcionan con ciclos de compresión de vapor (Berchowitz, 1993), por lo que fue a partir de este momento cuando se comenzó a investigar sobre este tipo de tecnología internacionalmente. De hecho, a

principios de la década de los 90, la División Criogénica de Philips se independizó y continuó como Stirling Cryogenics BV, que hoy en día sigue en actividad y proporciona máquinas que pueden disminuir la temperatura hasta los 20K.

Dado que ésta es la aplicación que nos ocupa en el presente proyecto, no se extenderá más en este punto, concretando más adelante las posibles aplicaciones que se puede dar al motor Stirling con el circuito de refrigeración modificado.

### 1.3.4. Principios teóricos. Ciclo Stirling ideal. Ciclo Stirling invertido

Para comprender de la mejor forma posible el funcionamiento del motor *Stirling ZIF-1002*, así como la modificación que se propone en el presente trabajo, es importante desarrollar el marco teórico en el que está basado. Dado que el objetivo es la criogenización del aire a partir de un aporte de trabajo, el ciclo en el que se basa el *ZIF-1002* es un ciclo de Stirling inverso. Sin embargo, antes se desarrollará el ciclo Stirling ideal para así abarcar todos los conceptos en los que se basa su funcionamiento.

#### Ciclo termodinámico Stirling ideal (máquina térmica motriz)

Un ciclo ideal Stirling consta de cuatro procesos termodinámicos, tal como se muestran en la siguiente figura.

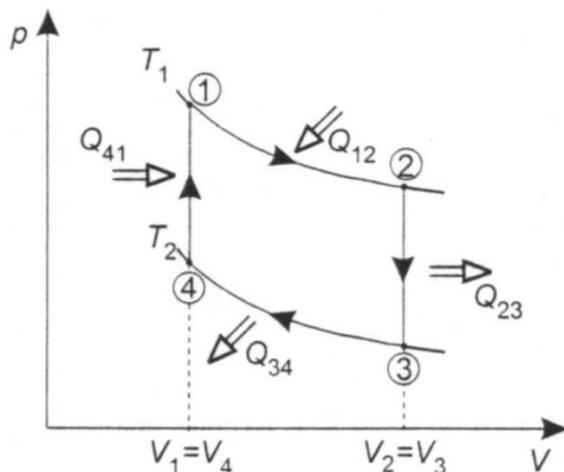


Figura 9. Recuperado de <http://fisica.uc.cl/> - Diagrama P-V del ciclo Stirling ideal.

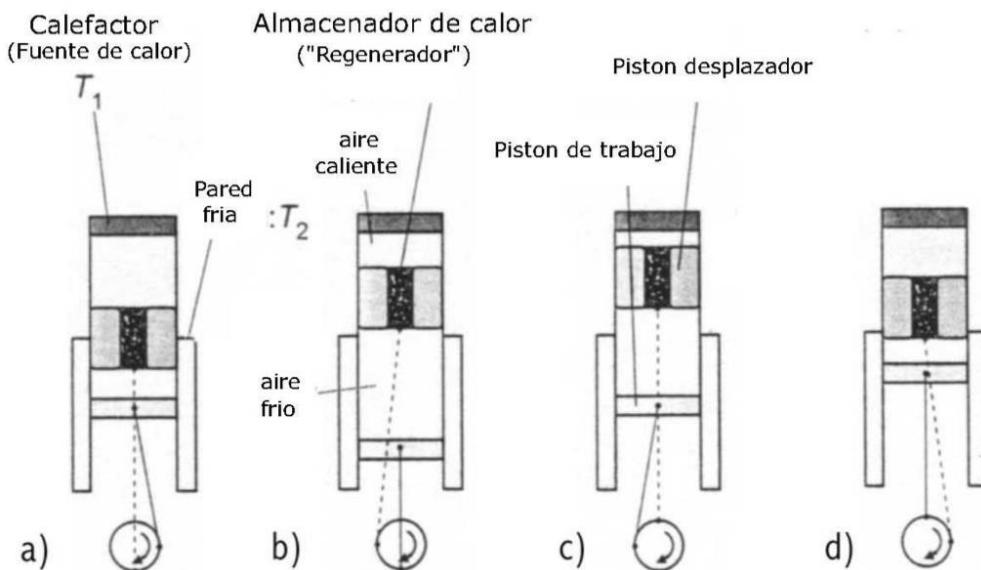


Figura 10. Recuperado de <http://fisica.uc.cl/> - Posiciones del pistón durante un ciclo con a) expansión isotérmica, b) enfriamiento isocórico, c) compresión isotérmica y d) calentamiento isocórico del gas de trabajo.

- Proceso  $1 \rightarrow 2$

Es una expansión isotérmica a la temperatura  $T_1$ , desde el volumen inicial  $V_1$  al volumen final  $V_2$ . Variación de energía interna,  $\Delta U_{12} = 0$ .

El gas realiza un trabajo  $\Delta W_{12}$  y por tanto, tiene que absorber una cantidad igual de energía del foco caliente para mantener su temperatura constante.

- Proceso  $2 \rightarrow 3$

Es un proceso isócoro por el cual el gas de trabajo cede calor, disminuyendo su temperatura de  $T_1$  a  $T_2$ . El trabajo realizado es nulo,  $W_{23} = 0$ .

- Proceso  $3 \rightarrow 4$

El gas se comprime a la temperatura constante  $T_2$ , desde el volumen inicial  $V_2$  al volumen final  $V_1$ . Como el gas está a baja presión, el trabajo necesario para comprimirlo es menor que el que proporciona durante el proceso de expansión.

Variación de energía interna,  $\Delta U_{34} = 0$ . Se realiza un trabajo  $W_{34}$  sobre el gas y, por tanto, tiene que ceder una cantidad igual de calor del foco frío para mantener su temperatura constante.

- Proceso 4→1.

Es un proceso isócoro por el cual el gas absorbe calor aumentando su energía interna y, por tanto, su temperatura. El trabajo realizado es nulo,  $W_{41} = 0$ .

Es importante destacar que el motor Stirling dispone de un dispositivo denominado regenerador. Actúa como un sistema que almacena energía en cada ciclo. El calor se deposita en el regenerador cuando el gas se desplaza desde el foco caliente hacia el foco frío disminuyendo su temperatura. Cuando el gas se desplaza desde el foco frío hacia el foco caliente el regenerador suministra energía al gas aumentando su temperatura.

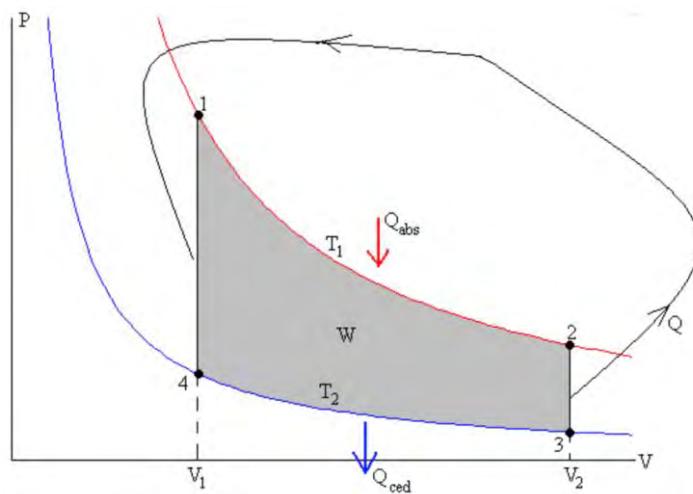


Figura 11. Recuperado de <http://fisica.uc.cl/> - Diagrama P-V del ciclo Stirling ideal con regenerador.

Es importante mencionar que, en términos muy generales, el trabajo neto del ciclo es:

- Si la curva es recorrida en sentido horario (siendo entonces una máquina térmica motriz), el sistema entrega trabajo ( $W < 0$ ).
- Si la curva es recorrida en el sentido contrario (siendo entonces una máquina de refrigeración o bomba de calor), se absorbe trabajo ( $W > 0$ ).

## Cabezal del cilindro

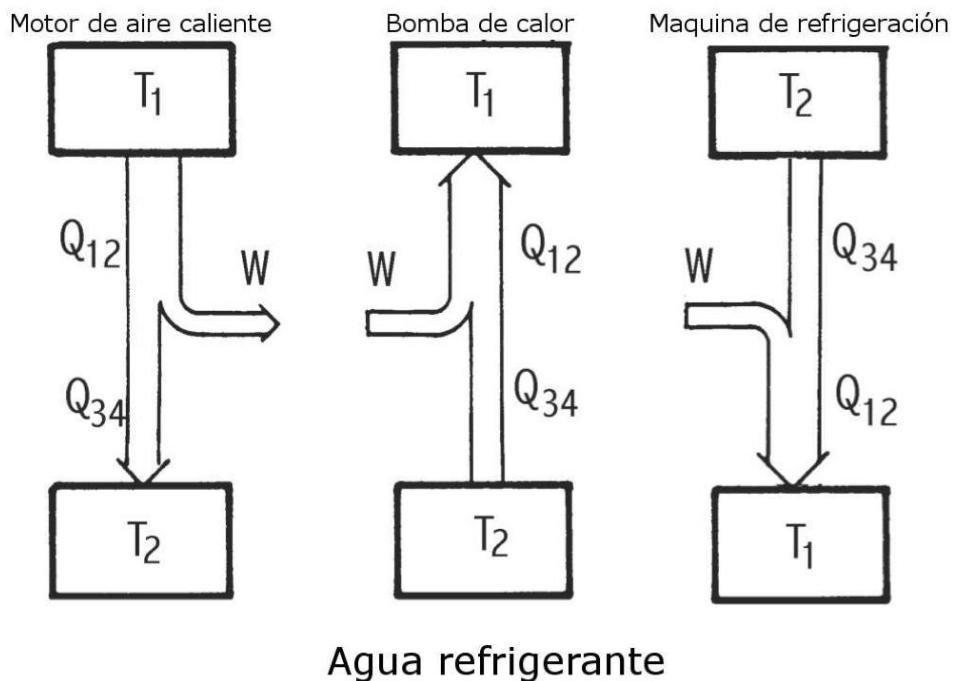


Figura 12. Recuperado de <http://fisica.uc.cl/> - Transformación de energía en el motor Stirling según el principio de funcionamiento.

Visto desde un punto de vista energético, si los procesos se dan en sentido horario, la energía térmica se transforma en energía mecánica y si los procesos se dan en sentido antihorario se transforma la energía mecánica en energía térmica.

Cabe mencionar que al igual que en todas las máquinas térmicas, existen pérdidas de calor por fricción, convección y radiación que reducen el trabajo obtenido (en sentido horario) o la temperatura final (en sentido antihorario), reduciendo de esta forma la eficiencia termodinámica ideal de la máquina ( $COP_{ideal}$ ).

$$COP_{ideal} = \frac{T_H - T_C}{T_C} \text{ (sentido horario)}$$

$$COP_{ideal} = \frac{T_C}{T_H - T_C} \text{ (sentido antihorario)}$$

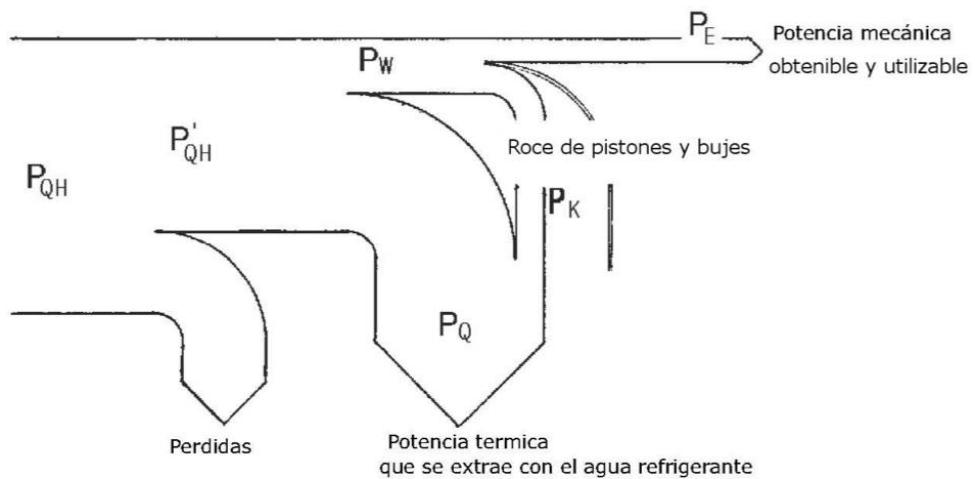


Figura 13. Recuperado de <http://fisica.uc.cl/> - Diagrama de pérdidas en el motor Stirling como máquina térmica motriz.

Las principales pérdidas que se dan en el ciclo son las siguientes:

- Transferencia de calor incompleta en el enfriamiento y en el calentamiento:  
Idealmente el fluido de trabajo se comprime en el foco frío a temperatura constante, sin embargo, esto no sucede en la realidad. No todos los puntos del fluido están a la misma temperatura debido a las resistencias térmicas de los elementos conductores del calor y a la resistencia térmica del propio fluido, lo cual conlleva que la temperatura global del fluido en este instante sea mayor que la del foco frío. En el foco caliente se produce el mismo efecto, aunque de forma viceversa.
- Eficiencia del regenerador de calor: En el ciclo ideal se considera que el regenerador almacena todo el calor proveniente del fluido caliente para después devolverlo en la siguiente fase del ciclo. Sin embargo, esto no ocurre, ya que en cualquier generador real la eficiencia no puede ser del 100% ya que se producen pérdidas durante este proceso. El regenerador absorbe parte del calor del fluido caliente (la cantidad depende de la eficiencia de este) y en la siguiente fase devuelve otra fracción de calor (que también depende de la eficiencia).

- Fugas de fluido: Un motor Stirling debe ser lo más estanco posible para asegurar la máxima eficiencia de este, sin embargo, siempre se producen pérdidas de presión tanto en la expansión como en la compresión, siendo menor la presión real que la ideal en la expansión y mayor la presión real que la ideal en la compresión.
- Volúmenes muertos: En el ciclo ideal se considera que toda la cantidad del fluido de trabajo se enfriá y se calienta, sin embargo, existen zonas en las que el fluido no sufre una variación considerable de la temperatura, reduciendo el trabajo de salida del motor (si funciona como motor térmico motriz).
- Pérdidas por fricción: estas irreversibilidades generan un trabajo negativo para el motor y pueden ser tan grandes que evitarían el funcionamiento de este, por esta razón se deben eliminar todo tipo de fricciones indeseables del sistema.

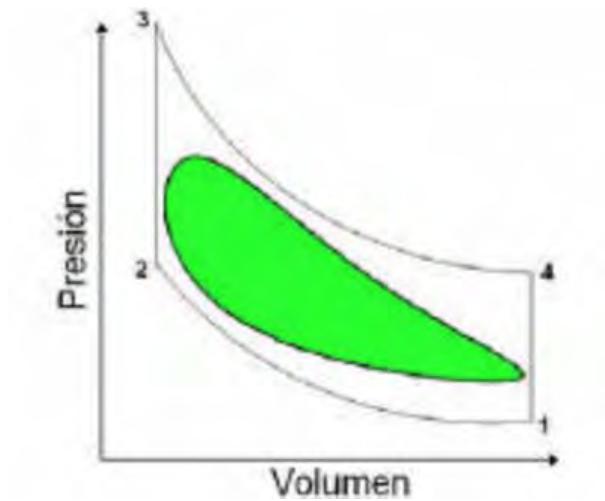


Figura 14. Recuperado de <https://proyecto-motorstirling.webnode.cl/> - Diagrama P-V del ciclo Stirling real.

### Ciclo termodinámico Stirling invertido

Tal como se ha mencionado anteriormente, el Stirling no solo puede funcionar recorriendo el ciclo en sentido horario, transformando el flujo de calor que va del foco caliente al foco frío en energía mecánica, sino que se puede revertir el ciclo. De esta manera, a partir de un aporte de trabajo mecánico al motor, se puede generar un flujo de calor desde el foco frío hasta el foco caliente (modo refrigeración) o bien generar el flujo desde el foco caliente al frío (modo bomba de calor).

## 1.4. Motor Stirling modelo *ZIF-1002*

En el presente apartado se describirá todo lo relacionado con el motor objeto de estudio del presente trabajo, abarcando todos los puntos para ayudar a comprender su funcionamiento, así como prever el comportamiento que tendrá este tras la modificación del circuito de refrigeración.

### 1.4.1. Breve resumen histórico

- A comienzos de los años 50, la empresa Philips fabrica la primera máquina criogénica, puesta en marcha por primera vez y con éxito en 1955. Aquel modelo era capaz de producir  $6 \text{ L/h}$  de nitrógeno líquido.
- Durante los años 60, la URSS tiene en su poder varias máquinas de este tipo con la misma finalidad, la producción de nitrógeno líquido. En 1965, se lanza un proyecto que tiene como finalidad aumentar la producción de nitrógeno y, para evitar problemas relacionados con las patentes de Philips, se modifica el diámetro del pistón y el sistema de llenado de helio. Los resultados del proyecto son satisfactorios y se fabrica la primera *ZIF-1000*, capaz de generar  $1000 \text{ kcal/h}$  de frío en vez de las  $700 \text{ kcal/h}$  de su antecesora. La principal aplicación es la refrigeración de componentes militares tales como cohetes, satélites, etc.
- Durante los años 70, Philips desarrolla una máquina tetracilíndrica con una productividad de  $30 \text{ L/h}$ , un aumento de un 400% respecto a su antecesora.
- En los años 80, Philips elimina la columna de destilación y añade un separador de membranas. Se venden aproximadamente 300 unidades de la *ZIF-1000*.

#### **1.4.2. Antecedentes**

El proyecto parte de la adquisición de la máquina *ZIF-1002* vendida a la Universidad de Málaga por el “Centro Stirling” situado en el País Vasco. La máquina fue fabricada por la empresa “Arsenal” y la primera empresa propietaria es “Opton LTD”, empresa rusa dedicada a la producción de piezas de caucho para el sector ferroviario. El paquete adquirido consta de la propia máquina, una torre de destilación del aire, la cual resulta inútil e irrelevante para el desarrollo del proyecto, y una caja con varios utensilios y un segundo mando de control.

#### **1.4.3. Principal finalidad de la máquina *ZIF-1002***

La máquina *ZIF-1002* está diseñada principalmente para producción aire a temperaturas que se sitúan alrededor de los -200°C a partir de la expansión del gas de trabajo, el helio (He). El aire licuado no está en contacto con las partes móviles o lubricadas de la máquina, por lo que se obtiene aire con la misma composición que el ambiente.

#### 1.4.4. Componentes esenciales para el funcionamiento de la máquina ZIF-1002

Los elementos más importantes que garantizan el correcto funcionamiento de la máquina, así como de su correcta seguridad y su mantenimiento adecuado son los que se pueden ver en la siguiente figura. Se hará hincapié en aquellos elementos que influyen más directamente en el comportamiento termodinámico de la máquina y no en el comportamiento mecánico, ya que tal como se ha mencionado anteriormente, el objetivo es comprobar la respuesta de la máquina al variar las distintas temperaturas de trabajo. Además, en los próximos apartados se procederá a describir el ciclo Stirling en el que se basa el funcionamiento del ZIF-1002 y en dicha descripción se mencionará dichos elementos por lo que antes es importante especificar algunas características de estos.

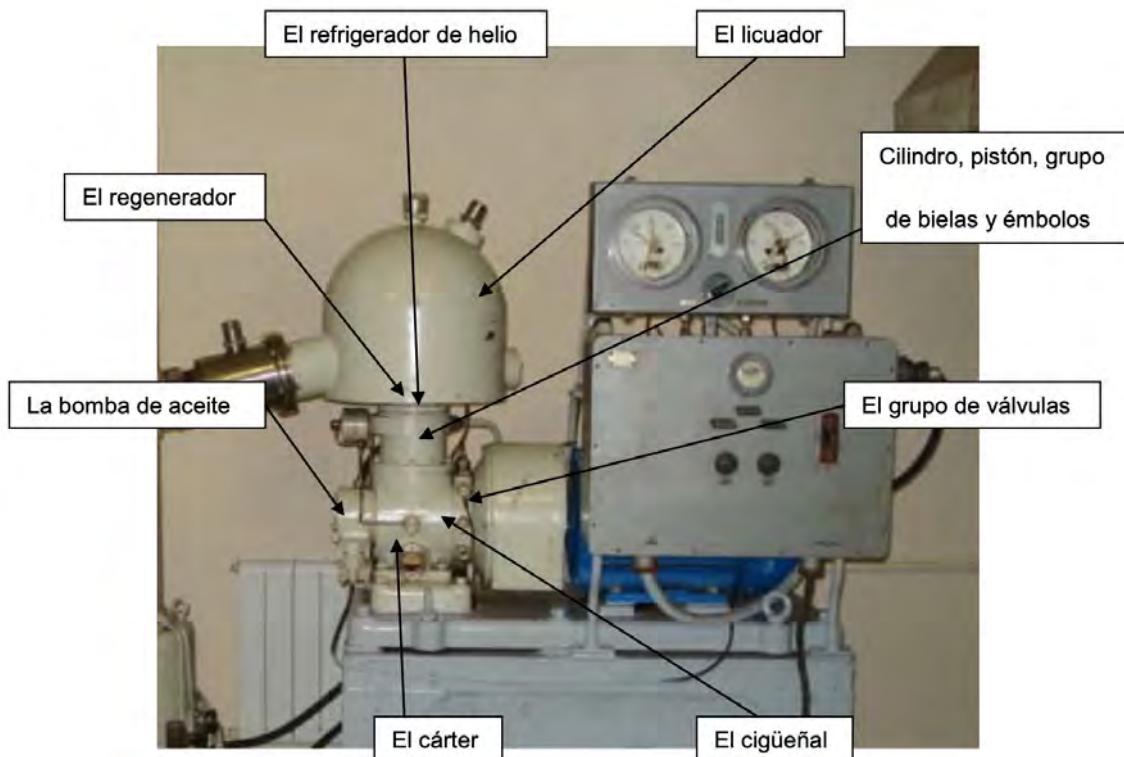
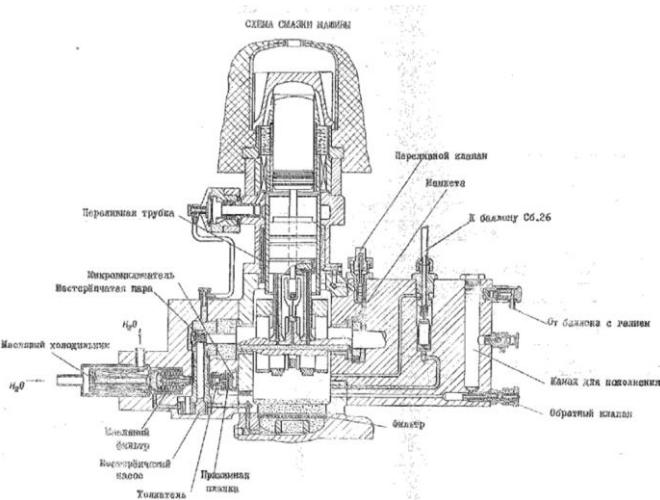


Figura 15. Documentación Stirling ZIF-1000 aportada por la Universidad de Málaga (UMA) - Instantánea tomada en el laboratorio en la que se puede distinguir externamente los principales elementos que componen la máquina ZIF-1002.

#### 1.4.4.1. Cártex



*Figura 16. Documentación Stirling ZIF-1000 aportada por la Universidad de Málaga (UMA) - Circuito de lubricación del Stirling.*

Elemento cuya función principal es servir de almacenamiento del lubricante (aceite) que sirve para proteger y asegurar el correcto movimiento de las partes móviles del motor. El cárter dispone de una mirilla que permite comprobar el estado y el nivel de aceite en todo momento.

El cárter forma parte del circuito de lubricación de la máquina, sistema que además consta de 2 filtros (uno de malla metálica y otro magnético) que facilitan la extracción de las pequeñas partículas que pueda contener el aceite, haciendo que estas lleguen a entrar en contacto con el cilindro, pudiendo provocar grandes desgastes en el mismo.

Bajo el cárter se encuentra una base llamada plancha del cárter, que dispone de un perno por el cual se facilita la extracción de aceite. En la parte superior de esta pieza se encuentra el filtro de malla metálica. Una vez superado el filtro, el aceite queda alojado en la parte inferior del cárter donde las pequeñas partículas metálicas que pudieron superar el filtro de malla quedan adheridas al filtro magnético, que es un imán circular. El aceite alojado en esta zona queda libre de todo tipo de partículas.

En el cárter existe un canal que comunica éste con la bomba de aceite, encargado de generar la presión necesaria en el lubricante para que este recorra todo el circuito. Cuando el aceite llega a la parte derecha del cigüeñal, el aceite circula por una pequeña cámara

con un vástago. La presión del aceite provoca una fuerza en éste, dejando visible desde el exterior que el aceite está a la presión adecuada. La parte final del recorrido del aceite es la cámara de refrigeración del cilindro, que comunica el cilindro con el cárter. En este punto el aceite se precipita al cárter a través de un circuito de pequeños tubos lubricando las partes móviles y evacuando calor del cilindro, actuando por tanto de refrigerante.

#### 1.4.4.2. Regenerador



Figura 17. Documentación Stirling ZIF-1000 aportada por la Universidad de Málaga (UMA) -  
Regenerador del motor.

El regenerador está destinado a realizar una rápida y periódica absorción del calor del helio cuando este pasa a la zona de expansión, y una rápida y periódica cesión del calor anteriormente absorbido cuando el gas vuelva a la zona de compresión. La pieza se encuentra dentro del cuerpo del licuador y está compuesto de un casquillo exterior y un casquillo interior, fabricados en un material de muy baja conductividad térmica. En el espacio entre los casquillos está situado el relleno del regenerador, formado por un conjunto de mallas metálicas de cobre y zinc. Mediante el uso de distintas capas se consigue la optimización del regenerador, siendo el orden de estas cobre-zinc-cobre.

Cuando el helio caliente fluye de la zona de compresión atravesando el regenerador hacia la zona de expansión el relleno del regenerador absorbe el calor del helio enfriándolo. Este calor queda almacenado sin perdidas notables para que sea devuelto al helio en su

retorno a la zona de compresión. En caso de que el regenerador se ensucie por el aceite de lubricación la eficiencia disminuirá considerablemente.

#### 1.4.4.3. Licuador

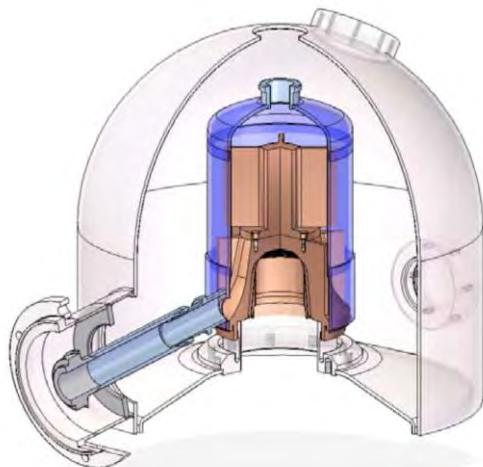


Figura 18. Documentación Stirling ZIF-1000 aportada por la Universidad de Málaga (UMA) -  
Campana del licuador.

El licuador está destinado a absorber el calor del aire y cedérselo al helio, que al expandirse lo absorbe. En el interior de esta pieza de la máquina se aloja el regenerador apoyándose sobre el refrigerador.

Este elemento está diseñado de tal manera que el líquido a licuar pueda escurrir al exterior por medio del tubo de salida. En este tubo existe un espacio lleno de un aislante térmico en polvo denominado “Perlox”, un material volátil con aspecto de polvo.

Dentro del licuador se encuentra una de las piezas críticas de la máquina. Su fabricación es muy costosa y compleja. En el interior de esta pieza se instala otra pieza cónica a presión logrando una serie de canales por los que el gas de trabajo fluye en las dos direcciones.

Además, encima del licuador se posa una pieza que tiene mucha superficie en contacto con el exterior además de una muy buena conductividad térmica garantizando el intercambio de calor lo más rápido posible.

Encima de esta pieza de cobre se encuentra una malla metálica, cuya función es recoger la humedad del aire al congelarse. Una vez congelada la humedad llega a bloquear

el paso del aire desde la zona superior por lo que a partir de entonces el aire entra en la máquina por el mismo tubo por el que el aire líquido escurre al exterior.

#### 1.4.4.4. El pistón

Tanto el cuerpo del pistón como su base son dos piezas muy críticas en la máquina ya que estas piezas son las que más temperatura alcanzan. Debido a estos aumentos de temperatura el pistón se dilataba tanto que llegaba a rozar la pared del cilindro, gripándolo. Para solucionar este tipo de problema se decidió realizar la parte superior del cilindro de forma cónica dejando un ángulo de 2 ó 3 grados con la vertical como se puede observar en la siguiente figura.

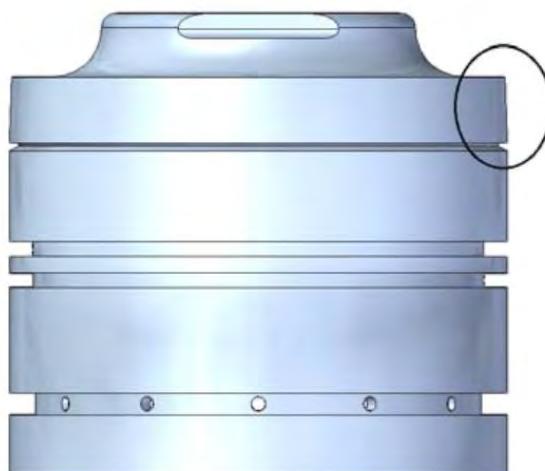


Figura 19. Documentación Stirling ZIF-1000 aportada por la Universidad de Málaga (UMA) - Imagen en la que se puede apreciar el detalle de conicidad del pistón.

#### 1.4.4.5. El desplazador



Figura 20. Documentación Stirling ZIF-1000 aportada por la Universidad de Málaga (UMA) - Imagen en la que se puede observar la instalación del desplazador y, debajo, el pistón.

El desplazador dispone de dos semianillos de hierro fundido en la parte interior y de madera en la parte exterior. Estos dos semianillos juntos forman el segmento que funciona como patín. Por debajo de estos semianillos se encuentran dos segmentos de hierro fundido, que junto a un anillo de caprón (Poliamida 6) evitan que el gas de trabajo pase a la cámara de compresión. Este anillo se somete a un calentamiento a 140°C en aceite tras el que se deja enfriar. Este tratamiento sirve para evitar su expansión en funcionamiento. Después de este tratamiento térmico el anillo es más blando y no se desgasta. El material es similar al teflón.

#### 1.4.4.6. El cilindro

La camisa existente en este conjunto refrigerará el foco caliente de la máquina por medio de aceite. Gracias al uso del aceite como refrigerante en vez de agua como es habitual en otras máquinas, se evita cualquier tipo de problema con la cal. Otra ventaja es que en caso de haber alguna fuga el aceite iría a parar directamente al cárter sin ocasionar ningún tipo de problema. Además, si se refrigerase con agua el cilindro, la diferencia de temperatura entre las paredes del cilindro puede hacer que aparezcan pequeñas grietas.



Figura 21. Documentación Stirling ZIF-1000 aportada por la Universidad de Málaga (UMA) - Cilindro interior del motor Stirling.



Figura 22. Documentación Stirling ZIF-1000 aportada por la Universidad de Málaga (UMA) - Cilindro interior y exterior completamente instalados.

La parte más caliente de la máquina se encuentra en la cámara de compresión que se encuentra en el cilindro debajo del refrigerador. Las juntas de esta zona son las más críticas. La temperatura máxima alcanzada en la parte superior del cárter es de 100°C y se ve afectada por el aceite y el helio del cilindro.

#### 1.4.4.7. El refrigerador de helio

El refrigerador de helio está destinado para la evacuación del calor del helio comprimido en su paso de la zona de compresión a la zona de expansión. Éste está situado en la parte superior del cárter. Se compone de 3 sólidos, uno de ellos de cobre y los demás de acero inoxidable quedando el cuerpo de cobre en la mitad.

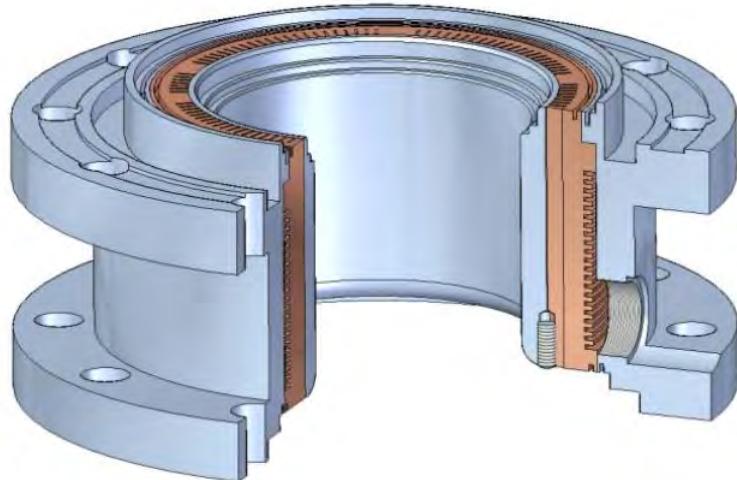


Figura 23. Documentación Stirling ZIF-1000 aportada por la Universidad de Málaga (UMA) –  
Refrigerador de helio.

Tal como puede observarse en la figura, se forman dos zonas libres de material. La zona más externa, donde se pueden ver una serie de aletas en la pieza de cobre es por donde circulará el agua refrigerando el helio. Éste último circula verticalmente por el espacio creado entre los dos sólidos internos.

#### 1.4.5. Ciclo Stirling en ZIF-1002; proceso de criogenización del aire

El espacio de trabajo del motor se sitúa por encima del pistón y queda dividido por el desplazador en dos zonas; la zona de compresión, situada por debajo del desplazador; la zona de expansión, situada por encima del desplazador. Véase en la siguiente figura un esquema de la zona de trabajo.

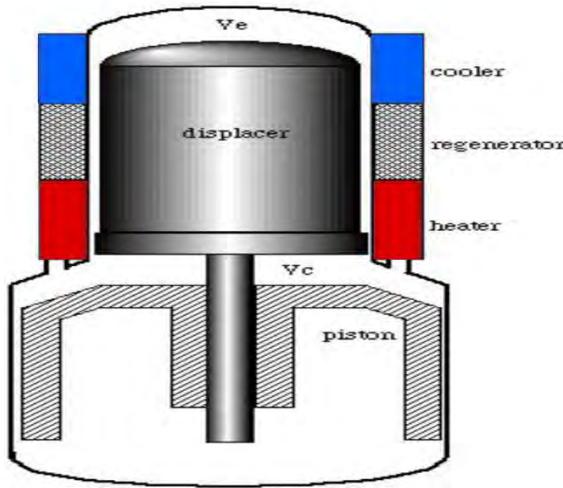


Figura 24. Recuperado por <https://www.seas.es/> - Zona de trabajo del Stirling de tipo Beta.

El movimiento de la biela tenedor del pistón y la biela del desplazador se transfiere a través del movimiento del cigüeñal. Las muñequillas de la biela del pistón están desplazadas respecto de las muñequillas del desplazador, por lo que durante el giro del cigüeñal el desplazador adelanta al pistón. Este desfase da lugar a la compresión y expansión del helio durante cada uno de los ciclos.

Cuando se produce la compresión del helio debido al acercamiento del pistón y el desplazador se genera una cantidad de calor que es retirada, por medio del líquido refrigerante (agua) y también por el aceite, para que éste no sea transferido en la siguiente fase del ciclo al aire. El calor que no puede ser evacuado por medio de la refrigeración lo absorbe el regenerador durante el desplazamiento a la zona de expansión para cederlo en la siguiente fase. De esta forma se consigue retirar del helio todo el calor posible durante la fase de compresión y la de desplazamiento. Una vez atravesado el regenerador y estando el helio en la zona de expansión, se produce la expansión del helio propiamente dicha a partir del movimiento conjunto del pistón y desplazador hacia abajo, retirando a

través del licuador todo el calor del aire haciendo que este disminuya su temperatura. Posteriormente el desplazador, que se está desplazando hacia arriba, obliga al helio a salir de la zona de expansión para situarse de nuevo entre el desplazador y el pistón y posteriormente comprimirse, comenzando el ciclo de nuevo. Durante este último paso, el helio atraviesa el regenerador tomando de nuevo el calor cedido anteriormente.

Para aclarar de la mejor forma posible el ciclo, se realizará una explicación esquemática de cada una de las fases de este.

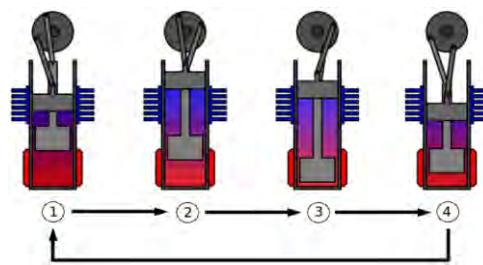
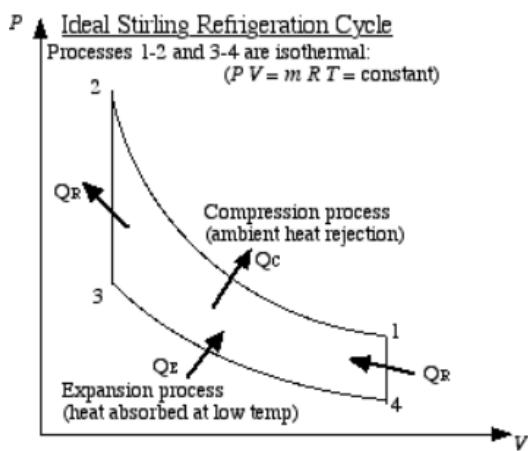


Figura 26. Recuperado de

<https://fisicaexpdemostrativos.uniandes.edu.co/>

Figura 25. Recuperado de  
<https://fisicaexpdemostrativos.uniandes.edu.co/> -

Ciclo termodinámico Stirling. Diagrama P-V.

Esquema de fases de cilindro y desplazador  
durante el ciclo Stirling.

Tal como se ha explicado y como puede verse en las figuras anteriores, el ciclo termodinámico Stirling de refrigeración consta de 4 fases:

1. Fase de compresión (1 → 2): El desplazador comienza el movimiento hacia el punto muerto superior (PMS) desde un punto situado a continuación de su punto muerto inferior (PMI) y el pistón se desplaza hacia su PMS estando ya cerca de este. Este movimiento provoca la compresión del helio en la zona de compresión (situada entre pistón y desplazador) dando lugar a una generación de calor que es evacuada en gran parte mediante el líquido refrigerante y el lubricante.
2. Fase de desplazamiento hacia la zona de expansión (2 → 3): El desplazador llega a su PMS mientras que el pistón queda ligeramente desplazado, en dirección descendente, de su PMS. Este movimiento provoca que el helio se desplace de la zona de compresión a la zona de expansión (situada sobre el desplazador), atravesando el regenerador que tomará el calor que no ha podido ser evacuado en la fase anterior.
3. Fase de expansión (3 → 4): Tanto el pistón como el desplazador se desplazan hacia su respectivo PMI, provocando una expansión del helio, que a través del licuador retira el calor del aire, enfriando la zona a temperaturas que se encuentran entorno a los -200 °C. El calor del aire se transfiere a través del licuador (que está hecho de cobre) en la siguiente fase. Este aire se aspira debido a la diferencia de presiones que se producen como resultado de la condensación de aire sobre la superficie fría del licuador. Así, el aire que se desea licuar entra a través del conducto de salida en la cantidad requerida y el aire líquido se vierte por el mismo conducto por gravedad.
4. Fase de desplazamiento hacia la zona de compresión (4 → 1): El desplazador queda cerca de su PMI y el pistón se desplaza ya hacia el PMS, provocando que el helio frío pase de la zona de expansión a la zona de compresión, tomando durante el proceso el calor del regenerador que había cedido en la fase de desplazamiento hacia la zona de expansión, aumentando de esta forma su temperatura.

Es importante destacar que, durante cada uno de los ciclos, el regenerador cede y adquiere calor en tiempos muy reducidos, por lo que la eficiencia de la máquina depende de la eficiencia del regenerador.

#### 1.4.6. Circuito de refrigeración del motor Stirling ZIF-1002

En este apartado se describirá el circuito de refrigeración del motor previo a la modificación de este para la realización de las pruebas experimentales.



Figura 27. Hidalgo, A (2020). *Estudio teórico-práctico de un motor Stirling para criogenia. [TFG]* - Circuito de refrigeración de la máquina ZIF-1002 sin la modificación.



Figura 28. Hidalgo, A (2020). *Estudio teórico-práctico de un motor Stirling para criogenia. [TFG]* - Entrada y salida del refrigerante sin la modificación. El tubo gris corresponde a la entrada y el tubo amarillo a la salida. La salida tiene una llave de paso.

## Esquema hidráulico del circuito de refrigeración del ZIF-1002 sin modificar

Daniel | August 11, 2020

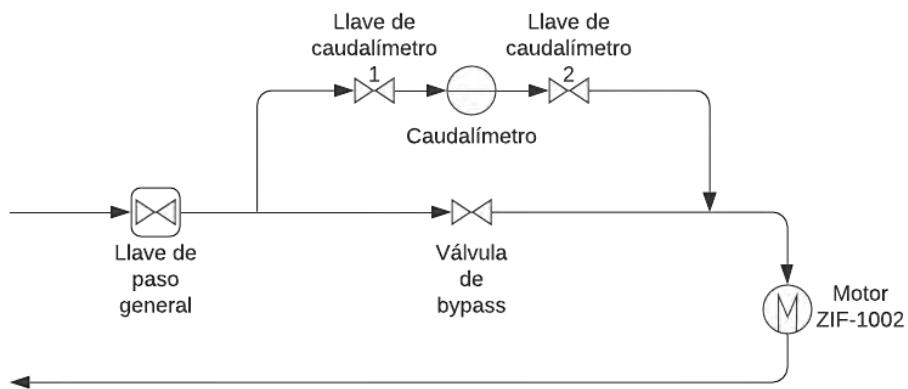


Figura 29. Esquema hidráulico del circuito de refrigeración sin la modificación. Stirling ZIF-1002.

El circuito de refrigeración previo a la modificación realizada consta de una tubería de cobre de 14 mm de diámetro interior que introduce, a través de una manguera amarilla, el agua refrigerante proveniente del suministro del edificio. A esta tubería de cobre se le ha instalado un bypass con un caudalímetro para medir el caudal de suministro a la máquina. A la salida del motor Stirling un tubo gris transparente extrae el refrigerante y lo descarga en el desagüe previamente instado en el laboratorio. En la figura 27 se puede observar las dos direcciones del líquido refrigerante del circuito, en la parte superior la tubería de cobre (con el agua entrante al circuito) y la tubería gris de descarga (con el agua saliente del circuito).

---

## 2. Descripción, diseño e implementación

---

### 2.1. Objetivo, diseño e implementación del circuito modificado de refrigeración

Tal como se ha indicado anteriormente una de las principales tareas que ocupa el presente TFG es modificar el circuito de refrigeración de la máquina Stirling de tal forma que parte del caudal de agua caliente que sale del circuito se reintroduzca en el mismo, aumentando de esta forma su temperatura. Así, se podría conseguir un motor que aparte de producir aire licuado pudiera también calentar agua.

Uno de los inconvenientes que tiene dicha modificación es que se espera que, al aumentar la temperatura del foco caliente, como consecuencia del aumento de temperatura del refrigerante, disminuya la eficiencia del motor, ya que aumenta la temperatura del foco frío. Sin embargo, se piensa que este aumento de temperatura no es suficiente como para que pueda llegar a influir a cualquiera de las finalidades del motor, ya que si antes se producía aire licuado a aproximadamente -200 °C, el objetivo es que tras la modificación lo haga a aproximadamente -140 °C.

El esquema de circulación del agua es el que se observa a continuación:

## Esquema hidráulico del circuito de refrigeración del ZIF 1002 con modificación

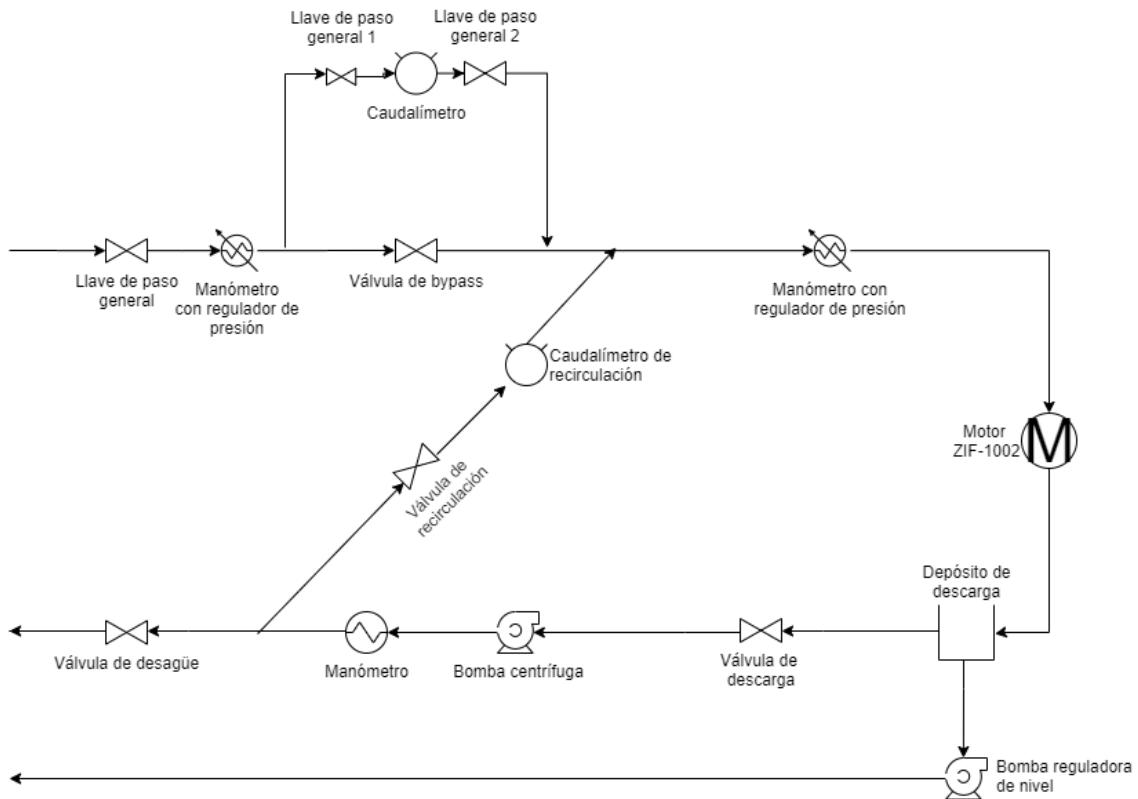


Figura 30. Esquema hidráulico del circuito de refrigeración del motor Stirling ZIF-1002.

## Elementos del circuito



Figura 31. Hidalgo, A (2020). *Estudio teórico-práctico de un motor Stirling para criogenia. [TFG]* - Instantánea de la primera parte del circuito de refrigeración del motor Stirling ZIF-1002.

1.- Llave de paso general: esta llave controla el suministro de agua del circuito completo. Debe estar abierta completamente para asegurar el correcto funcionamiento de la máquina.

2.- Llave de baipás: esta llave permite la desviación del agua a través del caudalímetro. Dado que siempre se hace uso del caudalímetro, debe permanecer cerrada.

3.- y 5.- Llaves de caudalímetro: Estas llaves controlan la circulación del refrigerante a través del caudalímetro.

4.- Caudalímetro: Elemento cuya finalidad es medir la cantidad de caudal que circula a través de este.



Figura 32. Hidalgo, A (2020). Estudio teórico-práctico de un motor Stirling para criogenia. [TFG] -

Instantánea de la segunda parte del circuito de refrigeración del motor Stirling ZIF-1002.

6.- Manómetro: elemento cuya función es medir la presión de suministro del líquido refrigerante.

7.- Llave de entrada de líquido refrigerante: llave desde la cual se regula la entrada de líquido refrigerante. La entrada lleva incorporada un sensor de temperatura.

8.- Llave de salida de líquido refrigerante: llave desde la cual se regula la salida del líquido refrigerante. También lleva incorporada un sensor de temperatura.

9.- Tanque de descarga: con el fin de regular las oscilaciones de presión que se producen en el agua se ha colocado un tanque en el que se descarga dicho fluido. Estas oscilaciones se producen principalmente debido a que la presión de suministro no es constante.

10.- Bomba de vaciado: el esquema de la instalación precisa de la necesidad de colocar una bomba para vaciar el depósito de vaciado. Durante el encendido del motor es

necesario ajustar la bomba de forma que retire un caudal igual al que introduce el motor durante su funcionamiento.

11.- Llave de baipás: llave que controla la cantidad de agua caliente que se hace recircular por el sistema de refrigeración.

12.- Caudalímetro: elemento que controla la cantidad de caudal que se reintroduce en el circuito de refrigeración.

13.- Llave de desagüe: llave que descarga el caudal de refrigerante no circulado.

## 2.2. Modificación de las instrucciones de puesta en marcha de la máquina Stirling ZIF-1002

Debido a las numerosas modificaciones de la máquina Stirling, se decide realizar una nueva tabla de verificaciones de puesta en marcha de la máquina que deberá ser rellenada por cada ensayo con el fin de asegurar las medidas de seguridad personal y protección de la máquina.

A continuación, se puede observar la anterior tabla de verificaciones de la máquina y, posteriormente, la nueva tabla modificada.

Las modificaciones han sido principalmente las siguientes:

- Distribuir la tabla en las fases en las que se divide el ensayo: pre-encendido, arranque y parada.
- En cada una de las fases se han añadido procedimientos de verificación acordes con las modificaciones realizadas:
  - o En la fase pre-encendido, se añade la comprobación del estado de todas las llaves de paso del circuito de refrigeración. Se añade también la comprobación del nivel del tanque de vaciado.
  - o En la fase de arranque, se añade la comprobación de caudal de refrigeración, del caudal de impulsión de la bomba, presión del caudal de refrigeración, segunda comprobación del nivel de tanque de vaciado, y comprobación de inicio de vídeo, así como descripción del ensayo en el vídeo.
  - o En la fase de parada, se añade comprobación de estado de bomba parada y desconexión de esta.

ORDEN	DESCRIPCION	OK	NO								
1	Máquina desconectada de red										
2	Protección corporal usuario										
3	Protección auditiva y visual										
4	Área limpia de obstáculos										
5	Área limpia de agua y aceite										
6	Partes móviles de la máquina libres										
7	Fugas de helio o aceite										
8	Estado del cable y conector de alimentación										
9	Conexiones entrada y salida de agua										
10	Panel eléctrico principal en buen estado y sus componentes										
11	Botón de parada de emergencia										
12	Panel de conexión a la red y componentes en buen estado										
13	Nivel de aceite										
14	Aceite en buenas condiciones										
15	Caudal de refrigerante correcto										
16	Caudalímetro encendido										
17	Nivel presión de helio										

Figura 33. Hidalgo, A (2020). Tabla de puesta en marcha antigua I.

<b>18</b>	Máquina conectada a la red					
<b>19</b>	Magnetotérmicos en posición ON					
<b>20</b>	Interruptor principal en posición ON					
<b>21</b>	Piloto tensión encendido					
<b>22</b>	Piloto agua encendido					
<b>23</b>	Piloto helio encendido					
<b>24</b>	Tacómetro encendido					
<b>25</b>	Medidor de potencia encendido					
<b>26</b>	Termómetros de medida encendidos					
<b>27</b>	Bascula encendida					
<b>28</b>	Bombona para aire líquido en posición					
<b>29</b>	Pulsador de encendido y arranque funciona					
<b>30</b>	Piloto de aceite encendido al poner en marcha					
<b>31</b>	Racor de vaso de expansión no se calienta					
<b>32</b>	Botón de parada para la máquina.					

Figura 34. Hidalgo, A (2020). Tabla de puesta en marcha antigua II.

			Fecha de ensayo:										
ID	Fase	Verificación		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	Previa al encendido	Máquina desconectada											
2		Cableado y conector en buen estado											
3		Protección corporal, auditiva y visual											
4		Zona de trabajo libre de obstáculos											
5		Zona de trabajo limpia											
6		Partes móviles libres											
7		Ausencia de fugas de aceite y helio											
8		Conexiones de entrada y salida de agua											
9		Panel eléctrico y componentes en buen estado											
10		Estado y nivel de aceite											
11		Caudalímetro encendido											
12		Nivel de presión de helio											
13		Estado de válvulas del circuito de refrigeración											
14		Comprobación nivel de tanque de vaciado I											
15	Arranque	Correcta conexión a red eléctrica de motor y bomba											
16		Magnetotérmicos en posición ON											
17		Interruptor principal en posición ON											
18		Verificación de entrada de aire											
19		Piloto de tensión encendido											
20		Comprobación de caudal de refrigeración											
21		Comprobación de caudal de impulsión de bomba											
22		Comprobación de presión de caudal de refrigeración											
23		Comprobación de nivel de tanque de vaciado II											
24		Piloto de agua encendido											
25		Piloto de helio encendido											
26		Tacómetro encendido											
27		Medidor de potencia encendido											
28		Termómetros de medida encendidos											
29		Báscula encendida											
30		Bombona para aire líquido en posición											
31		Comprobación de inicio de video											
32		Descripción del ensayo (fecha, presión, aire, recirc.)											
33		Pulsador de encendido y arranque funcionando											
34		Piloto de aceite encendido											
35		Racor de vaso de expansión no se calienta											
36		Botón de parada de máquina.											

<b>37</b>	<b>Parada</b>	<b>Comprobación de estado de bomba parada</b>									
<b>38</b>		<b>Cierre de válvula principal de caudal de refrigeración</b>									
<b>39</b>		<b>Cierre de tapa de entrada de aire</b>									
<b>40</b>		<b>Comprobación de desconexión de bomba</b>									
<b>41</b>		<b>Comprobación de desconexión de máquina</b>									

*Figura 35. Tabla de puesta en marcha nueva de la máquina Stirling ZIF-1002.*

## **2.3. Descripción de la metodología de la toma de datos y transcripción de estos al ordenador mediante el software Matlab**

En el presente apartado se desarrollará el procedimiento seguido para tomar los datos y transcribir estos al ordenador mediante el software Matlab. Dado que este proceso es lineal en el tiempo, se desarrollará la metodología por pasos de forma que el primer paso es la grabación del vídeo y el último el resultado del análisis que lleva a cabo el script desarrollado en Matlab.

### **2.3.1. Grabación de vídeo del ensayo**

Ante la ausencia de algún sistema de recopilación de datos en la máquina, se decide capturar los datos característicos (que serán explicados más adelante) a través de una cámara de vídeo que estará grabando durante todo el tiempo de funcionamiento de la máquina. Este procedimiento tiene ventajas e inconvenientes. Por un lado, se recopilan todos los datos necesarios y relevantes para el estudio de una forma sencilla, ya que basta con grabar secuencialmente todos los parámetros mostrados por los diferentes dispositivos. Por otro lado, se trata de un procedimiento tedioso, ya que el vídeo en sí mismo no puede transcribirse y es necesario que se anoten todos los datos repasando el vídeo, lo cual supone un gasto de tiempo considerable.

### **2.3.2. Transcripción de datos del vídeo del ensayo**

Una vez capturados los datos del ensayo, se procede a transcribirlos a una tabla creada mediante el software *Excel*.

*Figura 36. Plantilla para la transcripción de datos de los ensayos.*

Esta tabla está destinada a leerse mediante el script de Matlab, por lo que deberá seguir el formato que puede observarse en la anterior figura y, además, el nombre del fichero deberá llevar una nomenclatura determinada.

Se deberán identificar en el nombre del fichero los siguientes datos:

- El motor ha generado el aire frío haciendo o no uso del baipás.
  - El motor ha generado el aire frío con o sin tapa de entrada de aire.
  - Presión del helio, que sabemos que será distinta a la presión de trabajo, quedando esta última identificada en el interior del fichero.

La nomenclatura que se utilizará para identificar los distintos ficheros de toma de datos del experimento será la siguiente:

[ID]\_[T ó F]bypass\_[T ó F]tapa\_[Presión de helio]bar.xlsx

Siendo:

- *[ID]*: Identificador de experimento. Número entero creciente en función de la fecha en la que se ha realizado el experimento (orden cronológico).
  - *[T ó F]bypass*: "True" o "False" bypass, significando *True* que el ensayo se ha realizado mediante la recirculación de refrigerante y *False* el caso contrario.
  - *[T ó F]tapa*: "True" o "False" tapa, significando *True* que el ensayo se ha realizado mediante la tapa de entrada de aire y *False* el caso contrario.

- *[Presión de helio]*: Presión de trabajo de la máquina Stirling durante el ensayo.

Ejemplo I: Primer experimento, sin bypass, sin tapa de toma de aire y a 19 bar:

1\_Fbypass\_Ftapa\_19bar.xlsx

Ejemplo II: Quinto experimento, con bypass, sin tapa de toma de aire y a 25 bar:

5\_Tbypass\_Ftapa\_25bar.xlsx

### 2.3.3. Interpretación de datos a través del script “*interpretedeensayo.m*” y “*comparadorensayos.m*”

Una vez transcritos los datos del vídeo a la tabla Excel, se procesan a través de los scripts “*interpretedeensayo.m*” y “*comparadorensayos.m*”.

#### *interpretedeensayo.m*

En el siguiente script se llevará a cabo la lectura, representación y guardado de los datos obtenidos durante el ensayo que se escoja. Se debe modificar el nombre del fichero Excel que se desea cargar en las primeras líneas del código y este fichero debe estar contenido en la misma carpeta que el script. Una vez leídos los datos, se preguntará al usuario si se desean representar y si desea guardar el estado de dichos datos para después compararlos con los de otros ensayos a través del segundo script “*comparadorensayos.m*”.

El código se divide en 3 partes:

1.- En la primera parte (lectura), se leen los datos del Excel y se almacenan en variables. También se almacenan los ajustes de las nubes de puntos de aquellos parámetros que se desean presentar junto a su respectivo ajuste. De esta manera se podrán observar los puntos de los ensayos y las tendencias de estos.

2.- En la segunda parte del código (representación), se pregunta al usuario si se desea o no representar los datos cargados del Excel en las diferentes gráficas diseñadas. Las figuras aparecen distribuidas en la pantalla si se acepta dicha representación.

3.- En la tercera y última parte del código (guardado), se pregunta al usuario si desea o no guardar los datos del actual ensayo en un fichero \*.mat. En caso de que se deseé guardar, se generará el fichero \*.mat correspondiente al ensayo cargado. Se pueden

guardar tantos ficheros como se deseen, pero se recomienda no sobrecargar demasiado la carpeta contenedora de script y ficheros, ya que el script “*comparadorensayos.m*”, representará todos los ensayos de la carpeta en una misma gráfica, y, si son demasiados, no se podrán distinguir correctamente las diferencias entre estos.

#### ***comparadorensayos.m***

Al ejecutar este script, se cargan todos los ficheros “\*.mat” correspondientes a cada uno de los ensayos guardados a través del script descrito en el apartado anterior y se representan en gráficas todos los ajustes de dichos datos. De esta manera se puede realizar una comparativa de los ensayos y detectar de esta forma las variaciones de los datos de estos.

Con estos scripts se procederá a realizar el análisis de la influencia de la tapa de entrada de aire del motor, la influencia de las presiones de trabajo en el funcionamiento del motor y, finalmente, el principal objetivo del presente trabajo, analizar la influencia del aumento de temperatura del foco caliente y la viabilidad de la implementación del circuito de recirculación de líquido refrigerante. Para ello, se procede a ejecutar tantas veces como sea necesario los scripts anteriormente descritos para guardar las gráficas que representan las tendencias y los valores de las variables de estudio que se describirán a continuación. Además, mediante el script “*comparadorensayos.m*” se procederá a comparar las tendencias de dichas variables entre los distintos ensayos guardados.

## 2.4. Instrucciones de uso de los scripts de Matlab: “*interpreteensayo.m*” y “*comparadorensayos.m*”

En el presente apartado se llevarán a cabo una serie de explicaciones de las instrucciones básicas que se deben conocer para hacer uso de los scripts de análisis y comparativa de los diferentes ensayos que se realicen en el motor Stirling.

### “*interpreteensayo.m*”

El objetivo fundamental del script “*interpreteensayo.m*” es el de leer los valores de la tabla *Excel* de datos del ensayo y representar los datos en gráficas. Además, se representan también los ajustes de dichos datos y, para algunas gráficas, información relevante con la variable que se estudia en dicho ensayo.

#### 1- Tablas Excel

Las tablas deberán estar contenidas en la misma carpeta donde se ejecuta el script “*interpreteensayo.m*” y deberán llevar la nomenclatura descrita en apartados anteriores. Es importante destacar que para que los datos descriptivos de las gráficas se muestren correctamente, no se puede leer un ensayo con número de ensayo superior a 9. Si el número del ensayo es superior a dicho valor, se debe modificar para que se encuentre entre 0 y 9.

Además, el nombre del archivo *Excel* del ensayo no podrá contener ningún otro tipo de carácter no contemplado en la descripción de la nomenclatura del fichero.

#### 2- Lectura de tablas Excel

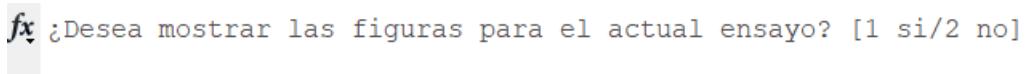
Para seleccionar el ensayo que se desea leer, se debe modificar la línea 9 del código, incluyendo en la variable “*titulodocumento*” el nombre del fichero que se desea leer.

```
9 -     titulodocumento = '9_Fbypass_Ftapa_15bar.xlsx';
```

Figura 37. Línea de código que se debe modificar para seleccionar el fichero *Excel* que se desea leer.

### 3- Obtener gráficas

Tras modificar el nombre del fichero que se desea leer, el programa preguntará al usuario si se desea mostrar o no las gráficas calculadas a partir de los datos del fichero pasado.



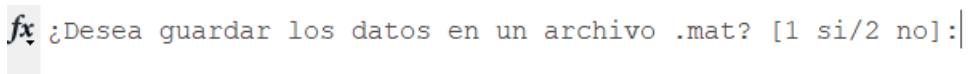
fx ¿Desea mostrar las figuras para el actual ensayo? [1 si/2 no]

Figura 38. Captura de pantalla de la consola de Matlab en el momento en que el programa pregunta si se desean mostrar las figuras del ensayo cargado.

En caso de introducir un 1, el programa mostrará todas las gráficas ordenadas en la pantalla. A continuación, el usuario deberá maximizar la gráfica que desea estudiar con mayor detalle. En caso de introducir un 2, el programa continuará sin mostrar ninguna gráfica.

### 4- Guardar datos calculados del ensayo

A continuación, el programa pregunta si se desean guardar los datos calculados del ensayo. El objetivo principal de esta parte del programa es guardar los datos que ha calculado a partir del fichero Excel para posteriormente poder compararlos con el fichero “comparadorensayos.m”, que cargará todos los ficheros “.mat” almacenados para representar las gráficas comparativas de los ensayos.



fx ¿Desea guardar los datos en un archivo .mat? [1 si/2 no]:

Figura 39. Captura de pantalla de la consola de Matlab en el momento en el que el programa pregunta si se desean guardar los datos calculados en un fichero “.mat”.

En caso de introducir un 1, el script guardará un archivo con formato “.mat” en la misma carpeta en la que se encuentra el script. Dicho archivo tendrá el mismo nombre que el fichero leído. En caso de introducir un 2, el script finalizará sin guardar los datos.

### **“comparadorensayos.m”**

El objetivo del script es comparar las gráficas obtenidas en todos los ensayos que hayan sido anteriormente procesados y guardados mediante el script “*interpreteensayos.m*”. Una vez ejecutado el script, buscará en la carpeta contenedora de dicho script todos los ficheros “...bar.mat” y mostrará las gráficas comparativas a partir de los datos cargados.

Se deben aclarar dos puntos fundamentales para el correcto funcionamiento de dicho script:

- Aunque se ha programado mostrar la gráfica comparativa número 1 de  $t - T_1, t - T_2, t - T_3$  y  $t - T_4$ , se pueden obtener, en función del número de ensayos cargados, tal cantidad de funciones que la gráfica se vuelve ilegible para su estudio. Además, dado que dichos valores son prescindibles, se ha optado por comentar dicha parte del código para no dar uso a esta función.

```
27 % %Esta primera es una locura con los puntos, por lo que solo tendencias.
28 % %_____ 1.- Gráfica de tiempo-(T1(Col4),T2(Col5),T3(Col6),T4(Col7))
29 % figure('Name','1.- Temperaturas T1,T2,T3,T4','NumberTitle','off')
30 % for i=1:length(filesEnsayos)
31 %     hold on;
32 %     for j=4:7
33 %         switch j
34 %             case 4
35 %                 plot(ensayos(i).xT, ensayos(i).plotTs(j-3,:));
36 %             case 5
37 %                 plot(ensayos(i).xT, ensayos(i).plotTs(j-3,:));
38 %             case 6
39 %                 plot(ensayos(i).xT, ensayos(i).plotTs(j-3,:));
40 %             case 7
41 %                 plot(ensayos(i).xT, ensayos(i).plotTs(j-3,:));
42 %             end
43 %         end
44 %     end
45 % xlabel('Tiempo (t) [s]');
46 % ylabel('Temperatura (T) [°C]');
47 % xlim([0 1600]);
48
```

*Figura 40. Captura de pantalla de una parte del código del script “comparadorensayos.m” en la que se muestra la representación de la primera gráfica comentada para evitar su utilización.*

- Dado que no existen suficientes marcadores de gráficas por defecto en Matlab, la representación número 2 de  $t - T_{amb}, t - T_{entagua}$  y  $t - T_{salagua}$  solo funciona cuando el número de ensayos que se cargan es igual o inferior a 4. De lo contrario, se debe comentar esta parte del código para que el compilador no lance un error de ejecución del script.

```

49 % figure('Name','2.- Temperatura ambiente, entrada y salida agua',...
50 %      'NumberTitle','off');
51 % hold on;
52 % t=_____ 2.-Gráfica de tiempo-(Tamb(Col9),Tentagua(Col10),Tsalaqua(Col11)
53 % legendsTs = string.empty;
54 % x = 1; %Para marcadores
55 % k = 1; %Para colores
56 % t = 1; %Para legends
57 % for i=1:length(filesEnsayos)
58 %     plot(ensayos(i).t, str2double(ensayos(i).datos_ensayo(:,9)),...
59 %           'LineStyle', 'none',...
60 %           'Marker', marcadores(x),...
61 %           'Color', colores(k));
62 %     plot(ensayos(i).t, str2double(ensayos(i).datos_ensayo(:,10)),...
63 %           'LineStyle', 'none',...
64 %           'Marker', marcadores(x+1),...
65 %           'Color', colores(k+1));
66 %     plot(ensayos(i).t, str2double(ensayos(i).datos_ensayo(:,11)),...
67 %           'LineStyle', 'none',...
68 %           'Marker', marcadores(x+2),...
69 %           'Color', colores(k+2));
70 %     for j=9:11
71 %         switch j
72 %             case 9
73 %                 plotea(t) = plot(ensayos{i}.xT, ensayos{i}.plotTs2(j-7,:)
74 %                 'color', colores(k),...

```

*Figura 41. Captura de pantalla de una parte del código del script “comparadorensayos.m” en la que se muestra parte del código donde se representan las gráficas  $t - T_{amb}$ ,  $t - T_{ent_{agua}}$  y  $t - T_{sal_{agua}}$ .*

Por el mismo motivo que el comentado anteriormente, el número máximo de ensayos que se pueden comparar es de 5. De lo contrario no existen marcadores suficientes para las representaciones gráficas y el programa lanza un error de ejecución.

Una vez ejecutado el script, si no se da alguno de los problemas mencionados anteriormente, se muestran todas las gráficas distribuidas en la pantalla para que posteriormente el usuario se encargue de maximizar o minimizar las gráficas que desea o no estudiar con mayor precisión.

## 2.5. Descripción de los distintos estados de funcionamiento

### 2.5.1. Presión de helio y presión de trabajo

Uno de los parámetros más importantes del motor es la presión de trabajo, que es la presión media del helio en las cámaras de compresión y expansión durante el funcionamiento del motor. La diferencia de presión de trabajo y presión de helio es que la presión de helio es la presión a la que se introduce el helio en el motor antes de su encendido. Tras el arranque de la máquina Stirling, la presión disminuye de forma que *la presión de helio > presión de trabajo*.

Las presiones de trabajo que se manejaran en el presente TFG varían entre 15 y 19 bares.

### 2.5.2. Tapa de entrada de aire

En la parte superior del licuador se encuentra una malla metálica cuya función es recoger la humedad del aire al congelarse. Una vez congelada la humedad, el paso de aire desde la zona superior queda bloqueado, por lo que a partir de entonces el aire entra en la máquina por el mismo tubo por el que el aire líquido escurre al exterior. Dicha malla metálica tiene una tapa y se desconoce si dicha tapa influye en la cantidad de aire líquido que es capaz de producir el motor.

Debido a esto, una de las hipótesis a resolver es si en ausencia de dicha tapa se genera o no más cantidad de aire licuado en el mismo tiempo de ensayo y qué cambios se producen en el motor como consecuencia del uso de esta.

Se realizan algunos ensayos, a la misma presión de trabajo, pero variando la presencia de la tapa de entrada de aire.

### 2.5.3. Influencia de la presión en los parámetros característicos del ensayo

Una de las principales dudas no resueltas sobre el funcionamiento del aparato soviético es cómo influye la variación de presión en las temperaturas de los focos, la producción de aire líquido, las potencias de refrigeración y de extracción de calor al aire y, en definitiva, en el rendimiento de frío y calor del aparato.

Esto es un punto importante ya que es evidente que cuanto menor sea la presión de trabajo, menor será el consumo eléctrico, por lo que si existe un rango óptimo de presiones sería conveniente conocerlo. Además, a menor presión, menor carga interna del motor, haciéndole que este trabaje en mejores condiciones y aumentando su tiempo de vida.

#### 2.5.4. Recirculación de líquido refrigerante

Se debe analizar la influencia de la variación de temperatura de entrada del agua, por lo que se distinguen 2 tipos de ensayos en este sentido: ensayos primitivos, en los que se estudian las variables del motor sin hacer recircular el líquido refrigerante, y ensayos con recirculación, en los que se estudian las mismas variables, pero haciendo recircular el líquido refrigerante.

## 2.6. Descripción de los parámetros característicos y cálculos más importantes

A continuación, se describen aquellas variables y parámetros que son objeto de estudio para resolver las diferentes hipótesis planteadas. Se presentarán los nombres, así como sus respectivos acrónimos (*(entre paréntesis)*), unidades (*[entre corchetes]*) y una breve definición.

### 2.6.1. Parámetros característicos medidos

- Tiempo ( $t$ ) [s]: representa cada instante de tiempo del ensayo. Generalmente se utilizarán los segundos.
- Litros totales ( $L_t$ ) [L]: cantidad de líquido refrigerante que entra y sale de la máquina. Cuando no se usa la modificación en el circuito de refrigeración, este valor corresponde con el valor leído en el primer caudalímetro, mientras que cuando se usa la modificación, el valor es la suma de los dos caudalímetros, el principal y el de baipás.
- Temperaturas 1, 2, 3 y 4 ( $T_1, T_2, T_3$  y  $T_4$ ) [°C]: representan temperaturas en diferentes puntos del foco caliente. En la siguiente figura se puede observar el lugar en el que están situados dichos puntos y un ejemplo de gradiente de temperatura.

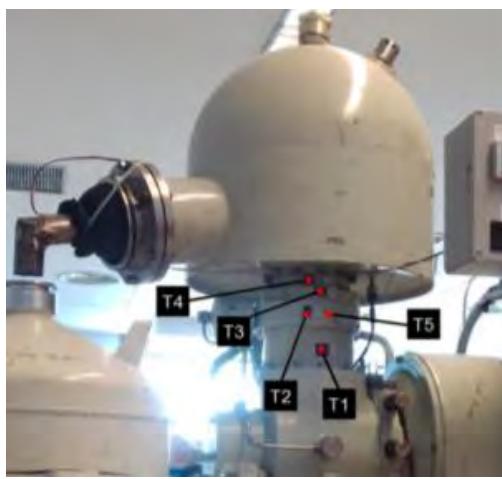


Figura 42. Hidalgo, A (2020). Localización de puntos de temperaturas del foco caliente.

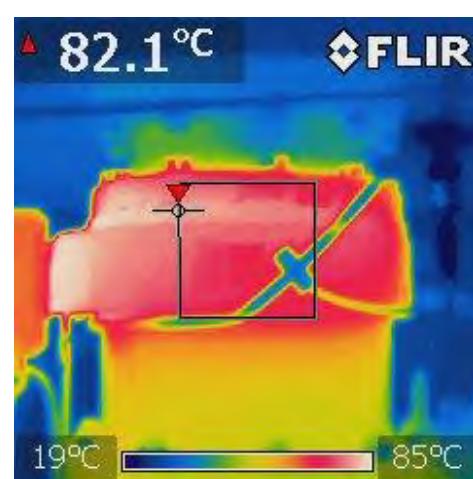


Figura 43. Hidalgo, A (2020). Imagen termográfica del foco caliente de ejemplo.

- Presión de vacío Venturi ( $P_{venturi}$ )  $\left[\frac{kg}{cm^2}\right]$ : Para asegurar un nivel correcto de caudal de refrigeración, en la parte frontal de la máquina existe un manómetro diferencial que indica la diferencia de presión creada a la salida del refrigerante debido a un efecto Venturi del que dispone.
- Temperatura ambiente y temperaturas de entrada y salida de agua ( $T_{amb}, T_{ent\_agua}$  y  $T_{sal\_agua}$ )  $[^\circ C]$ : temperatura ambiente durante el ensayo, temperatura de entrada de líquido refrigerante y temperatura de salida de líquido refrigerante, respectivamente.
- Temperatura de foco caliente y temperatura de foco frío ( $T_{fc}$  y  $T_{ff}$ )  $[^\circ C]$ : temperaturas de los respectivos focos medidas mediante termopares situados en el motor.



*Figura 44. Hidalgo, A (2020). Termopar para medir la temperatura del foco caliente.*



*Figura 45. Hidalgo, A (2020). Termopar para medir la temperatura del foco frío*

- Presión de referencia ( $P_{ref}$ ) [bar]: presión de suministro del refrigerante medida mediante un manómetro situado al inicio del sistema de refrigeración.
- Voltaje 1, 2 y 3 ( $U_1, U_2$  y  $U_3$ ) [V]: caída de tensión en las líneas 1, 2 y 3 del motor.
- Intensidad 1, 2 y 3 ( $I_1, I_2$  y  $I_3$ ) [A]: intensidades de línea en las líneas 1, 2 y 3 del motor.
- Masa de aire líquido ( $m$ ) [g]: cantidad de aire líquido contenido en el depósito durante cada uno de los ensayos. En algunos ensayos ya existe aire en el interior del depósito contenedor, por lo que este parámetro no siempre representa la cantidad de aire generado durante el ensayo.
- Masa de aire líquido generado ( $m_{aire}$ ) [g]: cantidad de aire líquido generado durante el ensayo, sin tener en cuenta la posible cantidad ya existente en el depósito contenedor.

- Revoluciones del motor ( $\omega$ ) [rpm]: revoluciones de giro por minuto del cigüeñal.
- Presión de helio ( $P_{helio}$ ) [bar]: presión a la que se introduce el gas de trabajo (He) en el interior del motor.
- Presión de trabajo ( $P_{trab}$ ) [bar]: presión media a la que se somete el helio durante el funcionamiento del motor.

Es importante destacar que para el caudal de aire líquido generado y las siguientes variables en las que sea necesario hacer uso del tiempo se deberá distinguir entre variables respecto al tiempo medio y variables respecto al tiempo instantáneo.

- Variable respecto al tiempo medio: representa una variable respecto al tiempo total transcurrido en el momento de medición de dicha variable.
- Variable respecto al tiempo instantáneo: representa una variable respecto a la diferencia de tiempo entre el instante en que se realiza la medición de la variable y el tiempo inmediatamente anterior.

De esta forma, en el presente proyecto solo se tendrán en cuenta para su análisis el caudal de aire líquido generado instantáneo y las potencias instantáneas de refrigeración, de extracción de calor del aire y la de pérdidas, ya que, de lo contrario, se ha observado que algunas de las variables medias no llegan a estabilizarse dada la influencia de los valores del régimen transitorio.

## 2.6.2. Variables calculadas

### Potencia eléctrica instantánea ( $P_{ele}$ ) [W]

Representa la cantidad de energía eléctrica que consume la máquina por unidad de tiempo. En ocasiones, se representa en [kW] por simplicidad.

$$P_{ele} = 3 \cdot \frac{U}{\sqrt{3}} * I * \cos \phi [W] \quad [1]$$

Para los datos de nuestro ensayo:  $P_{ele} = 3 \cdot \frac{U_1+U_2+U_3}{3*\sqrt{3}} * \frac{I_1+I_2+I_3}{3} * 0.98$

### Potencia invertida en refrigeración ( $P_{ref}$ ) [W]

Representa la cantidad de energía total extraído por el líquido refrigerante por unidad de tiempo. Para calcularla, se estima un valor de calor específico del agua a presión constante de  $Cp_{agua} = 4184 \left[ \frac{J}{kgK} \right]$ . Dado que la diferencia de temperaturas entre la entrada y la salida del agua no es demasiado elevada (aproximadamente 10°C), se puede suponer que  $Cp_{agua}$  permanece constante.

$$P_{ref} = \dot{m}_{ref} \cdot Cp_{agua} \cdot \Delta T_{agua} = \dot{m}_{ref} \cdot Cp_{agua} \cdot (T_{salH_2O} - T_{entH_2O}) [W] \quad [2]$$

Sabiendo que:  $\dot{m}_{ref}$  es la pendiente del ajuste lineal de los datos obtenidos del caudalímetro (4), descrito en los elementos del circuito de refrigeración y que  $\rho_{agua} = 0.996 \left[ \frac{kg}{m^3} \right]$ .

```
m_agua =
polyfit(t(:,), str2double(datos_ensayo(:, 3)), 1) * 0.996;
%Caudal agua m_agua(1) [kg/s]
m_dot_agua = m_agua(1)
```

Siendo `datos_ensayo(:, 3)`, la columna correspondiente al volumen de agua acumulado desde el inicio del ensayo.

### Caudal de aire líquido generado ( $\dot{m}_{aire}$ ) $\left[\frac{kg}{s}\right]$

Representa la cantidad de aire que genera el motor por unidad de tiempo durante todo el ensayo.

$$\dot{m}_{aire} = \frac{m_{aire,t_2} - m_{aire,t_1}}{1000 \cdot (t_2 - t_1)} \left[\frac{kg}{s}\right] \quad [3]$$

### Potencia invertida en extraer calor al aire ( $P_{aire}$ ) [W]

Representa la cantidad de calor total extraído al aire durante la fase de expansión del ciclo por unidad de tiempo. En este caso, no se puede suponer que  $Cp_{aire} \sim cte$ , ya que la variación de temperatura es muy grande y esto puede suponer una variación de  $Cp_{aire}$  considerable. Para solucionar este problema, se ha importado una tabla de valores de  $Cp_{aire}$  para cada temperatura y el valor del calor extraído se resolverá integrando la función de  $Cp_{aire}$  con respecto la temperatura. Para obtener la función de  $Cp$  que se desea integrar, se ha ajustado la nube de puntos de los datos importados mediante una ecuación de sexto grado.

Se sabe que, dado que existe un cambio de estado, parte del calor se invierte en disminuir la temperatura del aire y otra parte en cambiar de estado, por lo que el calor total será:

$$P_{aire} = P_{lat-air} + P_{sens-air} \quad [4]$$

$$P_{lat-air} = \dot{m}_{aire} \cdot (X_{O_2} \cdot Q_{lat-vap-O_2} + X_{N_2} \cdot Q_{lat-vap-N_2}) \quad [5]$$

Siendo:

$X_{O_2}, X_{N_2}$ : Composiciones volumétricas [%] del oxígeno y el nitrógeno en el aire. Se toma  $X_{O_2} = 21\%$  y  $X_{N_2} = 78\%$

$P_{lat-vap-O_2}, P_{lat-vap-N_2}$ : Potencia latente de vaporización del oxígeno y el nitrógeno en  $\left[\frac{J}{kg \cdot s}\right]$ . Se toma  $P_{lat-vap-O_2} = 213000 \left[\frac{J}{kg \cdot s}\right]$  y  $P_{lat-vap-N_2} = 201000 \left[\frac{J}{kg \cdot s}\right]$

$\dot{m}_{aire}$ : Caudal de aire en  $\left[\frac{kg}{s}\right]$ .

$$P_{sens-aire} = \dot{m}_{aire} \cdot \int_{T_{fc}}^{T_{ff}} C_p(T) dT [J] \quad [6]$$

Siendo  $C_p(T)$  una función polinómica de sexto grado obtenida con *Matlab*. Véase a continuación un fragmento del código en el que se realiza dicho cálculo:

```
% 9- Cálculo de t-PotAire
%Para que sea lo más exacta posible, tengo que obtener
una recta
%para la Cp, ya que varía en función de la temperatura.
Para ello importo
%valores de una tabla de internet (hoba.mat) y obtengo
una recta a partir de los
%mismos.
Pot_aire_sens = zeros(1,30);
load hoba.mat x
ajusteCp= polyfit(x(:,1),x(:,3),6); %Ajuste de Cp a
partir de tabla importada
funct_Cp = @(T)
ajusteCp(1)*T.^6+ajusteCp(2)*T.^5+ajusteCp(3)*T.^4 ...
+ajusteCp(4)*T.^3+ajusteCp(5)*T.^2+ajusteCp(6)*T.^1+ajus
teCp(7);
for i=1:30
    Pot_aire_sens(i) =
m_dot_aire(i)*integral(funct_Cp,str2double(datos_ensayo(
i,13)),...
str2double(datos_ensayo(i,9))); %[J]
end
```

### Potencia de pérdidas ( $P_{perd}$ ) [W]

Es la cantidad de energía por unidad de tiempo que se pierde debido a rozamiento, disipación, etc.

$$P_{perd} = P_{ele} - (P_{ref} + P_{aire}) [W] \quad [7]$$

### Rendimiento frío ( $\eta_{frio}$ )

Representa la cantidad de energía que se invierte en extraer el calor al aire respecto a la cantidad de energía que se invierte en hacer funcionar el ciclo.

$$\eta_{frio} = \frac{P_{aire}}{P_{ele}} \quad [8]$$

### Rendimiento calor ( $\eta_{calor}$ )

Representa la cantidad de energía que se invierte en refrigerar el foco caliente respecto a la cantidad de energía que se invierte en hacer funcionar el ciclo.

$$\eta_{calor} = \frac{P_{ref}}{P_{ele}} \quad [9]$$

### Rendimiento total ( $\eta_{total}$ )

Representa la cantidad de energía que se invierte en refrigerar el foco caliente y en extraer el calor del foco frío respecto a la cantidad de energía que se invierte en hacer funcionar el ciclo.

$$\eta_{total} = \frac{P_{aire} + P_{ref}}{P_{ele}} \quad [10]$$

---

### 3. Toma de datos, resultados y análisis

---

#### 3.1. Descripción del apartado

A lo largo del presente apartado se mostrarán aquellas gráficas que se han considerado objeto de estudio para el análisis que se desarrollará al final. Aquellas gráficas en las que se detecta información relevante para el estudio aparecerán acompañadas de comentarios e hipótesis con el objetivo principal de obtener un resultado a partir de estos. Las gráficas consideradas menos relevantes, pero que también han facilitado el estudio del comportamiento del motor, se encuentran en el apartado de anexos del presente documento.

Para el análisis de la influencia de la tapa de entrada de aire y las presiones de trabajo del motor, se consideran gráficas imprescindibles objeto de estudio aquellas en las que se compare el comportamiento de las variables entre distintos ensayos, mientras que las gráficas que han facilitado el entendimiento del comportamiento del motor pero que no se han considerado imprescindibles son en las que aparecen el comportamiento de cada variable en cada ensayo en particular. Estas últimas vendrán incluidas en el documento de Anexos del presente TFG.

Por último, se debe mencionar que no se ha incorporado para el estudio el ensayo realizado a una presión de trabajo de 17 [bar], ya que tras la transcripción de los datos, se ha observado que no llega a alcanzar el régimen estacionario.

### 3.2. Comparativa y análisis de resultados.

#### 3.2.1. Resultados y análisis de la influencia de la tapa de entrada de aire y resultados

Comparativa de ensayos con tapa de entrada de aire y sin tapa de entrada de aire a iguales presiones de trabajo.

##### 3.2.1.1. Comparativa de ensayos con y sin tapa a 19 [bar] de presión de trabajo

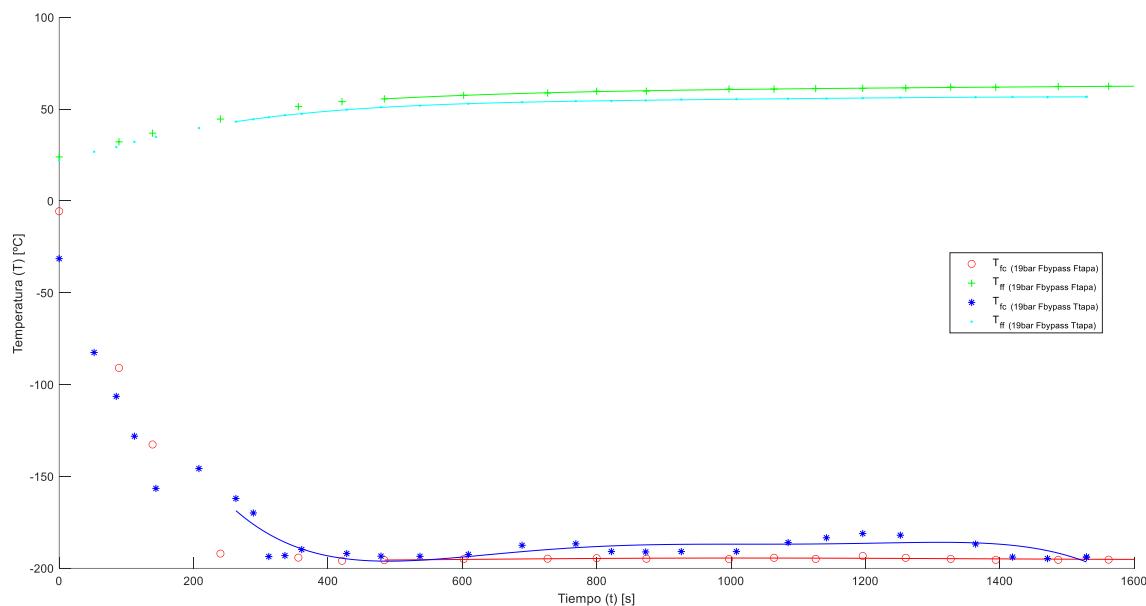


Figura 46. Gráfica comparativa de  $T_{ff}$  y  $T_{fc}$  en función del tiempo, a 19 [bar] de presión de trabajo, con y sin tapa de entrada de aire y sin recirculación del líquido refrigerante.

- Tal como se puede observar en la nube de puntos del foco frío, al principio del ensayo con tapa de entrada de aire, se produce un aumento brusco de la temperatura de este, para a continuación volver a disminuir y oscilar entre  $-181.1$  y  $-194.7^{\circ}\text{C}$ .
- Cuando el ensayo se realiza sin la tapa de entrada de aire, desaparece el comportamiento anómalo del foco frío al principio del ensayo, no produciéndose un aumento brusco de la temperatura del foco frío y desapareciendo también la oscilación. El valor del foco frío se estabiliza completamente en  $-195^{\circ}\text{C}$ .
- En el caso del foco caliente, en ambos casos se estabiliza la temperatura a partir de los 400 segundos de ensayo aproximadamente, alcanzando un valor de  $56.3^{\circ}\text{C}$  en el caso del ensayo con tapa y un valor de  $61.5^{\circ}\text{C}$  en el caso de no tener la tapa.

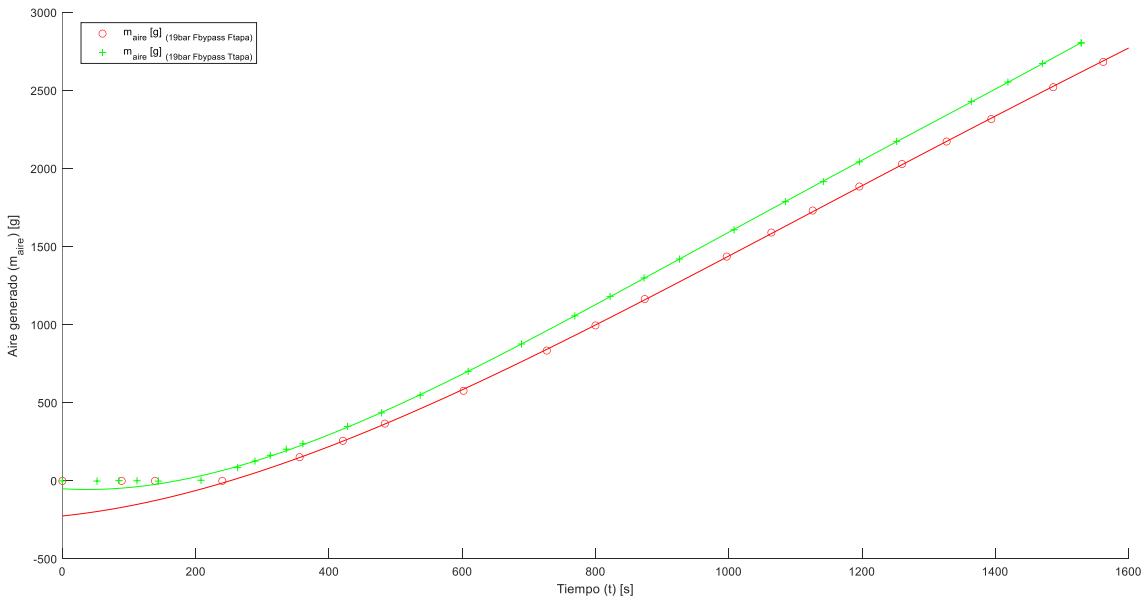


Figura 47. Gráfica comparativa de producción de aire líquido en función del tiempo, a 19 [bar] de presión de trabajo, con y sin tapa de entrada de aire y sin recirculación del líquido refrigerante.

- La producción de aire líquido parece comenzar en el mismo tiempo en ambos ensayos.
- La pendiente es ligeramente superior en el caso del ensayo con tapa de aire, por lo que se deduce que el caudal de aire líquido producido será ligeramente superior en este caso.

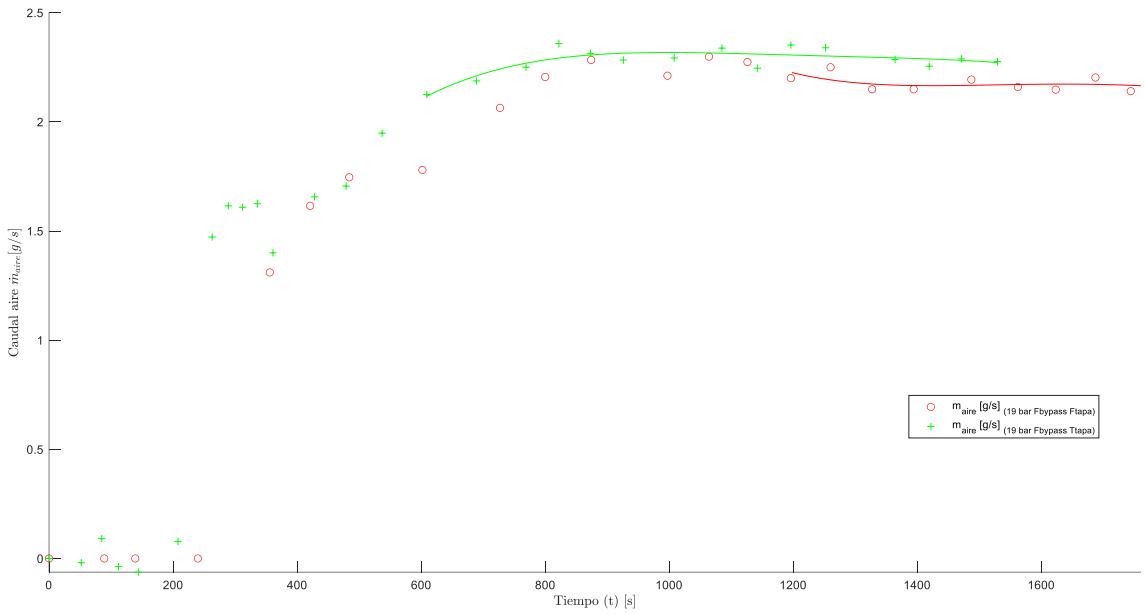


Figura 48. Gráfica comparativa de caudal de aire líquido generado en función del tiempo, a 19 [bar] de presión de trabajo, con y sin tapa de entrada de aire y sin recirculación del líquido refrigerante.

- Tal como se ha deducido anteriormente, se puede observar que el caudal de producción de aire líquido sin la tapa es ligeramente inferior al ensayo realizado con tapa. En el caso de no tener la tapa, se obtiene una producción media de aire de  $\dot{m}_{aire} = 2.11 \left[ \frac{g}{s} \right]$  y en el caso de tener tapa de  $\dot{m}_{aire} = 2.29 \left[ \frac{g}{s} \right]$ . Sin embargo, como se verá a continuación, este último es ligeramente decreciente con el tiempo.
- Para comprender la gráfica anterior, es importante destacar que la duración del ensayo en el caso de no tener la tapa de aire es aproximadamente 40 minutos, pudiéndose asegurar que se alcanza el régimen estacionario por completo. Sin embargo, esto no es así en el caso del ensayo con tapa.
- Sabiendo lo anterior, queda por analizar si con tapa a 19 [bar] de presión, disminuiría la producción a partir de los 30 minutos del ensayo, como se observará en ensayos posteriores.
- Por último, es importante destacar que la pendiente de producción de aire en el caso de tener tapa es ligeramente decreciente al final del ensayo, por lo que se puede deducir que, siguiendo la misma tendencia que en ensayos posteriores, se seguirá produciendo dicho decrecimiento. Véase en la siguiente gráfica dicha pendiente:

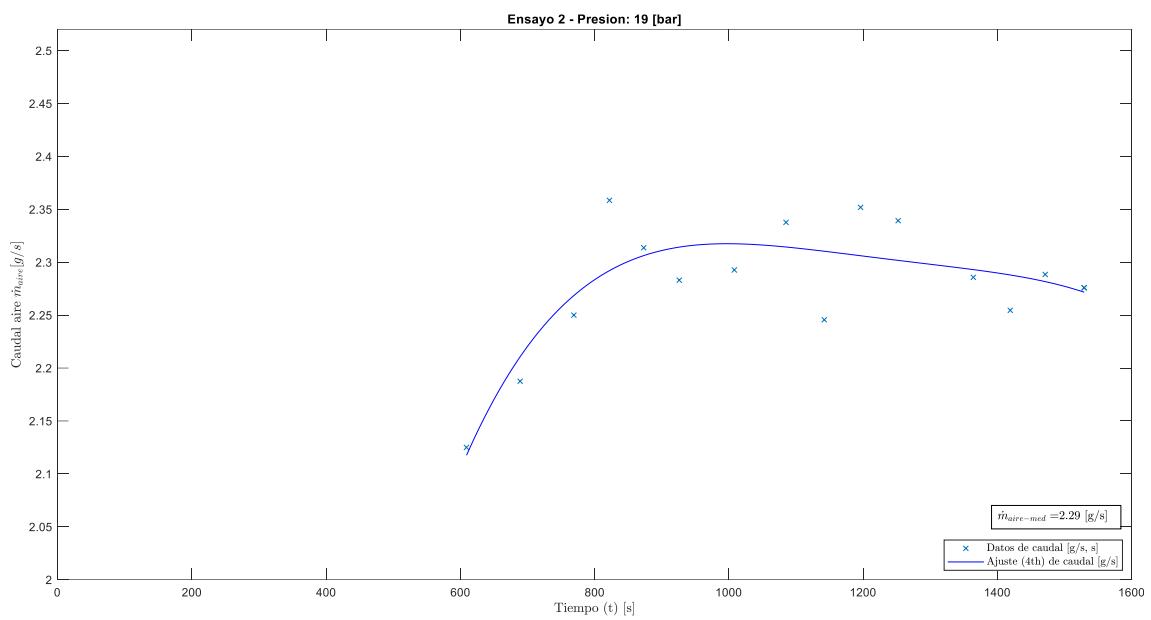


Figura 49. Producción de aire líquido en función del tiempo Ensayo a 19 [bar] con tapa de aire.

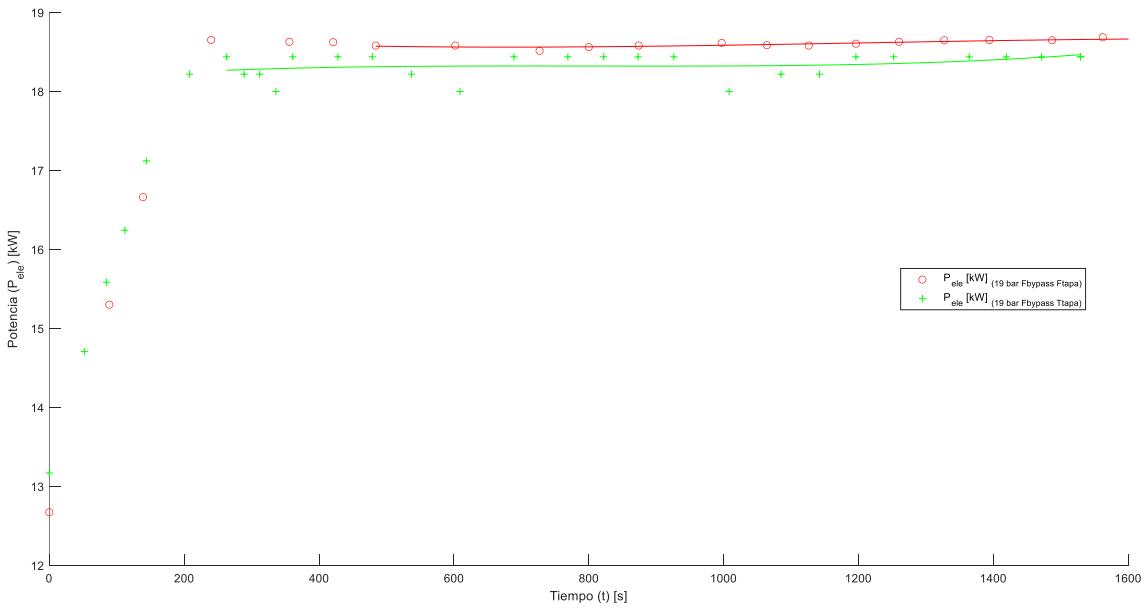


Figura 50. Gráfica comparativa de potencia eléctrica consumida en función del tiempo, a 19 [bar] de presión de trabajo, con y sin tapa de entrada de aire y sin recirculación del líquido refrigerante.

- Se observa que el consumo de energía eléctrica con la tapa de aire puesta es inferior al del consumo sin la tapa de aire. Se alcanza un valor estacionario de potencia consumida en el caso de no tener la tapa de aire de  $P_{ele} = 18.4 \text{ [kW]}$ , siendo los puntos prácticamente idénticos una vez estabilizado el valor. En el caso de tener tapa de aire, se consigue una potencia eléctrica media en su valor estabilizado de  $P_{ele} = 18.67 \text{ [kW]}$ . Sin embargo, en el caso de tener la tapa, la potencia eléctrica es oscilante durante todo el ensayo, mientras que sin tapa el valor se estabiliza por completo.
- Es importante destacar que, en el caso de tener tapa de aire, se observa un ligero crecimiento del valor del consumo con el tiempo. Queda por analizar si con más tiempo, el valor puede superar el consumo que tiene sin tapa de entrada de aire.

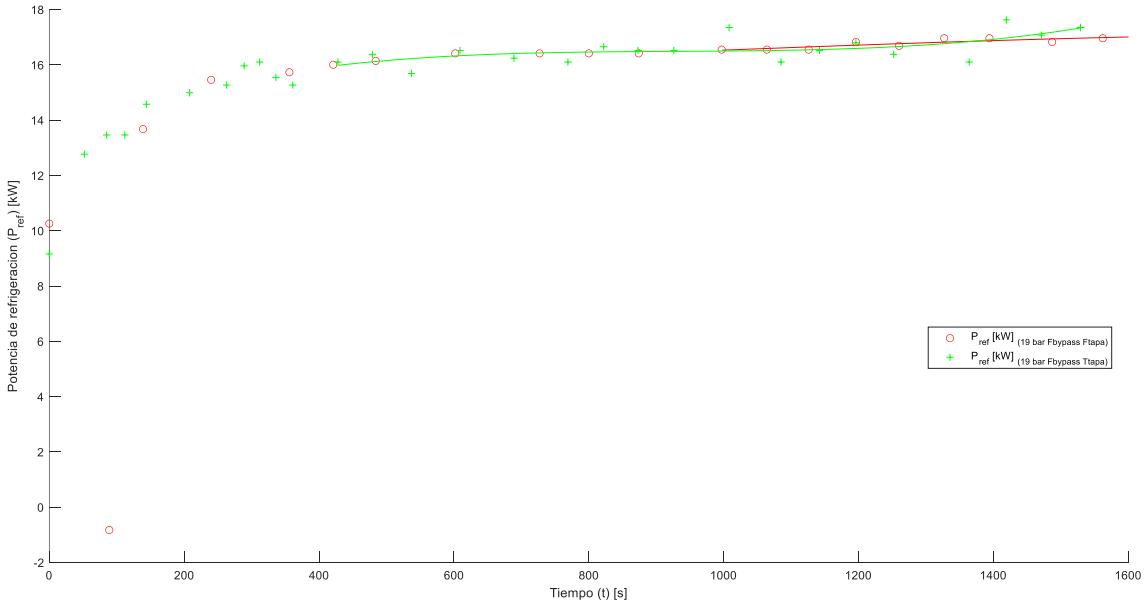


Figura 51. Gráfica comparativa de potencia de refrigeración en función del tiempo, a 19 [bar] de presión de trabajo, con y sin tapa de entrada de aire y sin recirculación del líquido refrigerante.

- En ambos casos, el comportamiento de la función de potencia de refrigeración es similar. En el caso de tener la tapa de aire, se alcanza un valor en régimen estacionario de  $P_{ref} = 16.45 \text{ [kW]}$ , siendo el valor creciente con el tiempo, llegando incluso a superar el valor estabilizado que se alcanza sin la tapa de aire. En el caso de no tener a la tapa de aire, se alcanza un valor de  $P_{ref} = 18.62 \text{ [kW]}$ , siendo este completamente estable una vez alcanzado el régimen estacionario.
- Los puntos obtenidos de potencia de refrigeración en el caso de tener la tapa de aire son oscilantes una vez alcanzado el régimen estacionario, mientras que en el caso de no tener tapa se estabilizan por completo.

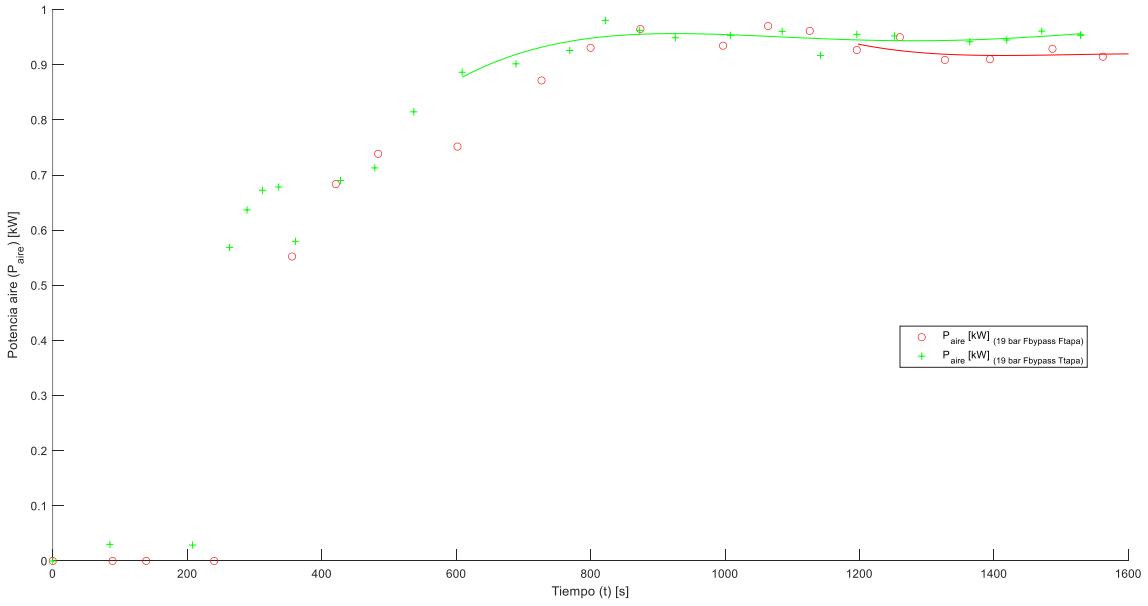


Figura 52. Gráfica comparativa de potencia extraída al aire en función del tiempo, a 19 [bar] de presión de trabajo, con y sin tapa de entrada de aire y sin recirculación del líquido refrigerante.

- Dado que el caudal de aire producido con tapa es superior al producido sin tapa, la potencia de refrigeración también lo es y, además, en la misma proporción.
- Se alcanza un valor medio de potencia extraída al aire de  $P_{aire} = 0.947$  [kW] en el caso del ensayo con tapa, y un valor de  $P_{aire} = 0.895$  [kW] en el ensayo sin tapa.
- El valor de potencia extraída al aire en el caso del ensayo con tapa es oscilante una vez alcanzado el régimen estacionario. Sin embargo, cuando se alcanza dicho régimen, el valor de potencia en el ensayo sin tapa es constante durante todo el resto del ensayo.

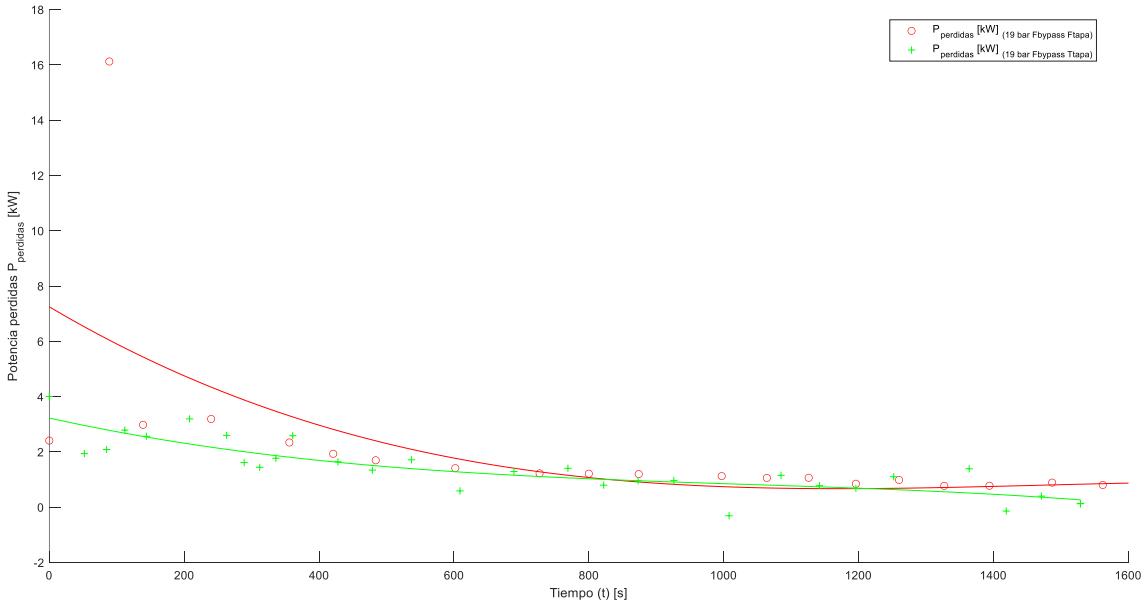


Figura 53. Gráfica comparativa de potencia de pérdidas en función del tiempo, a 19 [bar] de presión de trabajo, con y sin tapa de entrada de aire y sin recirculación del líquido refrigerante.

- Se alcanza un valor de potencia de pérdidas medio de  $P_{perd} = 0.8 \text{ [kW]}$  en ambos casos.
- En el caso del ensayo con tapa, los puntos de potencia oscilan durante todo el ensayo mientras que, en el caso del ensayo sin tapa, se alcanza un valor estabilizado.

A continuación, se muestra la tabla con los resultados obtenidos en la comparación de los ensayos a 19 [bar], con y sin tapa:

<b>Tapa</b>	$\dot{m}_{aire} \left[ \frac{g}{s} \right]$	$P_{trab} [\text{bar}]$	$P_{ele} [\text{kW}]$	$P_{ref} [\text{kW}]$	$P_{aire} [\text{kW}]$	$\eta_{frio} [\%]$	$\eta_{calor} [\%]$	$\eta_{total} [\%]$
<b>SÍ</b>	2.29	19	18.34	16.45	0.947	5.15	91.8	96.94
<b>NO</b>	2.11	19	18.62	16.85	0.895	4.8	91.79	96.59

Tabla 1. Resultados de las variables de interés analítico. Se han calculado a partir de su estado estacionario y no desde el principio del ensayo.

### 3.2.1.2. Comparativa de ensayos con y sin tapa a 18 [bar] de presión de trabajo

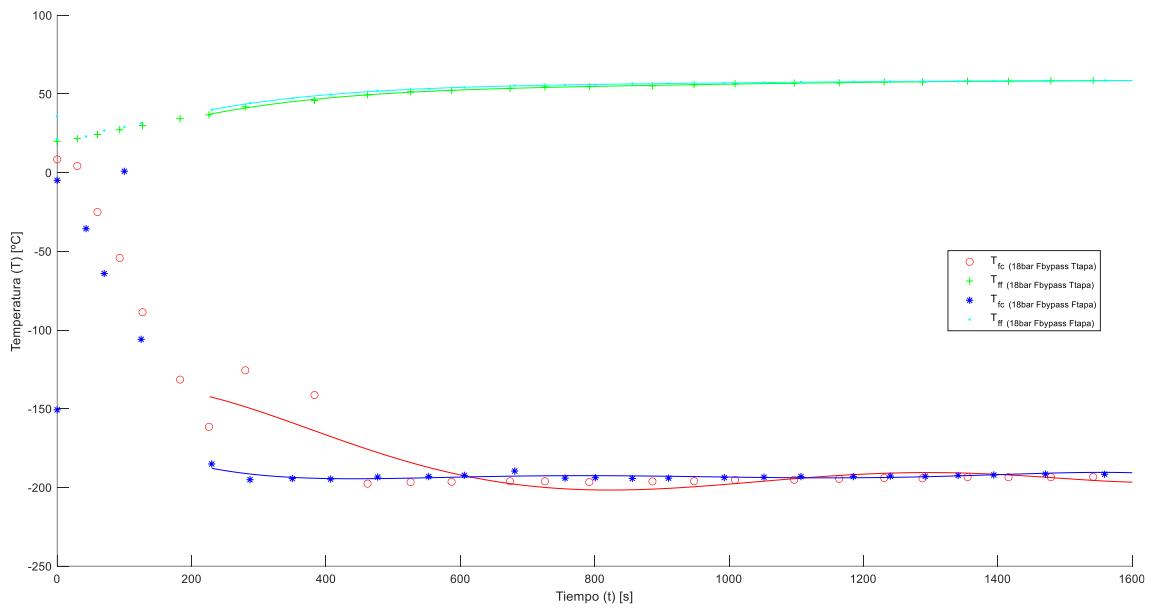


Figura 54. Gráfica comparativa de  $T_{ff}$  y  $T_{fc}$  en función del tiempo, a 18 [bar] de presión de trabajo, con y sin tapa de entrada de aire y sin recirculación del líquido refrigerante.

- De nuevo se observa en la nube de puntos del foco frío al principio del ensayo con tapa de entrada de aire que se produce un aumento brusco de la temperatura. A continuación, la temperatura del foco frío en dicho ensayo oscila entre  $-196.6$  y  $-193.4^{\circ}\text{C}$ .
- En el caso del ensayo sin tapa de entrada de aire, no se produce dicho comportamiento anómalo al principio del ensayo y, además, el valor se estabiliza en  $-192^{\circ}\text{C}$  aproximadamente y permanece oscilando entre  $-190$  y  $-194^{\circ}\text{C}$ .

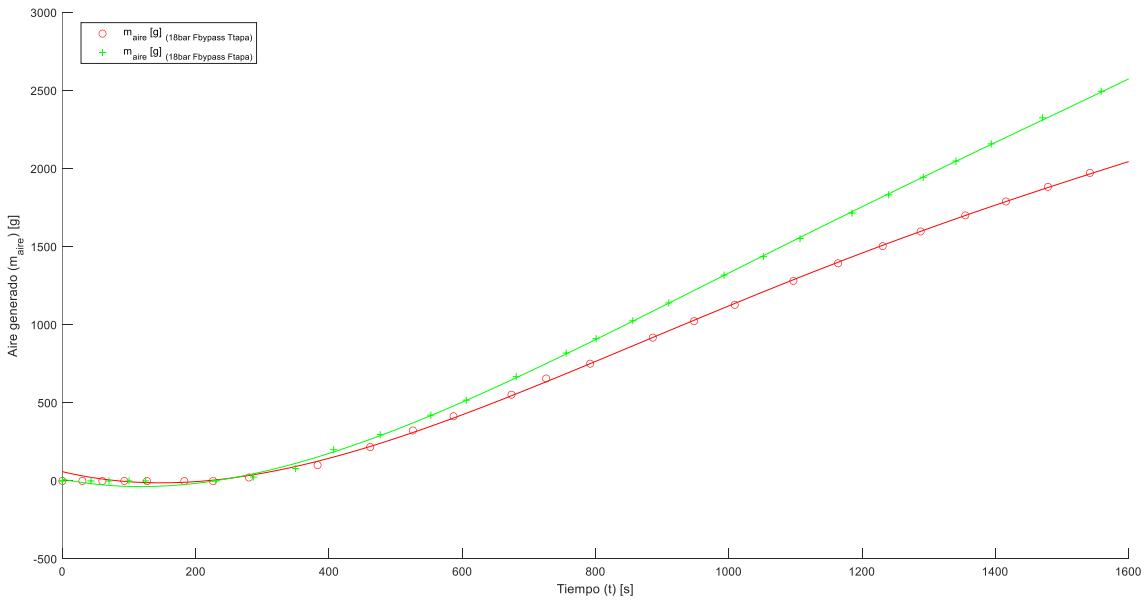


Figura 55. Gráfica comparativa de producción de aire líquido en función del tiempo, a 18 [bar] de presión de trabajo, con y sin tapa de entrada de aire y sin recirculación del líquido refrigerante.

- En este caso, se observa que la pendiente del aire producido en el ensayo con tapa es claramente inferior a la del ensayo sin tapa.
- En ambos casos se empieza a producir a partir de los 200 segundos de ensayo.

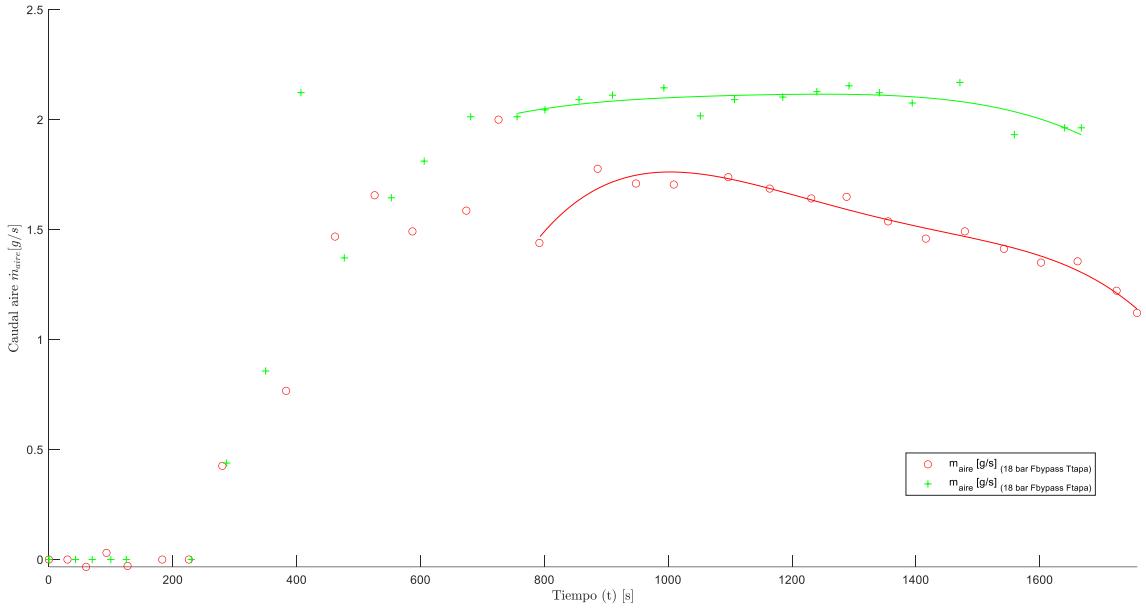


Figura 56. Gráfica comparativa de caudal de aire líquido generado en función del tiempo, a 18 [bar] de presión de trabajo, con y sin tapa de entrada de aire y sin recirculación del líquido refrigerante.

- En el ensayo realizado con tapa, el caudal de producción de aire líquido es notablemente inferior al realizado con tapa, teniendo un valor promedio en el régimen estacionario del motor de  $\dot{m}_{aire} = 1.37 \left[ \frac{g}{s} \right]$ . Además, este valor disminuye con el tiempo durante el resto del ensayo, llegando a alcanzar un valor mínimo de  $\dot{m}_{aire} = 1.4 \left[ \frac{g}{s} \right]$  en el último punto calculado del ensayo y un valor máximo de  $\dot{m}_{aire} = 2 \left[ \frac{g}{s} \right]$ .
- En el ensayo realizado sin tapa de aire, se alcanza un valor estabilizado de  $\dot{m}_{aire} = 2.06 \left[ \frac{g}{s} \right]$ .

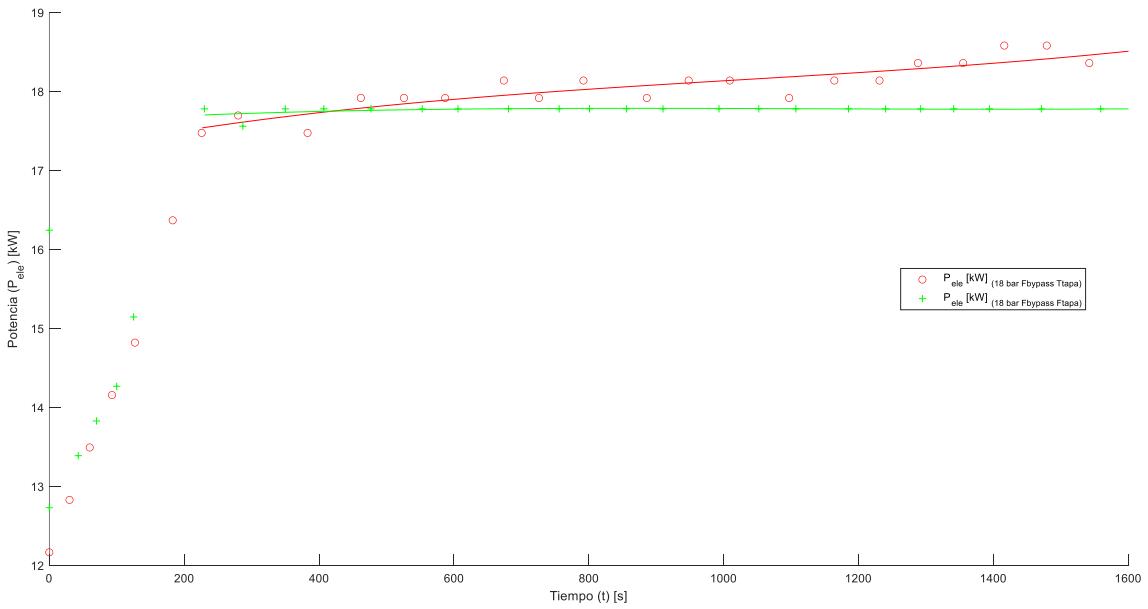


Figura 57. Gráfica comparativa de potencia eléctrica consumida en función del tiempo, a 18 [bar] de presión de trabajo, con y sin tapa de entrada de aire y sin recirculación del líquido refrigerante.

- La potencia eléctrica consumida en el ensayo realizado con tapa de entrada de aire es superior a la del ensayo sin tapa. Esta diferencia se hace cada vez más grande conforme transcurre el ensayo, siendo la diferencia máxima de **0.8 [kW]**.
- En el ensayo realizado con tapa, la potencia eléctrica no llega a estabilizarse y aumenta linealmente con el tiempo, llegando a aumentar desde  $P_{ele} = 17.48$  [kW] a los 400 segundos de ensayo aproximadamente a los  $P_{ele} = 18.58$  [kW].
- En el ensayo sin tapa, se estabiliza a los 200 segundos de ensayo y mantiene un valor de  $P_{ele} = 17.77$  [kW], prácticamente constante durante todo el ensayo.

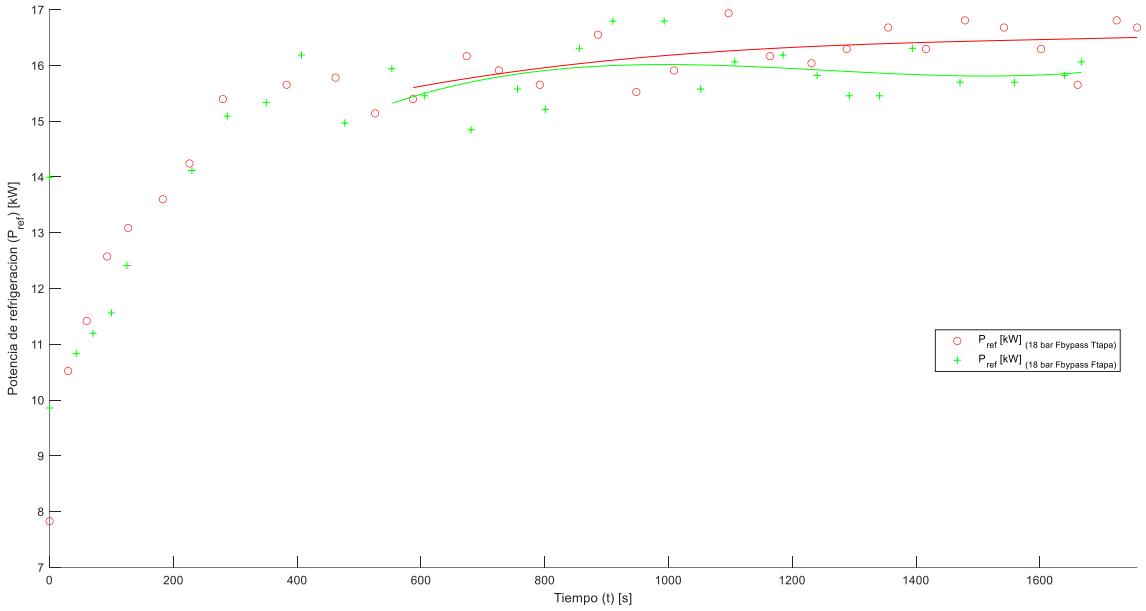


Figura 58. Gráfica comparativa de potencia de refrigeración en función del tiempo, a 18 [bar] de presión de trabajo, con y sin tapa de entrada de aire y sin recirculación del líquido refrigerante.

- La potencia que se invierte en refrigeración en el ensayo realizado con tapa de entrada de aire alcanza un valor medio en régimen estacionario de  $P_{ref} = 16.11 \text{ [kW]}$ .
- La potencia media que se invierte en refrigeración en el ensayo sin tapa es de  $P_{ref} = 15.77 \text{ [kW]}$ .
- En ambos casos, en régimen estacionario se tienen puntos de potencia oscilantes durante todo el ensayo.

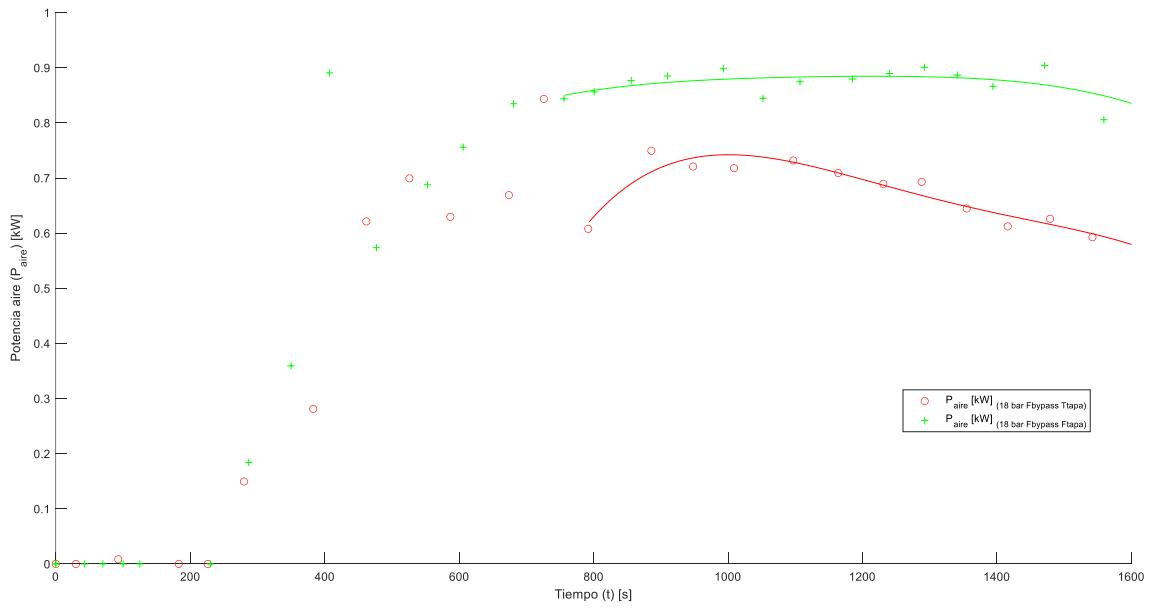


Figura 59. Gráfica comparativa de potencia extraída al aire en función del tiempo, a 18 [bar] de presión de trabajo, con y sin tapa de entrada de aire y sin recirculación del líquido refrigerante.

- Siguiendo el mismo comportamiento que la gráfica del caudal de aire líquido, en el ensayo con tapa de aire se produce un descenso lineal de la potencia extraída al aire con el tiempo, llegando a alcanzar una potencia máxima de  $P_{aire} = 0.749 \text{ [kW]}$  y una potencia mínima, en el último punto del ensayo, de  $P_{aire} = 0.581 \text{ [kW]}$ .
- El valor de potencia extraída al aire en el caso del ensayo sin tapa es notablemente superior, alcanzando un valor en régimen estacionario de  $P_{aire} = 0.861 \text{ [kW]}$ .
- Dado que en el ensayo sin tapa el valor de potencia se hace constante y en el caso del ensayo sin tapa es decreciente con el tiempo, cuando más tiempo pasa, mayor es la cantidad de potencia que se invierte en refrigerar el motor. En el ensayo realizado, la diferencia máxima ha sido de  $0.257 \text{ [kW]}$  al final de este.

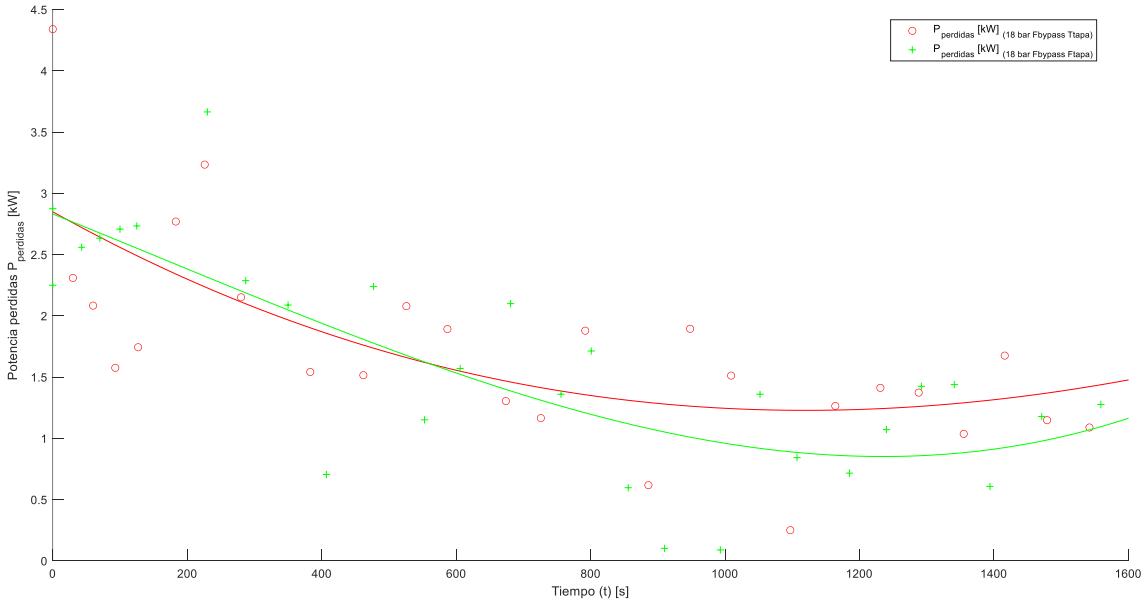


Figura 60. Gráfica comparativa de potencia de pérdidas en función del tiempo, a 18 [bar] de presión de trabajo, con y sin tapa de entrada de aire y sin recirculación del líquido refrigerante.

- En este caso se obtiene un comportamiento similar para los dos ensayos. Las pérdidas del ensayo realizado con tapa son ligeramente superiores a las del ensayo realizado sin tapa. La diferencia máxima es, aproximadamente,  $P_{perd} = 0.4 \text{ [kW]}$ .

A continuación, se muestra la tabla con los resultados obtenidos en la comparación de los ensayos a 18 [bar], con y sin tapa:

<b>Tapa</b>	$\dot{m}_{aire} \left[ \frac{g}{s} \right]$	$P_{trab} [\text{bar}]$	$P_{ele} [\text{kW}]$	$P_{ref} [\text{kW}]$	$P_{aire} [\text{kW}]$	$\eta_{frio} [\%]$	$\eta_{calor} [\%]$	$\eta_{total} [\%]$
<b>SI</b>	1.37	18	18.18	16.11	0.574	3.10	88.99	92.09
<b>NO</b>	2.06	18	17.77	15.77	0.861	4.84	88.80	93.64

Tabla 2. Resultados de las variables de interés analítico. Se han calculado a partir de su estado estacionario y no desde el principio del ensayo.

### 3.2.1.3. Resultados y conclusiones de la influencia de la tapa de entrada de aire

Habiendo analizado los resultados obtenidos en los 4 ensayos realizados y habiendo comparado el comportamiento del motor bajo las diferentes condiciones de trabajo a las que se somete, se pueden realizar las siguientes afirmaciones:

- La presencia de la tapa de aire provoca un comportamiento anómalo en la temperatura del foco frío al principio del ensayo, aumentando drásticamente su valor para después disminuir de nuevo. Además, en presencia de la tapa, el valor de temperatura del foco frío oscila durante todo el ensayo entre los  $-196.6$  y  $-193.4^{\circ}\text{C}$  en el ensayo a  $18$  [bar] y  $-181.1$  y  $-194.7^{\circ}\text{C}$  en el ensayo a  $19$  [bar]. En ausencia de la tapa, los valores de temperatura del foco frío permanecen constantes una vez alcanzado el régimen estacionario, alcanzando unos valores de  $T_{ff} = -192^{\circ}\text{C}$  en el ensayo a  $18$  [bar] y  $T_{ff} = 195^{\circ}\text{C}$  en el ensayo a  $19$  [bar].
- La presencia de la tapa de aire no influye en la temperatura del foco caliente.
- El caudal de producción de aire es superior cuando no se hace uso de la tapa de entrada de aire. Además, en los ensayos con tapa de entrada de aire, se observa una disminución del caudal de aire líquido durante el transcurso del ensayo, mientras que en ausencia de la tapa el caudal se estabiliza y alcanza un valor aproximadamente constante,  $\dot{m}_{aire} = 2.06 \left[\frac{g}{s}\right]$  en el ensayo a  $18$  [bar] y  $\dot{m}_{aire} = 2.11 \left[\frac{g}{s}\right]$  en el ensayo a  $19$  [bar].
- El consumo de potencia eléctrica es mayor en presencia de la tapa de entrada de aire. Además, dicho consumo aumenta linealmente durante el transcurso del ensayo. En ausencia de la tapa, el consumo permanece constante una vez alcanzado el régimen estacionario, alcanzando unos valores de  $P_{ele} = 17.77$  [kW] en el ensayo a  $18$  [bar] y  $P_{ele} = 18.4$  [kW] en el ensayo a  $19$  [bar].
- La potencia invertida en refrigeración aumenta en presencia de la tapa de entrada de aire, aunque en este caso alcanza un valor estabilizado de  $P_{ref} = 16.11$  [kW] en el ensayo a  $18$  [bar] y un valor de  $P_{ref} = 16.45$  [kW] en el ensayo a  $19$  [bar]. En el caso de no tener tapa de aire, se alcanzan unos valores de  $P_{ref} = 15.77$  [kW] en el ensayo

a 18 [bar] y  $P_{ref} = 18.62$  [kW] en el ensayo a 19 [bar]. En todos los casos, los puntos de potencia son oscilantes durante todo el ensayo.

- La potencia extraída al aire es menor en presencia de la tapa de entrada de aire. Además, su valor disminuye durante el transcurso del ensayo. Como el valor de potencia permanece constante en régimen estacionario en ausencia de la tapa de entrada de aire, conforme pasa el tiempo cada vez la diferencia se acentúa.
- No se observan grandes diferencias en la potencia de pérdidas originadas por la ausencia de la tapa de aire, por lo que se deduce que esta no influye en la potencia de pérdidas.

En vista de los anteriores resultados, se pueden deducir que el uso de la tapa de entrada de aire perjudica notablemente el correcto funcionamiento del motor ya que, en general, aumenta la potencia que se consume. Además, dado que la presencia de la tapa aumenta la potencia de refrigeración y disminuye la potencia de calor extraída al aire, se deduce que disminuirá el rendimiento total de la máquina. Esto se puede observar en las siguientes figuras:

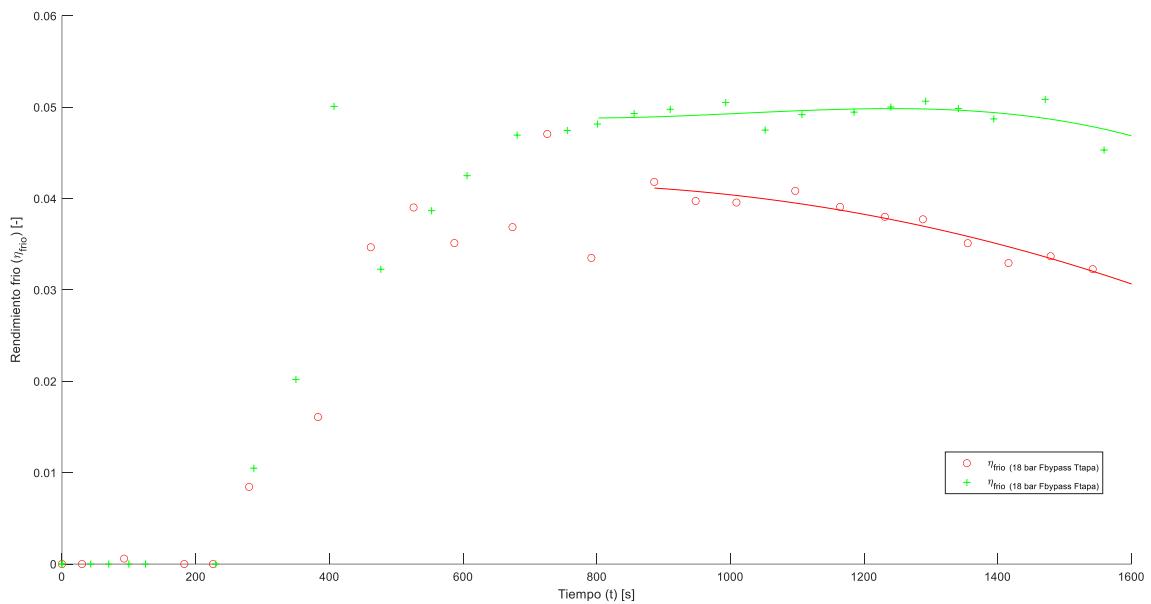


Figura 61. Gráfica comparativa de rendimiento frío a 18 [bar] de presión de trabajo.

Como se puede ver, el rendimiento frío disminuye en presencia de la tapa durante el transcurso del ensayo. Esto es debido a que, como se ha visto, la potencia eléctrica aumenta con el tiempo y el valor de potencia extraída al aire disminuye con el tiempo.

Se alcanza un valor de rendimiento frío en ausencia de la tapa de  $\eta_{frio} = 4.84\%$  mientras que el último valor registrado en presencia de la tapa es de  $\eta_{frio} = 3.1\%$ .

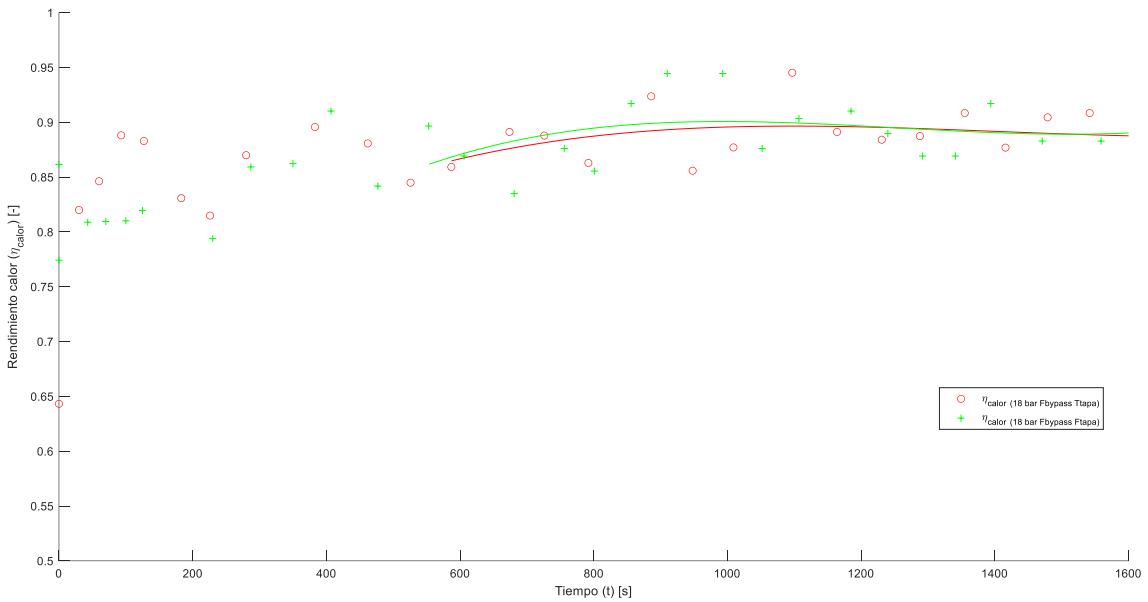


Figura 62 Gráfica comparativa de rendimiento calorífico a 18 [bar] de presión de trabajo.

El rendimiento calorífico es similar en ambos ensayos ya que, como se ha visto, aumenta la potencia eléctrica con el tiempo, pero también aumenta la potencia de refrigeración. En ambos casos, el rendimiento calorífico es aproximadamente  $\eta_{calor} = 88.9\%$ .

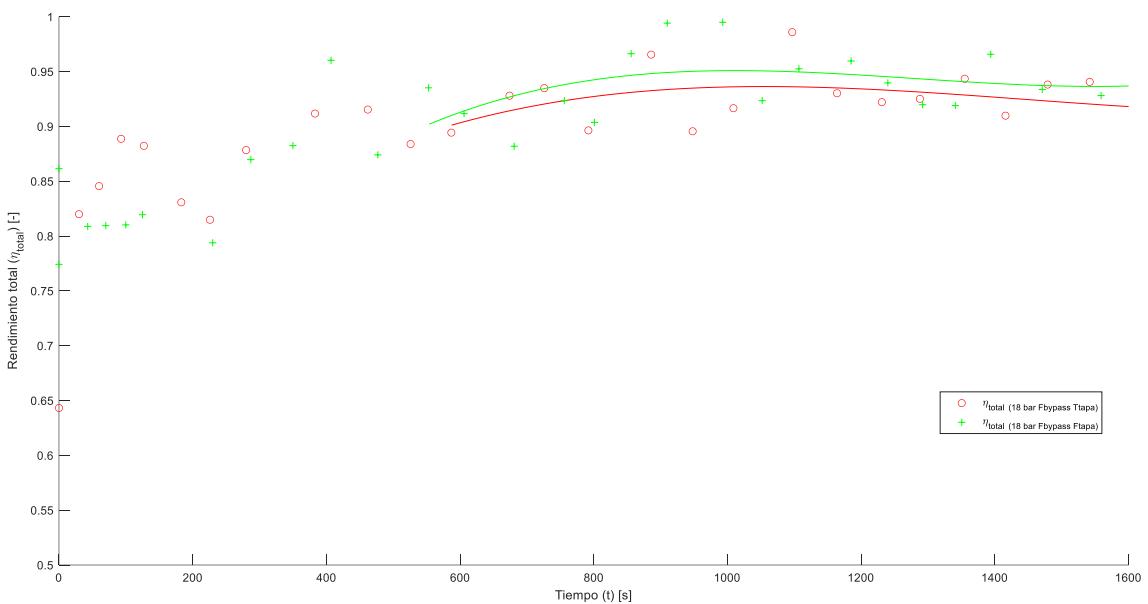


Figura 63. Gráfica comparativa de rendimiento total a 18 [bar] de presión de trabajo.

Como el rendimiento calorífico permanece aproximadamente constante y el rendimiento frío disminuye con el tiempo, se puede observar que el rendimiento total medio en presencia de la tapa de aire es de 92.1% mientras que en ausencia de esta es de 93.6%. Por lo tanto, el rendimiento total disminuye en presencia de la tapa de entrada de aire.

Debido a esto, no se vuelven a realizar más ensayos con la tapa de aire puesta ya que se deduce que su finalidad es proteger el interior del licuador cuando la máquina no se encuentra arrancada. Además, a pesar de que la malla se congela al inicio del ensayo, la ausencia de la tapa permite que aumente el caudal de aire que genera el aparato.

### 3.2.2. Resultados y análisis de la influencia de la variación de presión de trabajo en el motor y resultados

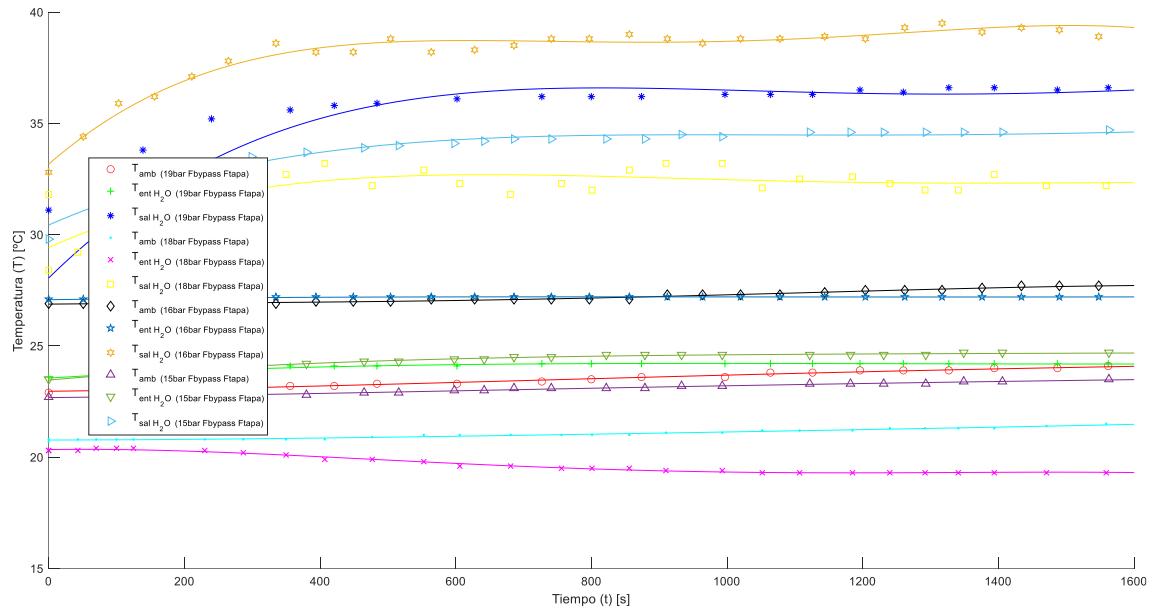


Figura 64. Gráfica comparativa de  $T_{amb}$ ,  $T_{ent\_agua}$  y  $T_{sal\_agua}$  en función del tiempo a diferentes presiones de ensayo.

- El objetivo de incluir la anterior gráfica en el presente apartado es evidenciar que la temperatura de entrada del agua en los ensayos es distinta. Hay que tener en cuenta este hecho a la hora de analizar la influencia de la presión en los resultados, ya que la temperatura de entrada del líquido refrigerante influirá también en alguna de las variables.

$P_{trab}$	$T_{ent\_agua}$ [°C]
<b>19</b>	24.2
<b>18</b>	19.3
<b>16</b>	27.2
<b>15</b>	24.6

Tabla 3. Temperaturas de entrada de líquido refrigerante para los diferentes ensayos realizados.

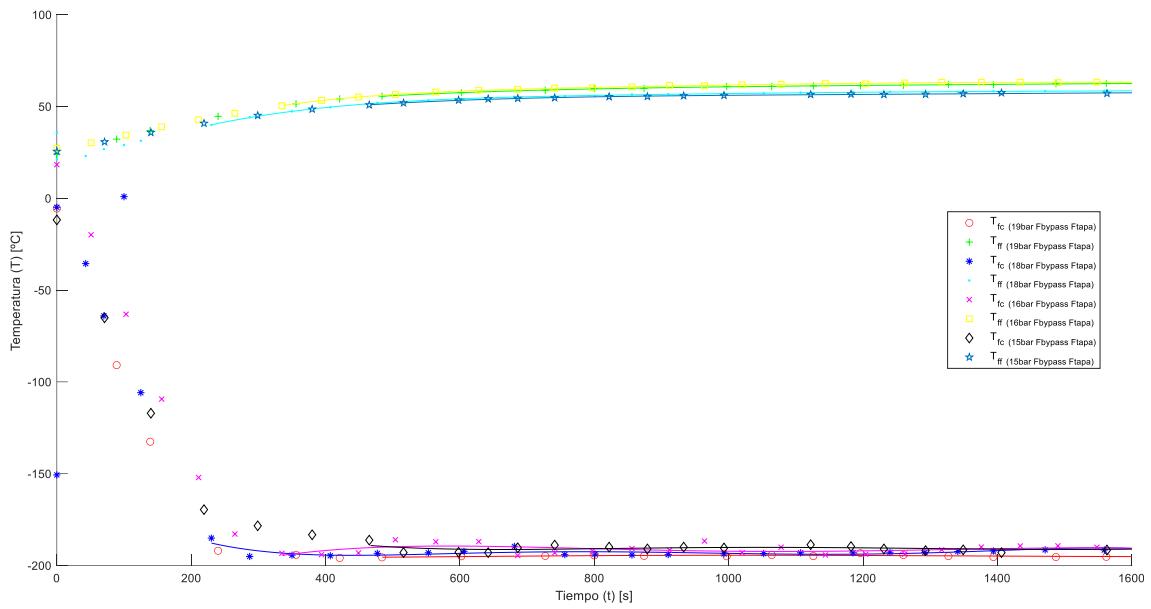


Figura 65. Gráfica comparativa de  $T_{ff}$  y  $T_{fc}$  en función del tiempo a diferentes presiones de ensayo.

- No se observan diferencias significativas en el comportamiento de las temperaturas del foco caliente y foco frío para diferentes valores de presión de ensayo.

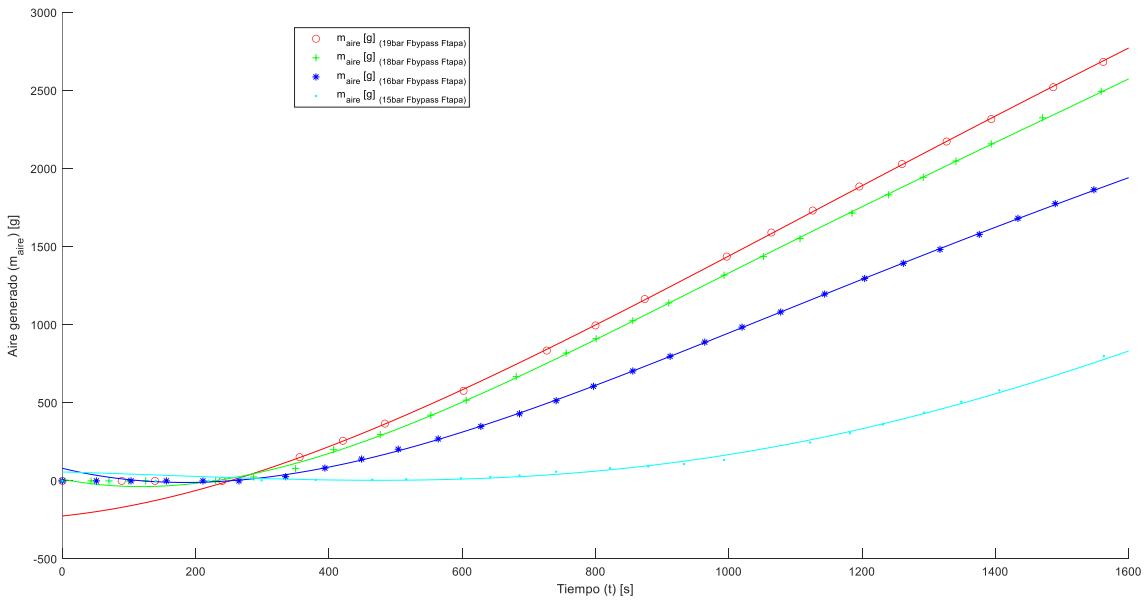


Figura 66. Gráfica comparativa de cantidad de aire líquido producido en función del tiempo a diferentes presiones de trabajo.

- En este caso, se observa que en los 4 casos se empieza a producir aire líquido aproximadamente a los 4 minutos de ensayo.
- Cuanto mayor es la presión de ensayo, antes se comienza a producir aire líquido. Sin embargo, la diferencia es de tan solo algunos segundos.
- Se observa una diferencia clara en las pendientes de aire total producido en función del tiempo, siendo el ensayo a 15 [bar] el ensayo en el que menor cantidad de aire se produce por unidad de tiempo y siendo el ensayo a 19 [bar] el que más.

<b>P<sub>trab</sub></b>	<b>m<sub>aire</sub> [kg]</b>
<b>19</b>	2.77
<b>18</b>	2.59
<b>16</b>	1.96
<b>15</b>	0.83

Tabla 4. Cantidad de aire líquido producido a los 1600 segundos de ensayo en cada ensayo.

- En el ensayo a **19 [bar]**, se producen 3.3 veces más de aire líquido que en el ensayo a **15 [bar]**. Una diferencia más que significativa y que deberá tenerse en cuenta según el uso al que este destinado dicho motor.

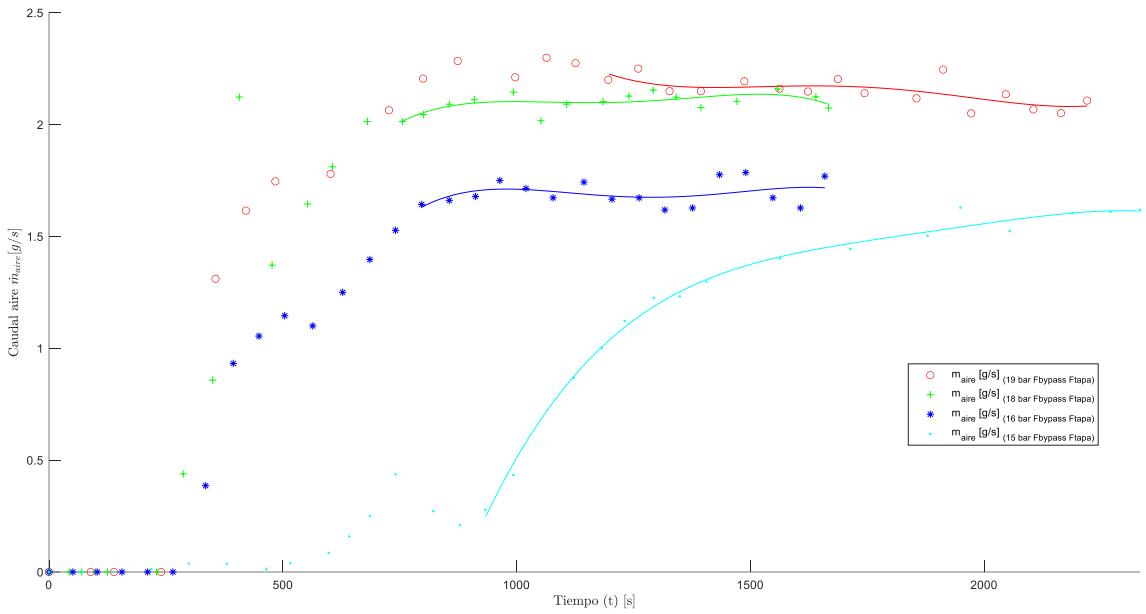


Figura 67. Gráfica comparativa de caudal de aire líquido generado en función del tiempo y a diferentes presiones de trabajo.

- Se observa como conforme se aumenta la presión de trabajo del motor, aumenta el caudal de aire líquido generado.

$P_{trab}$	$\dot{m}_{aire}$ [ $\frac{g}{s}$ ]
19	2.17
18	2.12
16	1.72
15	1.43

Tabla 5. Tabla de caudal de aire líquido que se genera a los 1600 segundos de ensayo.

- El caudal de aire líquido generado a 19 [bar] es, aproximadamente, 1.5 veces mayor al generado a 15 [bar]. Esto quiere decir que, por ejemplo, tras una hora de funcionamiento, en el caso de 19 [bar] se generarían 7.81 [kg] de aire líquido frente a los 5.15 [kg] que se generarían a 15 [bar].

- Es interesante destacar que en el ensayo a **19 [bar]** se observa un ligero decrecimiento del caudal a partir de los 1600 segundos de ensayo aproximadamente. Tras la caída, se estabiliza el valor en  $m_{aire} = 2.09 \left[ \frac{g}{s} \right]$ .

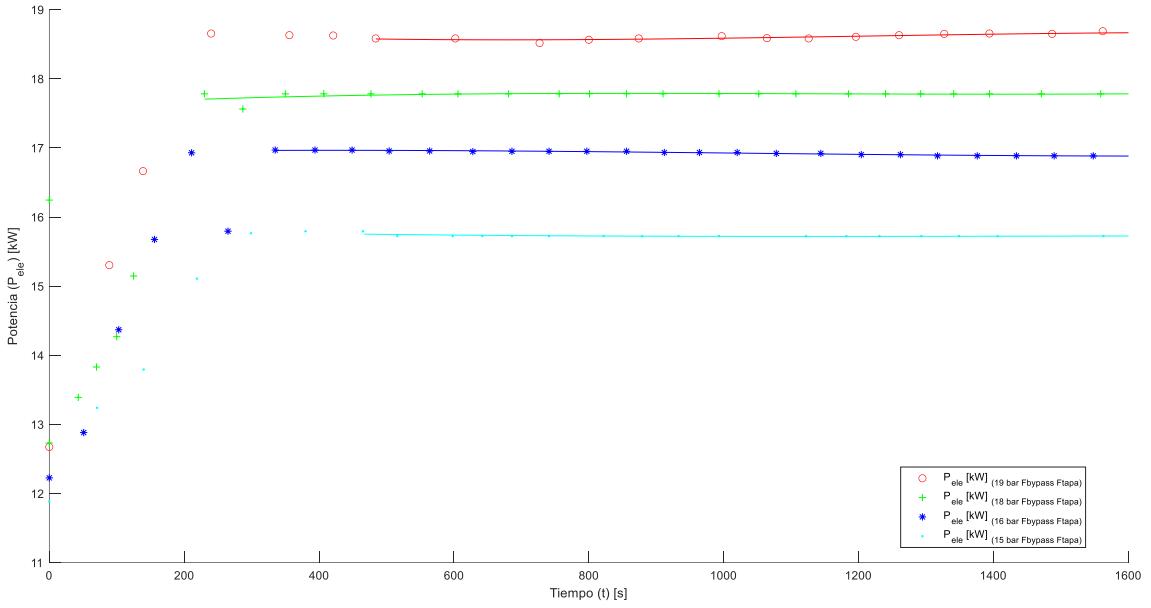


Figura 68. Gráfica comparativa de potencia eléctrica consumida en función del tiempo y a diferentes presiones de trabajo.

- Se observa como conforme aumenta la  $P_{trab}$  del motor aumenta el consumo eléctrico y esto es porque se necesita aplicar más potencia para aumentar la presión a la que se comprime el helio.
- En todos los casos la presión se estabiliza y los valores se pueden ver en la siguiente tabla:

<b><math>P_{trab}</math></b>	<b><math>P_{ele}</math> [kW]</b>
<b>19</b>	18.67
<b>18</b>	17.78
<b>16</b>	16.88
<b>15</b>	15.73

Tabla 6. Valores de potencia eléctrica a los 1600 segundos de ensayo.

- Para hacer funcionar la máquina Stirling a 19 [bar] se necesita 1.19 veces la potencia para que funcione a 15 [bar]. Es decir, tras una hora de funcionamiento, el motor

Stirling, trabajando a **19 [bar]**, habrá consumido **67 [MW]**, mientras que trabajando a **15 [bar]**, habrá consumido **56.6 [MW]**.

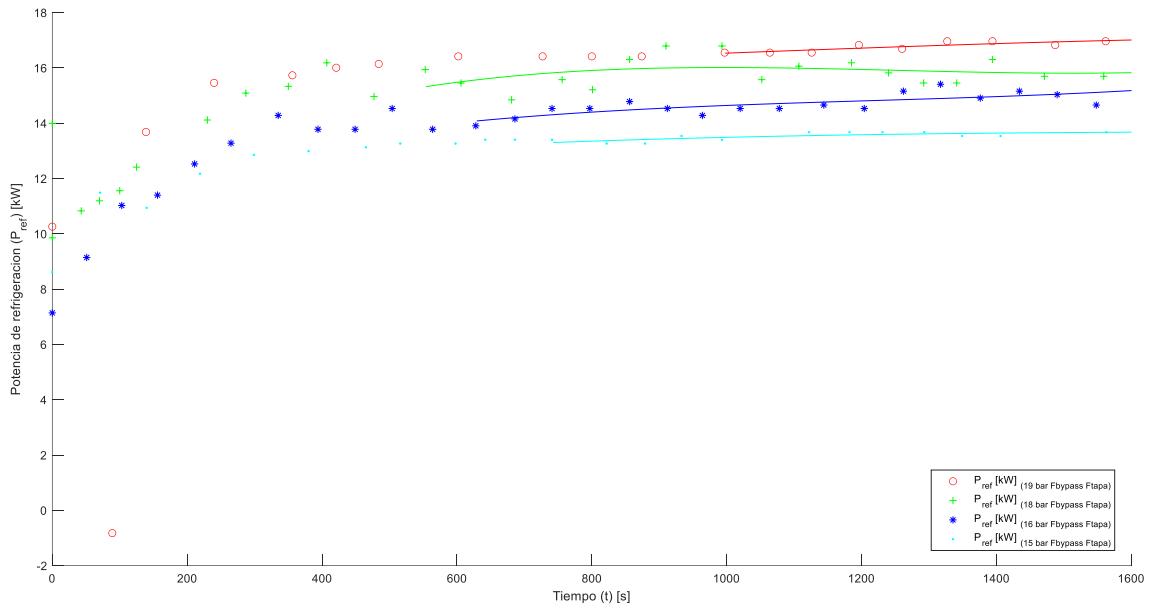


Figura 69. Gráfica comparativa de potencia de refrigeración en función del tiempo, sin tapa de entrada de aire, sin recirculación del líquido refrigerante y a diferentes presiones de trabajo.

- En este caso, la potencia que se invierte en refrigerar el foco caliente aumenta conforme aumenta la presión de trabajo. Es importante destacar que a pesar de que, en el ensayo a 18 [bar], la temperatura de entrada de agua es de 19.3°C, y en el ensayo a 16 [bar], la temperatura de entrada de agua es de 27.2°C, es decir, casi 8°C superior, se sigue invirtiendo mayor potencia en refrigerar el motor cuanto mayor es la presión del ensayo. Esto es debido a que, dado el aumento de presión, el foco caliente tiende a aumentar su temperatura, por lo que se necesita invertir mayor potencia para mantener la temperatura en un régimen estable.
- Tal como se puede observar, en el ensayo a 18 [bar], a partir de los 1000 segundos de ensayo aproximadamente, disminuye la potencia invertida en refrigeración. Esto es principalmente debido a que desde el inicio del ensayo la temperatura de entrada del agua disminuye desde los 21°C hasta los 19.3°C y es el ensayo en el que se produce la mayor variación de temperatura de entrada del agua.
- También se observa un aumento significativo de la potencia de refrigeración en el ensayo a 16 [bar]. Se debe mencionar que es el ensayo en el que la temperatura de entrada de agua es mayor.
- En la siguiente tabla se pueden observar los valores de potencia de refrigeración obtenidos en régimen estacionario:

$P_{trab}$	$P_{ref} [kW]$
<b>19</b>	16.85
<b>18</b>	15.77
<b>16</b>	14.60
<b>15</b>	13.55

Tabla 7 Valores de potencia de refrigeración a los 1600 segundos de ensayo.

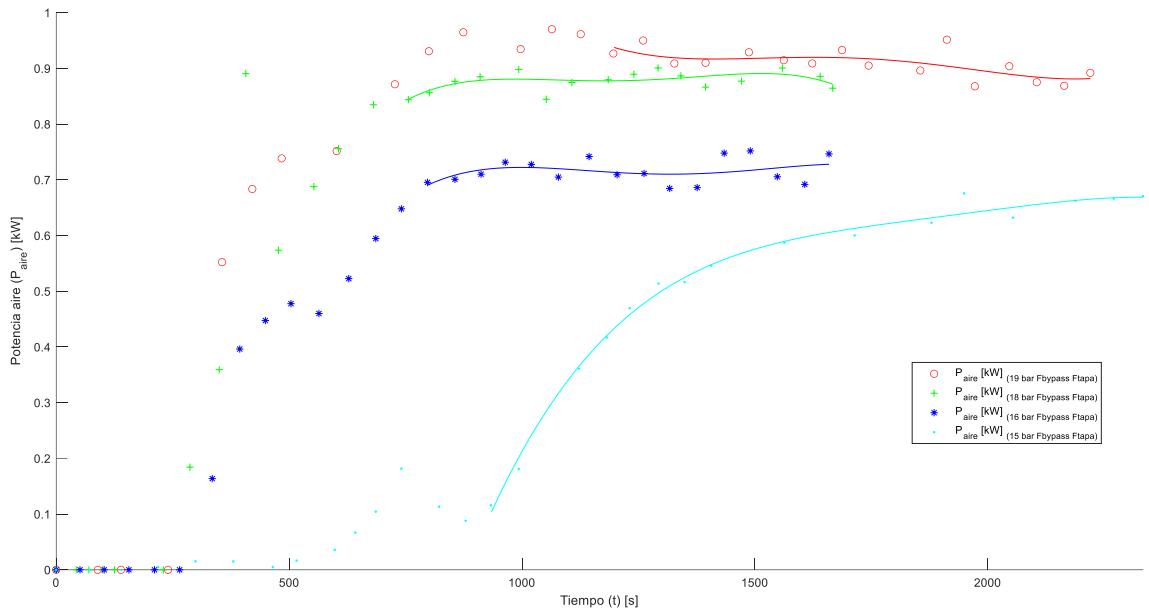


Figura 70. Gráfica comparativa de potencia extraída al aire en función del tiempo, sin tapa de entrada de aire, sin recirculación del líquido refrigerante y a diferentes presiones de trabajo.

- Dado que la potencia de extracción de calor al aire se calcula a partir del caudal de aire generado y la potencia eléctrica (que es constante en casi todo el ensayo), el comportamiento de las funciones es muy similar al del caudal de aire líquido generado.
- Se observa como conforme aumenta la presión de trabajo del motor, aumenta la potencia extraída al aire. Los resultados estabilizados se pueden observar en la siguiente tabla:

$P_{trab}$	$P_{aire}$ [kW]	$T_{entagua}$ [°C]	$T_{ff}$ [°C]	$T_{fc}$ [°C]	$\Delta T_f$ [°C]
19	0.895	24.1	-194.94	60.83	255.77
18	0.884	19.7	-187.7	53.17	240.87
16	0.716	27.2	-189.38	59.13	248.51
15	0.64	34.42	-188.93	55.13	244.06

Tabla 8 Valores de potencia extraída al aire y temperaturas en el régimen estacionario.

- Si se comparan los ensayos a 19 [bar] ya 16 [bar] se puede observar que para una diferencia de potencia de extracción de calor al aire entre ambas de 0.179 [kW] y una

diferencia de temperatura de entrada de agua de  $3.1^{\circ}\text{C}$  se obtiene un salto de temperaturas entre los focos de  $255.77^{\circ}\text{C}$  y  $248.51^{\circ}\text{C}$  respectivamente. Con esto se puede deducir que un aumento de la presión de trabajo del motor no influye significativamente en la diferencia de temperaturas de los focos, ya que, aunque sí disminuye el porcentaje de potencia que se dedica a extraer el calor al aire, no disminuye en la misma medida la diferencia de temperaturas entre los focos. La diferencia de temperatura del aire líquido generado entre ambos ensayos es de solo  $5^{\circ}\text{C}$ .

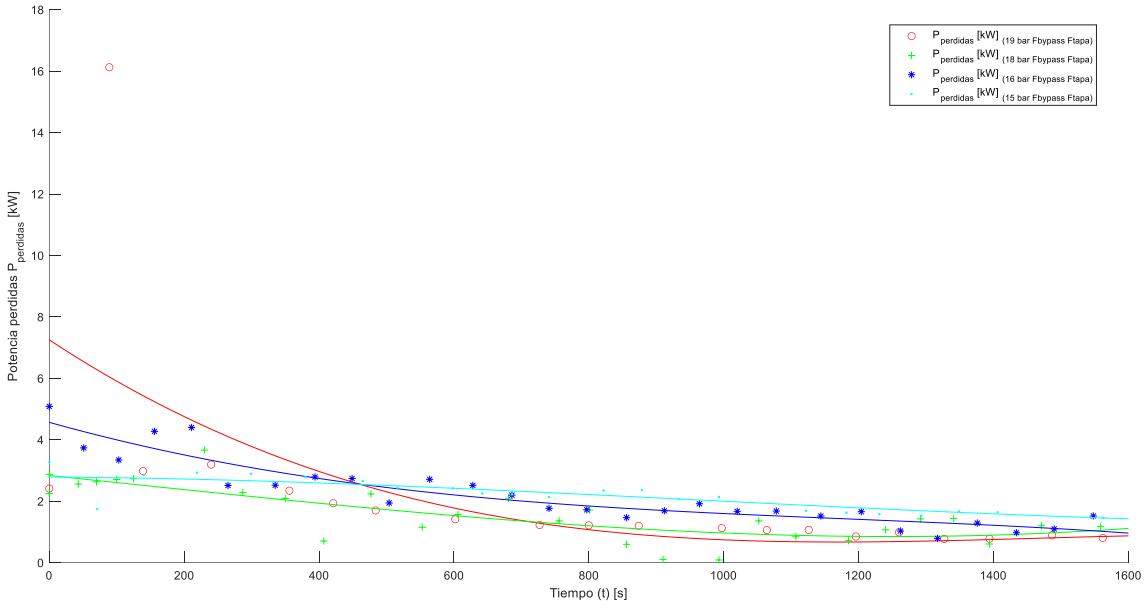


Figura 71. Gráfica comparativa de potencia de pérdidas en función del tiempo, sin tapa de entrada de aire, sin recirculación del líquido refrigerante y a diferentes presiones de trabajo.

- Se observa como todos los ensayos tienden al mismo comportamiento y a un valor similar de pérdidas de potencia: al inicio del ensayo la potencia que se pierde es ligeramente mayor que en el régimen estacionario.
- El valor de potencia de pérdidas oscila entre 1.56 [kW] y 0.78 [kW], siendo menor cuanto mayor es la presión de trabajo, un hecho sorprendente teniendo en cuenta que se esperaba que al aumentar la presión disminuyera la estanqueidad del motor, provocando un aumento de pérdidas de potencia. Sin embargo, el porcentaje de pérdidas es tan pequeño en comparación a la potencia consumida que no se considera relevante realizar un análisis pormenorizado de ello.

$P_{trab}[\text{bar}]$	$\dot{m}_{aire} \left[ \frac{\text{g}}{\text{s}} \right]$	$P_{ele}[\text{kW}]$	$P_{ref}[\text{kW}]$	$P_{aire}[\text{kW}]$	$\eta_{frio}[\%]$	$\eta_{calor}[\%]$	$\eta_{total}[\%]$
<b>19</b>	2.17	18.67	16.85	0.895	4.80	91.79	96.59
<b>18</b>	2.12	17.78	15.77	0.861	4.84	88.8	93.64
<b>16</b>	1.72	16.88	14.60	0.679	4.02	89.49	93.51
<b>15</b>	1.43	15.73	13.55	0.640	4.07	87.19	91.26

Tabla 9. Resumen de los resultados obtenidos de los ensayos realizados a diferentes presiones.

### 3.2.2.1. Resultados y conclusiones de la influencia de la presión de trabajo en el motor

Tras analizar los resultados y comparar el comportamiento del motor en las distintas condiciones de trabajo, se pueden realizar las siguientes afirmaciones:

- La variación de la presión de trabajo del motor no tiene una influencia significativa en la variación de la temperatura de los focos. El foco caliente tiende a aumentar su temperatura debido al aumento de presión de trabajo, pero también aumenta el porcentaje de potencia que se invierte en refrigerar dicho foco caliente, por lo que al final no se aprecia diferencias importantes en las temperaturas de los focos, pero, como se verá más adelante, sí varían los rendimientos del motor.
- La variación de presión de trabajo del motor no influye en el tiempo que este tarda en alcanzar el régimen estacionario de producción.
- En todos los ensayos se comienza a producir aire líquido aproximadamente a partir de los 4 minutos de ensayo aproximadamente.
- La variación de presión de trabajo sí influye en la cantidad de aire que se produce por unidad de tiempo. En el régimen de estabilización, el caudal de producción es mayor cuanto mayor es la presión de trabajo del motor. Es importante destacar que la variación de caudal generado conforme varía la presión de trabajo no es lineal, ya entre los 19 [bar] y los 18 [bar] se produce un aumento de caudal del 2.3% mientras que entre los 16 [bar] y los 15 [bar] se produce un aumento de caudal del 16.86%. Queda por analizar el ensayo a 17 [bar] para averiguar cuál es la presión óptima para producir mayor caudal gastando la mínima potencia eléctrica posible.
- Se necesita un mayor consumo de potencia eléctrica para mantener el motor en funcionamiento bajo mayores presiones de trabajo. Por cada bar de aumento de presión de trabajo, se consumirá aproximadamente entre un 4.5 y un 7% más de potencia eléctrica.
- A mayor presión de trabajo, mayor es el porcentaje de potencia que se invierte en refrigerar el motor. Esto se debe a que tiende a calentarse el foco caliente, produciendo un mayor aumento de temperatura de salida del agua. Esto influye directamente en el rendimiento calorífico y se puede observar en la siguiente figura:

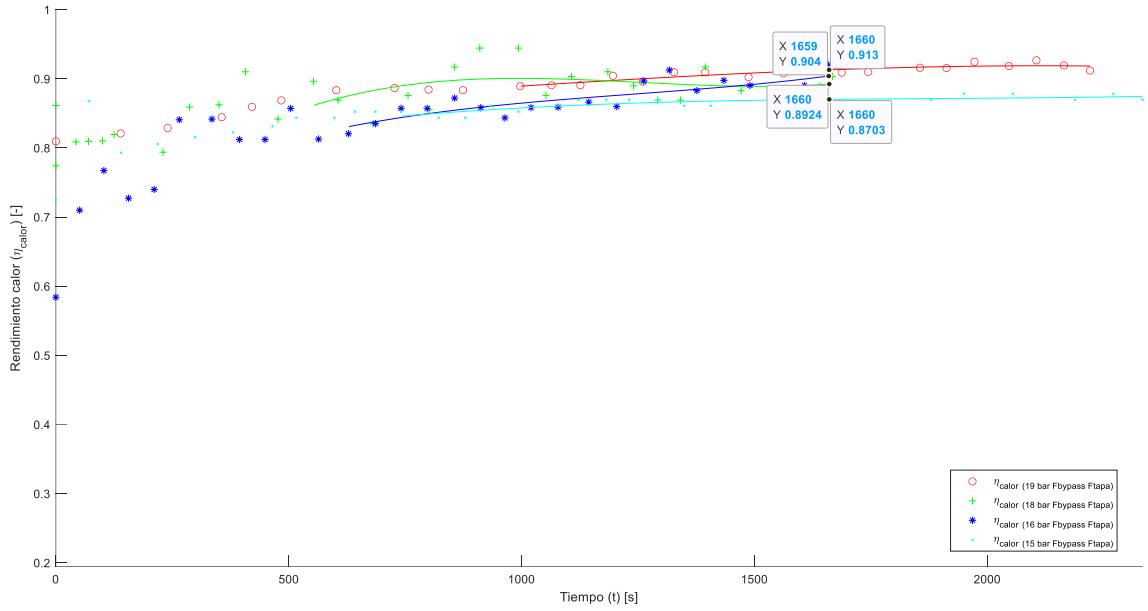


Figura 72. . Gráfica comparativa de rendimiento calorífico en función del tiempo y a diferentes presiones de trabajo.

Tal como se puede observar en la figura anterior, a mayor presión de trabajo, mayor es el rendimiento calorífico, siendo los valores de estabilización los que se pueden observar en la siguiente tabla:

$P_{trab}[\text{bar}]$	$\eta_{calor}[\%]$
19	91.79
18	88.8
16	89.49
15	87.19

Tabla 10. Rendimientos caloríficos a diferentes presiones de trabajo.

- Al aumentar el caudal de aire generado conforme se aumenta la presión de trabajo, también aumenta la potencia de extracción de calor al aire. Esto influye de manera directa en el rendimiento del motor:

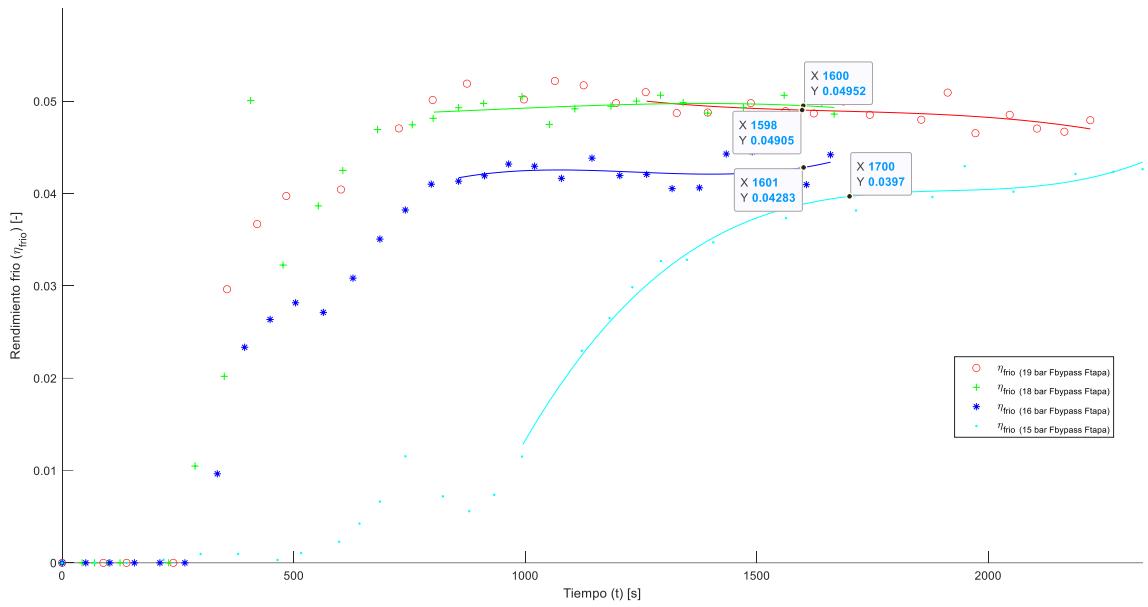


Figura 73. Gráfica comparativa de rendimiento frío en función del tiempo y a diferentes presiones de trabajo.

Se obtienen los siguientes resultados en régimen estacionario:

$P_{trab} [\text{bar}]$	$\eta_{frio} [\%]$
19	4.80
18	4.84
16	4.02
15	4.07

Tabla 11. Rendimientos fríos a diferentes presiones de trabajo

Es interesante destacar que, en vista de los resultados, se obtiene un mayor rendimiento frío en el ensayo a 18 [bar], con una temperatura media de entrada del agua de 19°C, que en el ensayo a 19 [bar], con una temperatura media de entrada del agua de 24.1°C, debido a que al ser menor la temperatura de entrada del agua se invierte menos potencia en refrigeración y más en extraer calor al aire. Además, consume menor potencia eléctrica, por lo que al final se obtiene un mayor rendimiento frío.

- Finalmente, se puede afirmar que, al aumentar la presión del ensayo, aumenta tanto la potencia que se invierte en refrigeración como la que se invierte en extraer calor al aire. Esto influye directamente en el rendimiento total del motor, tal como se puede observar en la siguiente figura:

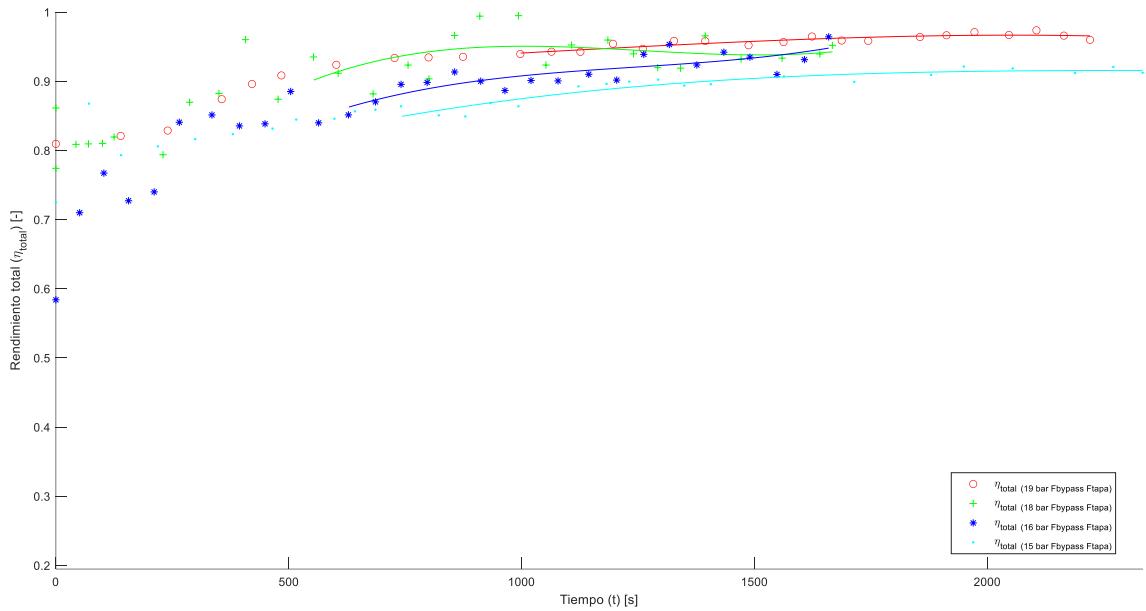


Figura 74 Gráfica comparativa de rendimiento total en función del tiempo y a diferentes presiones de trabajo.

$P_{trab}$ [bar]	$\eta_{total}$ [%]
19	96.59
18	93.64
16	93.51
15	91.26

Tabla 12. Rendimientos fríos a diferentes presiones de trabajo.

Se puede comprobar como efectivamente se obtienen como rendimientos totales las sumas del rendimiento frío y calorífico (teniendo en cuenta el pequeño porcentaje de pérdidas).

Es interesante destacar que se obtienen unos rendimientos muy elevados en comparación al resto de máquinas térmicas, como pueden ser las basadas en el ciclo Otto, donde se obtienen comúnmente rendimientos cercanos al 50%, o los basados en el ciclo Diésel, donde se obtienen rendimientos cercanos a los 63%.

Dado que uno de los principales objetivos del presente proyecto es analizar la influencia del aumento de temperatura del foco caliente en el motor, el resto de los ensayos se realizarán a 15 [bar] para mejorar las condiciones de trabajo del motor, que estará sometido a una menor carga debido a la disminución de presión y además se desperdiciará menos energía eléctrica durante el transcurso del ensayo.

### 3.2.3. Resultados y análisis de la influencia de la temperatura de entrada de agua en el motor

Tras realizar el último ensayo, ensayo 9 a 15 [bar], para analizar la influencia de la presión de trabajo en el motor, se procede a utilizar el circuito de recirculación instalado y descrito en el presente proyecto para analizar la influencia de la temperatura de entrada del líquido refrigerante en el motor.

Antes de realizar el ensayo utilizando la recirculación del líquido refrigerante, se realiza el ensayo número 9 sin tapa, sin recirculación, a 15 [bar] de presión y con  $T_{ent_{agua}} = 24.5^{\circ}\text{C}$  para comparar los resultados obtenidos con el anterior ensayo número 7, sin tapa, sin recirculación, a 15 [bar] de presión y con  $T_{ent_{agua}} = 27.1^{\circ}\text{C}$ . El objetivo fundamental de analizar estos ensayos antes de la recirculación es para realizar un primer análisis de la influencia de la temperatura de entrada del agua aprovechando que se tienen los dos ensayos a igualdad de condiciones, pero con distinta  $T_{ent_{agua}}$ . Asimismo, es importante destacar que para analizar la influencia de esta temperatura haciendo uso de la recirculación, se debe tener el motor en estado estacionario antes de comenzar el ensayo, por lo que el ensayo 9 se realiza con doble objetivo: comparar con el ensayo 7 la influencia de la temperatura de entrada y, además, preparar el motor para analizar mediante la recirculación del líquido refrigerante.

Por último, antes de desarrollar el análisis, se debe destacar que no se hace uso del ensayo número 8 realizado a 15 [bar] de presión de trabajo, sin recirculación, sin tapa y con  $T_{ent_{agua}} = 25.7^{\circ}\text{C}$ , debido a que se observa en las gráficas que el caudal de aire líquido generado no llega a estabilizarse como sí lo hace en el ensayo 7. En el ensayo 9, se asegura la estabilización completa realizando el ensayo en 40 minutos en vez de en 30 como en el caso de los anteriores.

3.2.3.1. Comparativa de ensayos 7 y 9 a 15 [bar] de presión de trabajo con  $T_{ent\_agua} = 27.1^{\circ}\text{C}$  y  $T_{ent\_agua} = 24.5^{\circ}\text{C}$  respectivamente

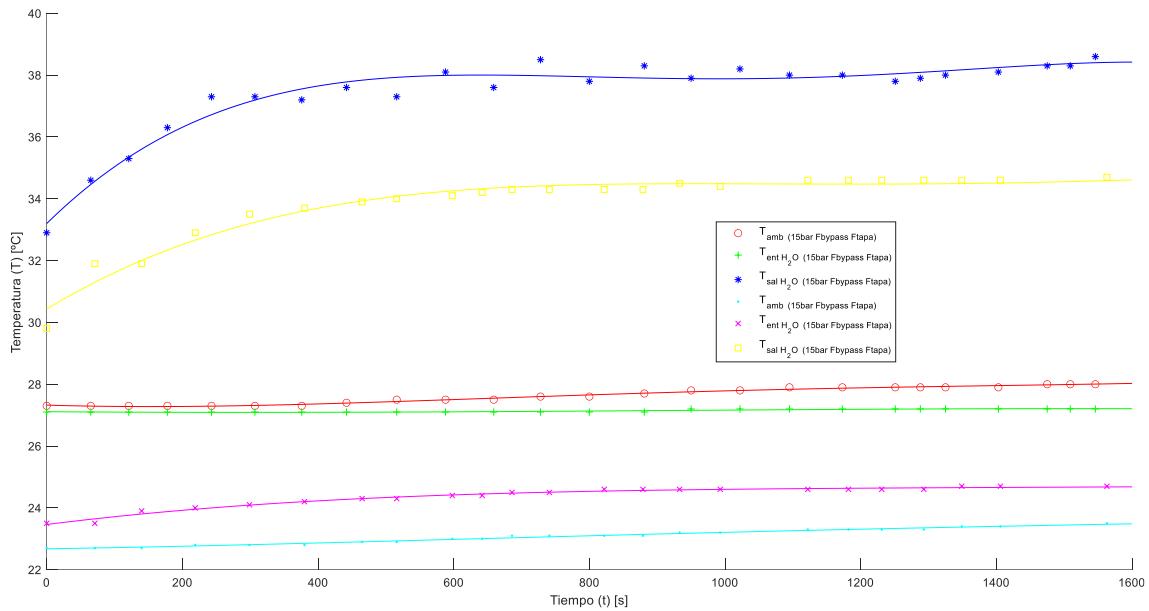


Figura 75. Gráfica comparativa de temperaturas ambiente, de entrada y salida del agua a 15 [bar] de presión de trabajo. (\*)Los marcadores “o, +,\*” corresponden al ensayo con temperatura de entrada  $27.1^{\circ}\text{C}$  mientras que los marcadores “;x, □” corresponden al ensayo con temperatura de entrada  $24.5^{\circ}\text{C}$ .

- Los datos obtenidos en régimen estacionario son los que se pueden observar en la siguiente tabla:

Nº	$T_{amb}$ [°C]	$T_{ent\_agua}$ [°C]	$T_{sal\_agua}$ [°C]	$\Delta T_{agua}$ [°C]
7	27.7	27.1	38	10.9
9	23.2	24.5	34.4	9.9

Tabla 13. Datos de temperaturas de entrada y salida del agua

Tal como se puede observar, la diferencia de temperatura de entrada del líquido refrigerante entre ambos ensayos es de  $2.6^{\circ}\text{C}$  y sin embargo el salto de temperaturas obtenido es diferente, variando entre ambos ensayos  $1^{\circ}\text{C}$ . Esta diferencia de salto de temperaturas en el líquido refrigerante es debida principalmente a la diferencia de temperatura ambiente del aire, ya que en el ensayo 7, la  $T_{amb} = 27.7^{\circ}\text{C}$  y en el ensayo 9  $T_{amb} = 23.2^{\circ}\text{C}$ . Al estar el aire a una mayor temperatura en el ensayo 7, aumenta ligeramente el calor que se extrae por refrigeración.

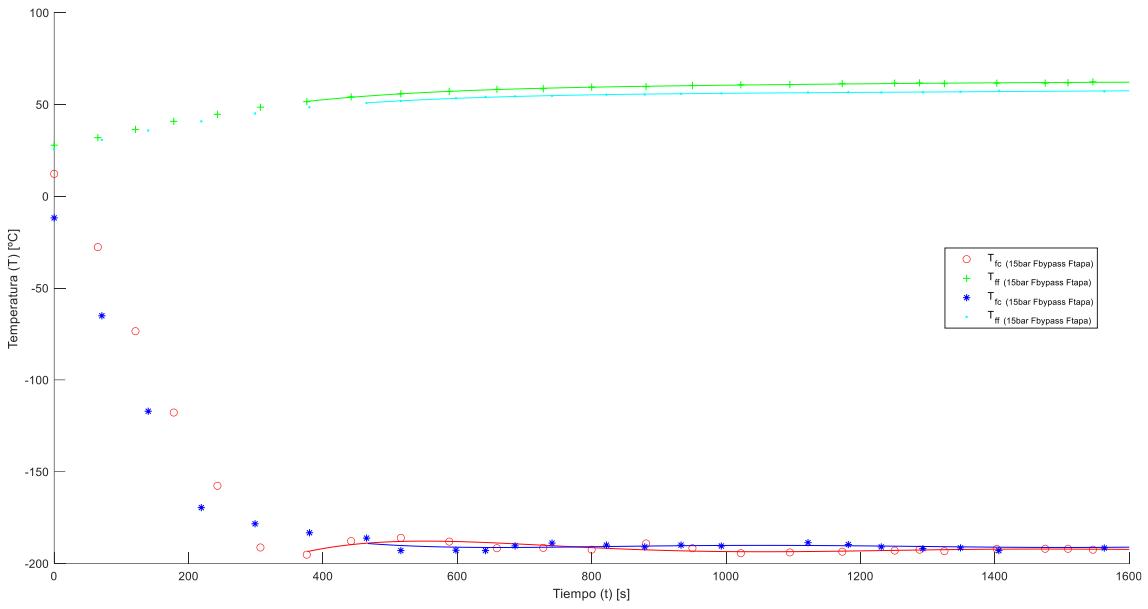


Figura 76. Gráfica comparativa de temperatura de foco frío y caliente a 15 [bar] de presión de trabajo. (\*)Los marcadores “o, +” corresponden al ensayo con temperatura de entrada 27.1°C mientras que los marcadores “\*,,” corresponden al ensayo con temperatura de entrada 24.5°C.

- Los datos obtenidos en régimen estacionario son los que se pueden observar en la siguiente tabla:

Nº	$T_{amb}$ [°C]	$T_{ent\_agua}$ [°C]	$T_{ff}$ [°C]	$T_{fc}$ [°C]	$\Delta T_f$ [°C]
7	27.7	27.1	-190.5	59	249.5
9	23.2	24.5	-188.9	55.3	244.2

Tabla 14. Datos de temperaturas del foco frío y del foco caliente.

Tal como se puede observar en el ensayo 7, el agua entra a una temperatura media de 27.1 [°C] y mantiene el foco frío a una temperatura de -190.5°C y el foco caliente a una temperatura de 59°C. En el ensayo 9, la temperatura de entrada es 2.6°C menor y esto influye más significativamente en el foco caliente, ya que este disminuye la temperatura 3.7°C, mientras que el foco frío solo aumenta la temperatura 1.6°C. Estas diferencias de temperatura se traducen en una diferencia entre los saltos de temperaturas de ambos ensayos de 5.3°C.

Es importante destacar que la diferencia entre las temperaturas de entrada en ambos ensayos no es igual a la diferencia entre las temperaturas de los focos debido a que ambos ensayos se encontraban a distintas temperaturas ambiente. Por esta razón, no se puede

afirmar nada acerca de en qué porcentaje influye en la temperatura de los focos la variación de temperatura de entrada del agua.

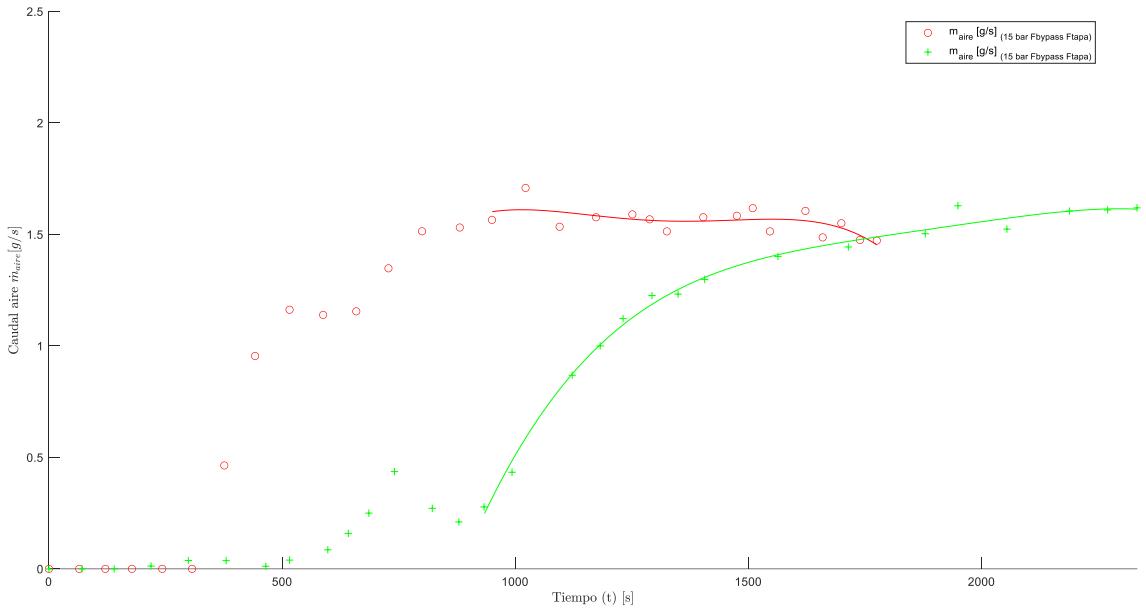


Figura 77. Gráfica comparativa del caudal de aire líquido generado respecto al tiempo a 15 [bar] de presión de trabajo. (\*) El marcador “o” corresponde al ensayo con temperatura de entrada 27.1°C mientras que el marcador “+” corresponde al ensayo con temperatura de entrada 24.5°C.

- Los datos obtenidos en régimen estacionario son los que se pueden observar en la siguiente tabla:

Nº	$T_{amb}$ [°C]	$T_{ent\_agua}$ [°C]	$\dot{m}_{aire}$ [ $\frac{g}{s}$ ]
7	27.7	27.1	1.54
9	23.2	24.5	1.54

Tabla 15. Datos de caudal de aire líquido generado.

Tal como se puede observar, una diferencia de temperaturas de entrada del líquido refrigerante de 2.6°C entre ambos ensayos y una diferencia de temperaturas ambiente de 4.5°C, no han influido en la cantidad de aire líquido que ha generado el motor Stirling durante el ensayo.

- El ensayo 9 comienza a producir aire líquido más tarde debido a que se trata de un ensayo aislado. Es decir, no se realizaron ensayos días anteriores a este, por lo que el depósito contenedor se encontraba a temperatura ambiente, lo cual implica que parte del aire líquido que se genera al principio se invierta en aumentar la temperatura de

dicho depósito, conllevando a la evaporación de gran parte de este aire líquido generado.

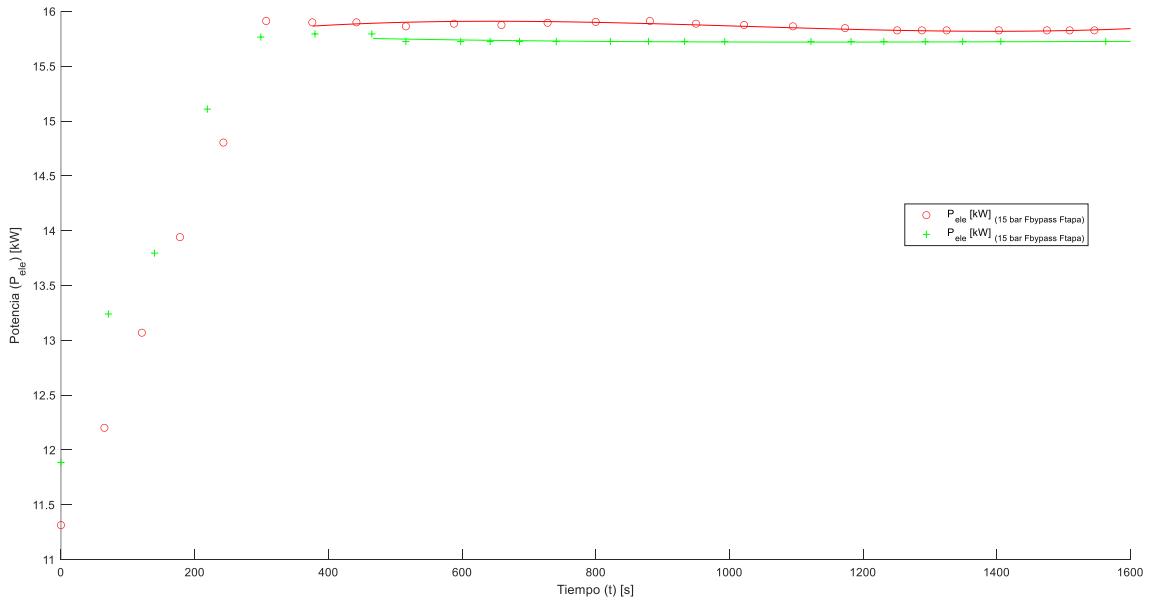


Figura 78. Gráfica comparativa del caudal de la potencia eléctrica consumida respecto al tiempo a 15 [bar] de presión de trabajo. (\*)El marcador “o” corresponde al ensayo con temperatura de entrada 27.1°C mientras que el marcador “+” corresponde al ensayo con temperatura de entrada 24.5°C.

- Los datos obtenidos en régimen estacionario son los que se pueden observar en la siguiente tabla:

Nº	$T_{amb}$ [°C]	$T_{ent\_agua}$ [°C]	$P_{ele}$ [kW]
7	27.7	27.1	15.86
9	23.2	24.5	15.72

Tabla 16. Datos de potencia eléctrica consumida.

La diferencia de potencia consumida entre ambos ensayos ha sido de 0.14 [kW], siendo mayor la potencia consumida en el ensayo 7, donde la temperatura ambiente y la temperatura de entrada de agua es mayor que en el ensayo 9.

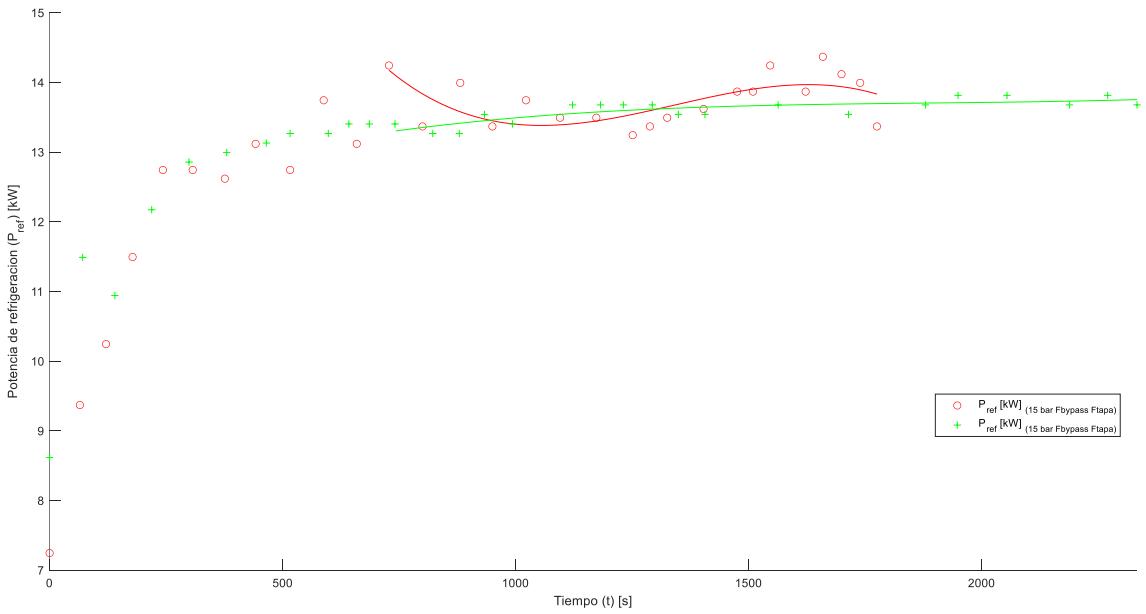


Figura 79. Gráfica comparativa del caudal de la potencia de refrigeración respecto al tiempo a 15 [bar] de presión de trabajo. (\*)El marcador “o” corresponde al ensayo con temperatura de entrada 27.1°C mientras que el marcador “+” corresponde al ensayo con temperatura de entrada 24.5°C.

- Los datos obtenidos en régimen estacionario son los que se pueden observar en la siguiente tabla:

<b>Nº</b>	<b>T<sub>amb</sub> [°C]</b>	<b>T<sub>entagua</sub> [°C]</b>	<b>T<sub>salagua</sub> [°C]</b>	<b>ΔT<sub>agua</sub> [°C]</b>	<b>P<sub>ref</sub> [kW]</b>
<b>7</b>	27.7	27.1	38	10.9	13.64
<b>9</b>	23.2	24.5	34.4	9.9	13.55

Tabla 17. Datos de potencia de refrigeración.

La diferencia de potencia de refrigeración entre ambos ensayos es de 0.09 [kW]. Esta diferencia es tan pequeña debido a que el caudal de agua refrigerante es el mismo en ambos ensayos y que la diferencia del salto de temperatura del agua entre ambos ensayos es de tan solo 1°C.

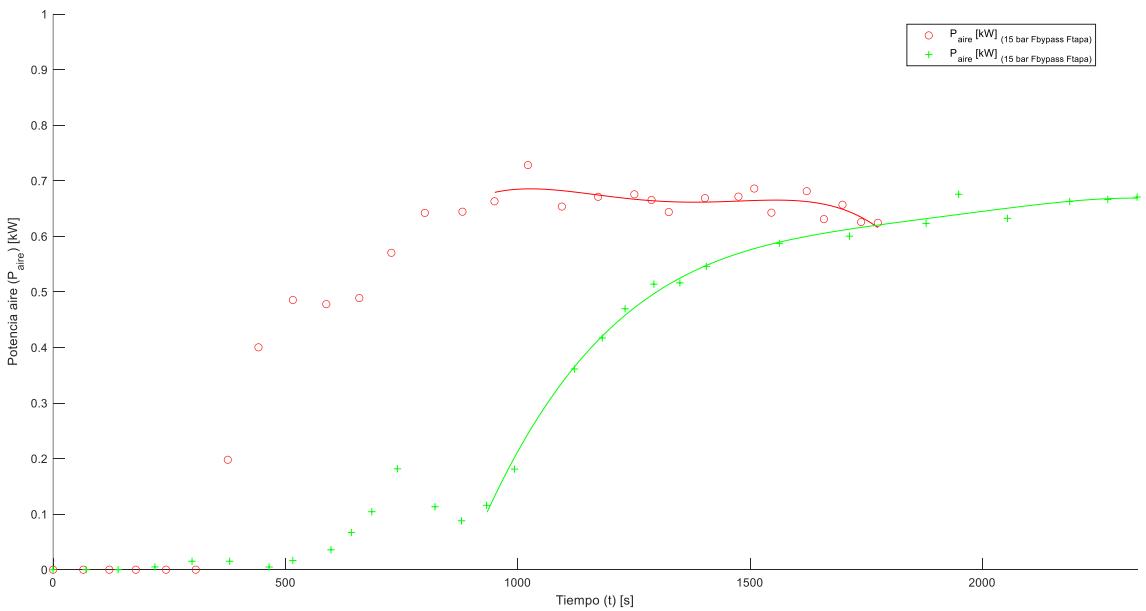


Figura 80. Gráfica comparativa del caudal de la potencia extraída al aire respecto al tiempo a 15 [bar] de presión de trabajo. (\*)El marcador “o” corresponde al ensayo con temperatura de entrada 27.1°C mientras que el marcador “+” corresponde al ensayo con temperatura de entrada 24.5°C.

Nº	$T_{amb}$ [°C]	$T_{ent\_agua}$ [°C]	$T_{ff}$ [°C]	$T_{fc}$ [°C]	$\Delta T_f$ [°C]	$P_{aire}$ [kW]
7	27.7	27.1	-190.5	59	249.5	0.65
9	23.2	24.5	-188.9	55.3	244.2	0.64

Tabla 18. Datos de potencia extraída al aire.

Se obtienen los resultados esperados, ya que la diferencia de temperaturas de los focos en el ensayo 7 es un 2.12% superior a la del ensayo 9, y al mantenerse el mismo caudal de aire generado, la diferencia de potencia extraída al aire en el ensayo 7 es también un 2.12% superior a la del ensayo 9.

Los anteriores resultados pueden verse resumidos en la siguiente tabla:

<b>Nº</b>	<b><math>T_{ent\_agua}</math></b>	<b><math>T_{sal\_agua}</math></b>	<b><math>\Delta T_a</math></b>	<b><math>T_{ff}</math></b>	<b><math>T_{fc}</math></b>	<b><math>\Delta T_f</math></b>	<b><math>\dot{m}_{aire} \left[ \frac{g}{s} \right]</math></b>	<b><math>P_{ele} [kW]</math></b>	<b><math>P_{ref} [kW]</math></b>	<b><math>P_{aire} [kW]</math></b>	<b><math>\eta_{frio} [\%]</math></b>	<b><math>\eta_{cator} [\%]</math></b>	<b><math>\eta_{total} [\%]</math></b>
<b>7</b>	27.1	38	10.9	-190.5	59	249.5	1.54	15.86	13.64	0.65	4.12	88.07	92.18
<b>9</b>	24.5	34.4	9.9	-188.9	55.3	244.2	1.54	15.72	13.55	0.64	4.07	87.19	91.26

*Tabla 19. Resumen de resultados de las variables de interés analítico. Se han calculado a partir de su estado estacionario y no desde el principio del ensayo.*

Los anteriores resultados han servido para tener una idea de los resultados que se esperan obtener para mayores temperaturas de entrada de agua. Sin embargo, falta por analizar qué ocurre cuando se mantiene la misma temperatura ambiente y presión de trabajo y se va variando la temperatura de entrada de agua por medio de la instalación de recirculación instalada y explicada anteriormente. Además, también falta por analizar en qué porcentaje afecta la variación de temperatura de entrada del agua a la temperatura del foco frío y el foco caliente.

Los resultados obtenidos durante la continuación del ensayo 9 se mostrarán en forma de tabla y dividiendo el ensayo en dos partes: una primera parte manteniendo la válvula de recirculación 100% abierta y dejando abierta la válvula de entrada de agua principal abierta hasta el punto en que la temperatura de entrada de agua al motor es aproximadamente de  $T_{ent\_agua} = 28^\circ\text{C}$ , y otra segunda parte manteniendo la válvula de recirculación 100% abierta y dejando la válvula de entrada de agua principal abierta hasta el punto en que la temperatura de entrada de agua al motor es aproximadamente de  $T_{ent\_agua} = 38^\circ\text{C}$ .

### 3.2.3.2. Tabla de resultados del ensayo con recirculación (continuación del ensayo 9).

#### Parte I

<b>Parte</b>	<b><math>T_{amb}</math></b>	<b><math>T_e</math></b>	<b><math>T_s</math></b>	<b><math>\Delta T_a</math></b>	<b><math>T_{fc}</math></b>	<b><math>T_{ff}</math></b>	<b><math>\Delta T_f</math></b>	<b><math>\dot{m}_{aire} \left[ \frac{g}{s} \right]</math></b>	<b><math>P_{aire} [kW]</math></b>	<b><math>P_{ref} [kW]</math></b>
I	23.2	26,4	36,1	9,7	58,2	-194,0	252,20	0,00 <sup>(*)</sup>	0	13.87
		27,7	37,1	9,4	58,5	-193,2	251,70	1,52	0.64	13.44
		27,8	37,2	9,4	58,8	-182,0	240,80	1,62	0.67	13.44
		27,9	37,3	9,4	58,3	-182,0	240,30	1,58	0.65	13.44
		28,1	37,6	9,5	59,0	-179,0	238,00	1,64	0.67	13.44

Tabla 20. Tabla de resultados del ensayo con recirculación posterior al ensayo número 9. Primera parte del ensayo, en el que la  $T_{ent\_agua} = 28^{\circ}\text{C}$  aproximadamente. <sup>(\*)</sup>Aunque la máquina estaba generando aire, el primer dato de aire generado se considera nulo para calcular el resto a partir de este.

- De nuevo, al igual que en la anterior comparación, se observa que, para el rango de temperaturas de entrada analizado, el caudal de producción de aire líquido no se ve afectado. La producción se mantiene en un valor medio de  $1.59 \left[ \frac{g}{s} \right]$ .

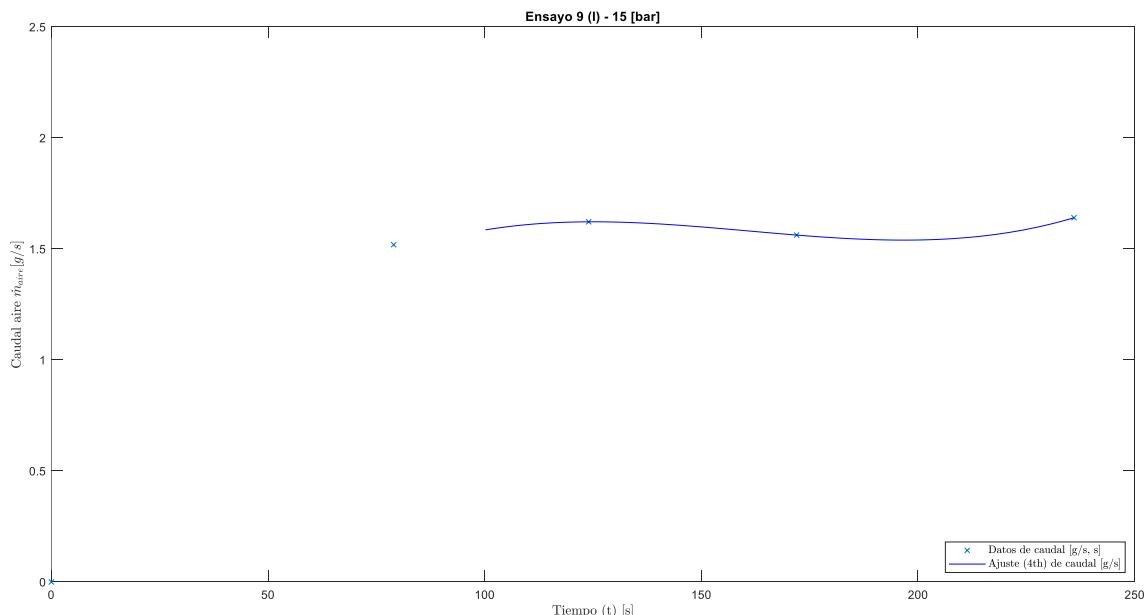


Figura 81. Potencia extraída al aire en la continuación del ensayo 9 – Parte I.

- El aumento de la temperatura de entrada del agua está provocando un aumento de la temperatura del foco frío y, en menor medida, un aumento de la temperatura del foco caliente. Aunque el motor no ha alcanzado completamente el régimen estacionario, a partir de los anteriores datos se obtiene que, para un aumento de temperatura de entrada de agua de  $1.7^{\circ}\text{C}$ , se obtiene un aumento de la temperatura

del foco frío de un 7.7%, mientras que el foco caliente solo aumenta la temperatura un 1.4%.

- La potencia de refrigeración permanece constante al ser constante el caudal de agua y su salto de temperaturas:

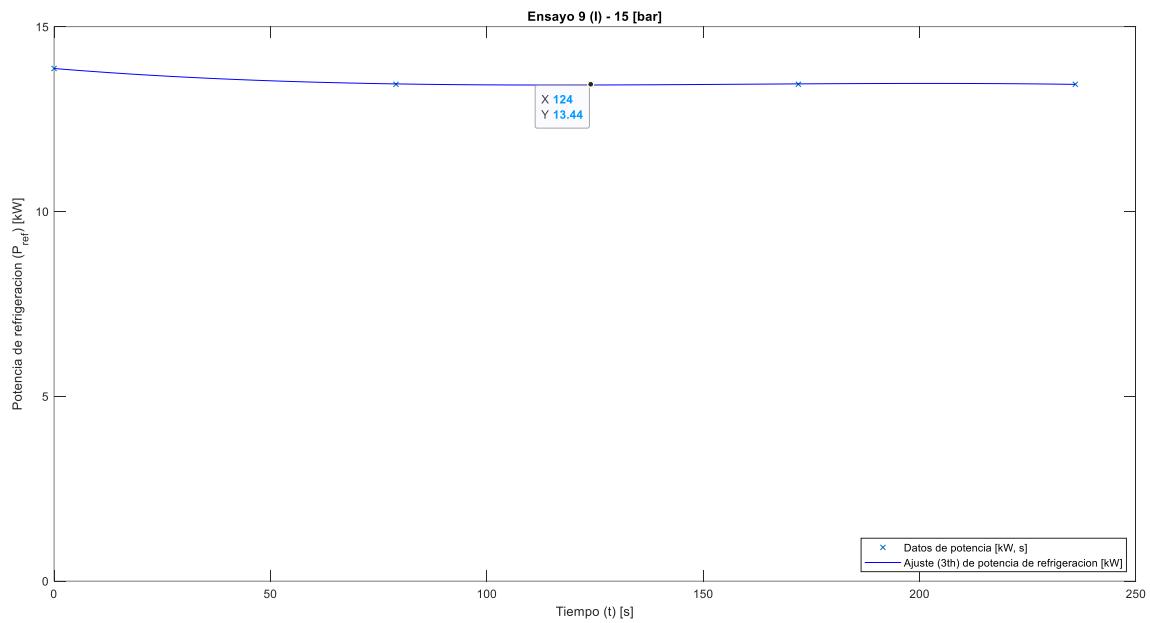


Figura 82. Potencia de refrigeración en la continuación del ensayo 9 – Parte I.

- La potencia de extracción de calor al aire también permanece constante para el rango de temperaturas estudiado:

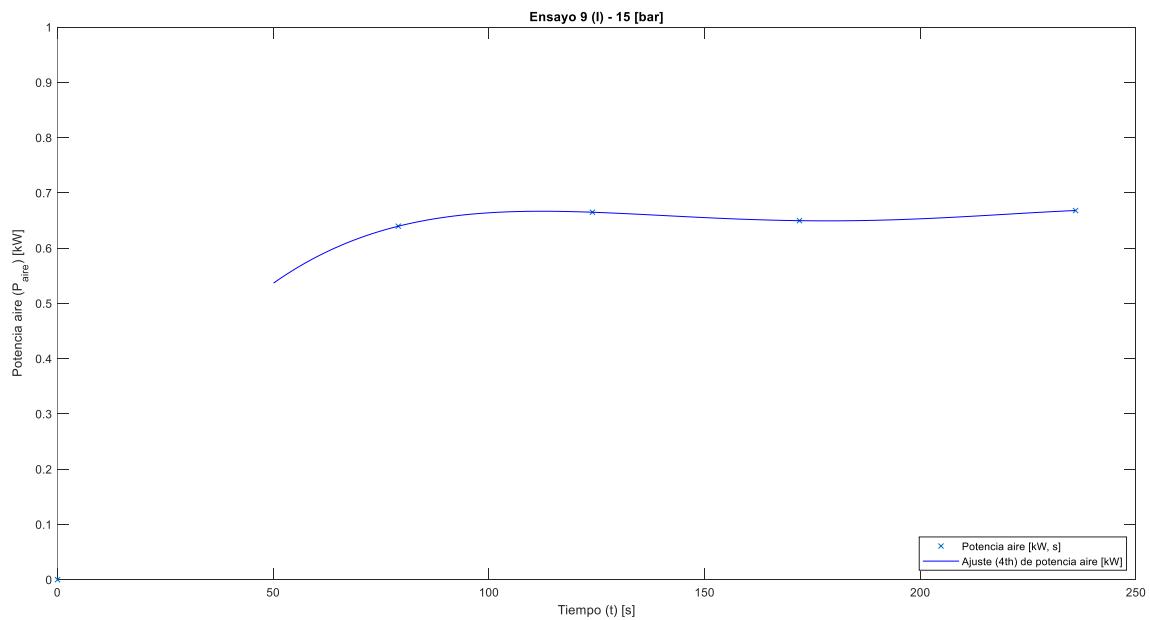


Figura 83. Potencia extraída al aire en la continuación del ensayo 9 – Parte I.

3.2.3.3. Tabla de resultados del ensayo con recirculación (continuación del ensayo 9).

Parte II

<b>Parte</b>	<b><math>T_{amb}</math></b>	<b><math>T_{ent_{agua}}</math></b>	<b><math>T_{sal_{agua}}</math></b>	<b><math>\Delta T_a</math></b>	<b><math>T_{fc}</math></b>	<b><math>T_{ff}</math></b>	<b><math>\Delta T_f</math></b>	<b><math>\dot{m}_{aire} \left[ \frac{g}{s} \right]</math></b>	<b><math>P_{aire} [kW]</math></b>	<b><math>P_{ref} [kW]</math></b>
II	23,2	34,3	43,7	9,4	59,6	-175,5	235,1	0,00*	0	11.99
		35,3	44,8	9,5	60	-173,5	233,5	1,36	0.55	12.11
		37,3	46,6	9,3	61,3	-176,2	237,5	1,48	0.60	11.86
		37,8	47,2	9,4	61,4	-175,9	237,3	1,44	0.58	11.99
		38,3	47,7	9,4	61,8	-174,5	236,3	1,33	0.54	11.99
		38,7	48,1	9,4	62,6	-174,2	236,8	1,65	0.67	11.99
		39,1	48,7	9,6	62,8	-173,8	236,6	1,37	0.55	12.24
		37,2	46,6	9,4	63	-173,9	236,9	1,48	0.59	11.99
		36,9	46,3	9,4	62,5	-173,9	236,4	1,53	0.62	11.99

Tabla 21. Tabla de resultados del ensayo con recirculación posterior al ensayo número 9. Segunda parte del ensayo, en el que la  $T_{ent_{agua}} = 38^{\circ}\text{C}$  aproximadamente. \*Aunque la máquina estaba generando aire, el primer dato de aire generado se considera nulo para calcular el resto a partir de este.

- El aumento de la temperatura del agua no influye en la generación de aire líquido.
- En este caso, se puede observar que a partir de los  $30^{\circ}\text{C}$  de temperatura de entrada de agua, disminuye la variación de temperatura del foco frío y aumenta la variación de temperatura del foco caliente.
- Una diferencia de temperaturas de entrada de agua de  $2.7^{\circ}\text{C}$  se traduce en un aumento de temperatura del foco frío de  $1.6^{\circ}\text{C}$  y un aumento de temperatura del foco caliente de  $3.4^{\circ}\text{C}$ .
- Se sigue manteniendo un valor de salto de temperatura entre focos de  $236^{\circ}\text{C}$  aproximadamente, independientemente del valor de temperatura de entrada de agua.
- Se observa que a partir de  $T_{ent_{agua}} = 30^{\circ}\text{C}$ , no se producen grandes variaciones de temperatura en el foco frío, se mantiene constante el caudal de aire producido y la temperatura ambiente es la misma. Esto se traduce en una potencia de extracción de calor al aire aproximadamente constante. Véase la siguiente figura:

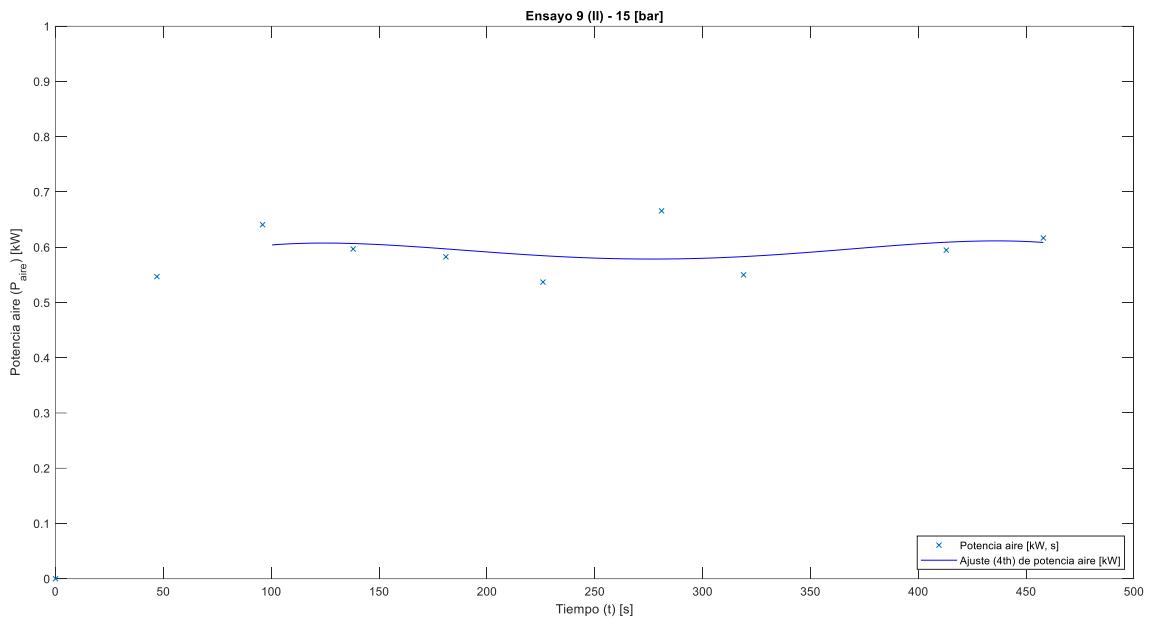


Figura 84. Potencia extraída al aire en la continuación del ensayo 9 – Parte II.

- El salto de temperaturas de refrigeración del agua se mantiene siempre en un valor cercano a los 9.4°C. Esto se traduce en que el motor dedica el mismo porcentaje de potencia en refrigerar el motor para todos los puntos. Véase la siguiente figura:

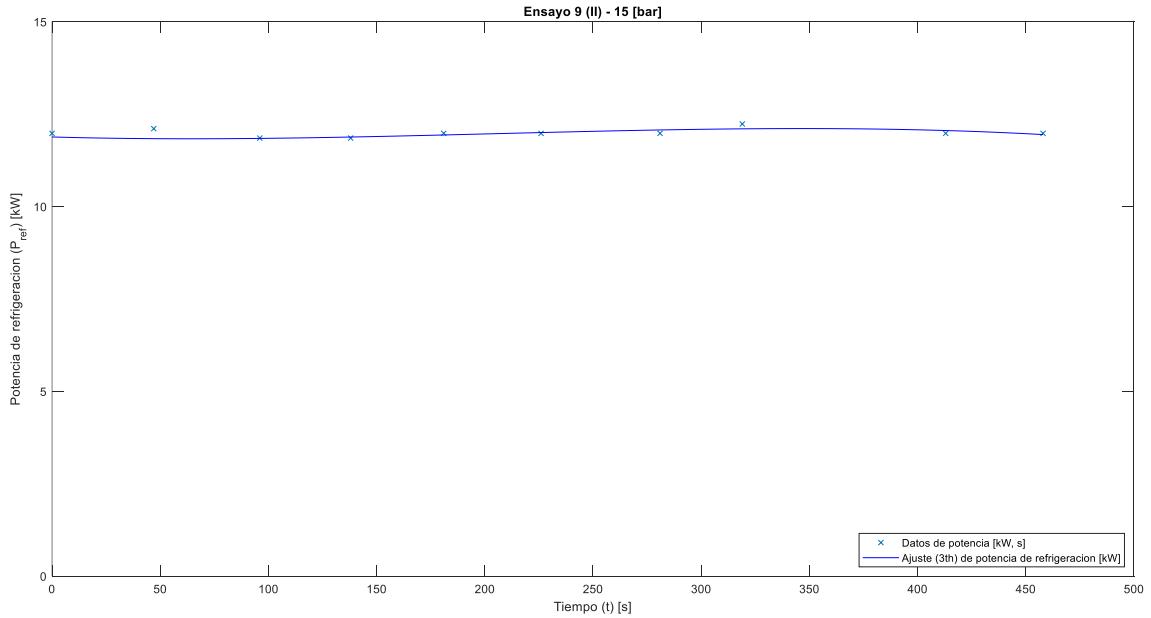


Figura 85. Potencia de refrigeración en la continuación del ensayo 9 – Parte II.

### 3.2.3.4. Análisis y conclusiones de la influencia de la temperatura de entrada de agua en el motor y resultados

Tras haber realizado los respectivos cálculos pormenorizados de los resultados anteriores y analizarlos, se obtienen las siguientes conclusiones:

- La temperatura ambiente influye en el calor que se extrae por refrigeración, de forma que, a mayor temperatura ambiente, mayor es el salto de temperaturas del líquido refrigerante.
- Cuando la máquina Stirling alcanza el régimen estacionario, un aumento de la temperatura de entrada del agua genera un aumento de las temperaturas del foco caliente y del foco frío. De forma aproximada, un aumento de temperatura de entrada de agua de  $5^{\circ}\text{C}$ , provoca un aumento de temperatura del foco frío de un 1% y un aumento de temperatura del foco caliente de un 5%.
- Los saltos de temperaturas entre los focos disminuyen a medida que aumenta la temperatura de entrada del agua.
- El aumento de la temperatura de entrada del agua, dentro de los rangos estudiados (entre 24 y  $38^{\circ}\text{C}$ ), no influye en el caudal de aire líquido generado, aunque sí influye en la temperatura de este, de forma que, a mayor temperatura de entrada de agua, menor es la temperatura del aire generado.
- La potencia que se invierte en refrigeración no se ve afectada si se estudian incrementos de temperatura bajos, ya que en todos los casos se mantiene el mismo caudal de refrigeración y el salto de temperaturas del agua permanece aproximadamente constante con un valor de  $\Delta T_{agua} = 9.4^{\circ}\text{C}$ . Sin embargo, si se comparan las dos partes del ensayo, se aprecia una disminución evidente de dicha potencia. Para temperaturas próximas a los  $37^{\circ}\text{C}$ , se obtienen potencias de  $P_{ref} \approx 12 \text{ [kW]}$ , mientras que para temperaturas próximas a los  $28^{\circ}\text{C}$ , se obtienen valores de potencia de  $P_{ref} \approx 13.5 \text{ [kW]}$ .
- De la misma forma que ocurre con la potencia de refrigeración, la potencia dedicada a extraer calor al aire permanece constante para diferencias de temperatura bajas. Si se comparan las dos partes del ensayo, se aprecia una clara disminución de la

potencia. Mientras que para una temperatura de entrada de agua de aproximadamente  $28^{\circ}\text{C}$ , se obtiene una  $P_{aire} \approx 0.66 [\text{kW}]$ , para temperaturas de entrada de agua próximas a los  $37^{\circ}\text{C}$ , se obtienen potencias cercanas a  $P_{aire} \approx 0.56 [\text{kW}]$ .

---

#### 4. Conclusiones y futuras líneas de trabajo

---

Tras realizar los análisis descritos anteriormente, se puede afirmar que el motor Stirling ZIF-1002 está diseñado para funcionar sin la tapa de entrada de aire ya que, a pesar de que la malla de la entrada se congela al principio del ensayo, la ausencia de la tapa aumenta el caudal de aire licuado que se genera y mejora el rendimiento de la máquina ya que disminuye el consumo eléctrico y aumentan las potencias de refrigeración y extracción de calor al aire.

Se puede afirmar también que, variando las presiones de trabajo, se pueden mejorar los resultados obteniéndose mayores cantidades de aire líquido y mayores rendimientos a cambio de un aumento de consumo eléctrico. Es importante destacar que no se ha alcanzado la potencia que se indica en el manual de uso del motor, aunque sí se ha llegado a valores similares.

Respecto a la influencia de la temperatura de entrada del líquido refrigerante, se puede afirmar que, si la intención es aprovechar parte de la energía que se invierte en enfriar el aire hasta temperaturas extremas para aumentar la temperatura del agua, el circuito de recirculación implementado para ello sale rentable energéticamente, ya que se genera la misma cantidad de aire licuado en el umbral de 19°C a 38°C. Es evidente que el aire generado no es tan frío, pero en función del uso al que se destine el motor, es posible que se pueda seguir utilizando, ya que sigue siendo aire líquido a temperaturas inferiores a los -100°C.

Gracias al desarrollo del presente TFG, ahora la máquina Stirling ZIF-1002 está preparada para la realización del número de ensayos que se desee ya que consta de un nuevo protocolo de puesta en marcha, se conocen las técnicas de grabación de vídeo más óptimas para tomar los datos más precisos posibles, se tiene una nueva tabla de recogida de datos mejorada, un código de lectura que representa los datos tomados en gráficas junto a sus respectivos ajustes, un código que compara hasta 5 ensayos de forma

automática y un circuito de recirculación diseñado e instalado en el laboratorio para modificar la temperatura de entrada del líquido refrigerante.

Dicho lo anterior y en base a los conocimientos adquiridos durante la realización del presente trabajo y con el aprendizaje adquirido, se indican a continuación aquellas líneas de trabajo que se consideran relevantes tanto para aumentar el conocimiento que se tiene del motor como para favorecer el desarrollo de este tipo de tecnologías en el futuro.

Por un lado, se propone la realización de nuevos ensayos aumentando y disminuyendo las temperaturas fuera de los umbrales en los que se ha trabajado en el presente TFG con el objetivo de comprobar las tendencias de las variables que se ven afectadas y el correcto funcionamiento del motor. El completo conocimiento del funcionamiento del motor bajo condiciones límite, permitirá descubrir hasta donde se puede llegar aprovechando la energía que se desecha para criogenizar el aire a temperaturas tan extremas.

Por otra parte, es interesante destacar que no existe un desarrollo de un ciclo Schmidt inverso, en el cual a partir de una potencia eléctrica se pudieran obtener las condiciones de presión y temperatura en las que trabajará el motor, permitiendo de esta manera conocer, como primera aproximación, las potencias y rendimientos bajo los que trabajará la máquina. A partir de este punto, se propone realizar una modelización del motor para distintas condiciones de funcionamiento y estimar así los resultados que se deberían obtener durante el transcurso de los hipotéticos ensayos que se realicen.

Otro punto de especial interés es el de desarrollar una tecnología de sensorización que sea capaz de recoger los datos de las variables características del motor para permitir su posterior análisis de una forma más sencilla. Se podrían evitar de esta forma el tener que realizar un vídeo durante el ensayo para transcribir los datos posteriormente, con la pérdida de tiempo y precisión que esto conlleva.

---

## 5. Bibliografía

---

- [1] Autonucion. Lugar de publicación: <https://www.autonucion.com/motor-stirling-conjunto-casero-funcionamiento/>
- [2] Laplace. Lugar de publicación:  
[http://laplace.us.es/wiki/index.php/Ciclo\\_de\\_Stirling](http://laplace.us.es/wiki/index.php/Ciclo_de_Stirling)
- [3] Seas. Lugar de publicación:  
[https://www.seas.es/blog/diseno\\_mecanico/tipos-de-motor-stirling/](https://www.seas.es/blog/diseno_mecanico/tipos-de-motor-stirling/)
- [4] Thombare, D. G., & Verma, S. K. (2008). Technological development in the Stirling cycle engines. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12(1), 1-38. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2006.07.001>
- [5] Motorfull. Lugar de publicación: <https://motorfull.com/2009/12/los-vehiculos-experimentales-de-la-nasa-con-motores-stirling>
- [6] Lainformacion. Lugar de publicación:  
<https://www.lainformacion.com/opinion/futuretech/nasa-nuclear/19742/>
- [7] Revistamarina. Lugar de publicación:  
<https://revistamarina.cl/revistas/1991/3/torres.pdf>
- [8] Instructables. Lugar de publicación:  
[https://cdn.instructables.com/ORIG/F3T/GQCB/IUORK7G6/F3TGQCB\\_IUORK7G6.pdf](https://cdn.instructables.com/ORIG/F3T/GQCB/IUORK7G6/F3TGQCB_IUORK7G6.pdf)
- [9] Sciencedirect. Lugar de publicación:  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0140700720301080>

## ANEXOS

---

### 6. ANEXO 1: Código “interpreteensayo.m”

---

```
% En el siguiente script se llevará a cabo la lectura  
y representación de  
% los datos obtenidos durante los ensayos del motor  
Stirling ZIF-1000 para  
% el TFG 2020/2021 de Daniel Núñez Gevorkian.  
  
% La siguiente línea guarda los datos de todas las  
celdas del excel  
% en la variable datos  
%%  
close all;  
titulodocumento = '2_Fbypass_Ttapa_19bar.xlsx';  
datos = readtable(titulodocumento);  
St_numensayo = titulodocumento(1);  
St_presion = titulodocumento(17:18);  
% Los datos empiezan en la fila 7  
  
%%  
% Se sigue el siguiente orden:  
  
%[1]----  
[2]...[3].....[4].[5].[6].[7].[8]....[9]..[10]..  
. [11]....[12]  
%Medida,Tiempo,LitrosTotales,T1,T2, T3,  
T4,Venturi,Tamb,Tentrag,Tsalag,Tfc,  
  
% [13].[14].[15].[16].[17].[18].[19].[20].[21]  
% Tff,Pagua, U1, U2, U3, I1, I2, I3, AireLiq  
  
p_helio =  
str2double(cell2mat(table2array(datos(2,11))));  
p_trabajo =  
str2double(cell2mat(table2array(datos(2,12))));  
q_ref =  
str2double(cell2mat(table2array(datos(2,13))));  
rpm = str2double(cell2mat(table2array(datos(2,14))));  
  
datos_ensayo = table2array(datos((7:36),:));
```

```

% Cada vez que quiera hacer uso de un dato, tengo que
transformarlo de tipo
% cell a tipo número, por lo tanto usar:
% str2double(cell2mat(datos_ensayo(VALORES))) 

%% Cálculo de temperaturas, intensidades, calores...
%Tratamiento de columna tiempo
t = zeros(1,size(datos_ensayo,1));
for i=1:size(datos_ensayo,1)
    t_cell = strsplits(char(datos_ensayo(i,2)),':');
    if size(t_cell,2) ~= 1
        t_seg = str2double(cell2mat(t_cell(1)))*60+...
            str2double(cell2mat(t_cell(2)));
        t(i) = t_seg;
    end
end

%Vector de tiempos para ajustes
xT = linspace(0,t(length(t)),1000);
%Caudal agua m_agua(1) [kg/s]
m_agua =
polyfit(t(:,1),str2double(datos_ensayo(:,3)),1)*0.996;
m_dot_agua = m_agua(1);

% 1- Ajustes de nube de puntos (T1,T2,T3,T4)
ajustesT = zeros(4,5);
plotTs = zeros(4,1000);
for i=4:7
    ajustesT(i-3,:) =
polyfit(t(:,1),str2double(datos_ensayo(:,i)),4);
    plotTs(i-3,:) = polyval(ajustesT(i-3,:), xT);
end

% 2- Ajustes de anteriores nubes de puntos (Tamb,
Tentagua, Tsalagua)
ajustesT2 = zeros(3,5);
plotTs2 = zeros(3,1000);
for i=9:11
    ajustesT2(i-7,:) =
polyfit(t(:,1),str2double(datos_ensayo(:,i)),4);
    plotTs2(i-7,:) = polyval(ajustesT2(i-7,:), xT);
end

% 3- Ajuste de anterior nube de puntos (Tfc, Tff)
ajustesT3 = zeros(2,6);
plotTs3 = zeros(2,length(xT(xT>t(7))));
for i=12:13

```

```

ajustesT3(i-11,:) = polyfit(t(7:length(t)), ...  

str2double(datos_ensayo((7:length(datos_ensayo)),i))',  

5);  

plotTs3(i-11,:) = polyval(ajustesT3(i-11,:),  

xT(xT>t(7)));  

end  

% 5- Ajuste de anterior nube de puntos (airegenerado)  

ajustesAirgen=  

polyfit(t(5:length(t)),str2double(datos_ensayo(5:length(t),22))',4);  

plotAirgen = polyval(ajustesAirgen, xT);  

% 6- Cálculo de t-CaudalAireLiq  

m_aire = str2double(datos_ensayo(:,22))./(1000); %[kg]  

m_dot_aire = zeros(1,30); % [kg]  

for i=2:length(m_aire)  

    m_dot_aire(i) = (m_aire(i)-m_aire(i-1))/(t(i)-t(i-1));  

end  

%Ajuste de anterior nube de puntos (Caudal Aire Liq)  

%Elimino los NaN, los Infs y los zeros para poder  

ajustar  

nans = find(isnan(m_dot_aire(:)));  

infs = find(isinf(m_dot_aire(:)));  

for i=1:length(nans)  

    m_dot_aire(nans(i)) = m_dot_aire(nans(i)-1);  

end  

for i=1:length(infs)  

    m_dot_aire(infs(i)) = 0;  

end  

ajustesCaudalAireLiq =  

polyfit(t(15:length(t)),m_dot_aire(15:length(t)),4);  

plotCaudalAireLiq = polyval(ajustesCaudalAireLiq,  

xT(xT>t(15)));  

%% Cálculo de potencias  

% La eléctrica ya la tengo en potencia  

% 7- Cálculo de t-potencia electrica  

potenciaelec = zeros(1,30);  

for i=1:30  

    int1 = str2double(datos_ensayo(i,18));  

    int2 = str2double(datos_ensayo(i,19));  

    int3 = str2double(datos_ensayo(i,20));  

    voltaje = str2double(datos_ensayo(i,17));

```

```

potenciaelec(i) =
3*voltaje/sqrt(3)*mean([int1,int2,int3])*0.98/1000;
end
% Ajuste de anterior nube de puntos (potencia)
ajustesPot=
polyfit(t(7:length(t)),potenciaelec(7:length(potenciaelec)),3);
plotpot = polyval(ajustesPot, xT(xT>t(7)));

% 8- Cálculo de t-PotRef
Cp_agua = 4184; %J/kgK
Pot_ref =
(m_dot_agua*Cp_agua*(str2double(datos_ensayo(:,11))...
-str2double(datos_ensayo(:,10)))./1000)';

%Ajuste de anterior nube de puntos (Pref)
ajustesQref=
polyfit(t(12:length(t)),Pot_ref(12:length(t)),3);
plotQrefs = polyval(ajustesQref, xT(xT>t(12)));

% 9- Cálculo de t-PotAire
%Para que sea lo más exacta posible, tengo que obtener
una recta
%para la Cp, ya que varía en función de la
temperatura. Para ello importo
%valores de una tabla de internet (hoba.mat) y obtengo
una recta a partir
%de los mismos.
Pot_aire_sens = zeros(1,30);
load hoba.mat x
%Ajuste de Cp a partir de tabla importada
ajusteCp= polyfit(x(:,1),x(:,3),6);
funct_Cp = @(T)
ajusteCp(1)*T.^6+ajusteCp(2)*T.^5+ajusteCp(3)*T.^4 ...
+ajusteCp(4)*T.^3+ajusteCp(5)*T.^2+ajusteCp(6)*T.^1+ajusteCp(7);
for i=1:30
    Pot_aire_sens(i) =
m_dot_aire(i)*integral(funct_Cp, ...
    str2double(datos_ensayo(i,13)), ...
    str2double(datos_ensayo(i,9))); %[W]
end
%El calor latente de vaporización lo obtengo de las
tablas. No está
%el del aire directamente, pero sí el de oxígeno y
nitrógeno, por lo

```

```

%que puedo hacerlo a partir de la composicion del aire
de 21-78
Pot_aire_lat =
(m_dot_aire(:)*(0.21*213000+0.79*201000))'; % [W]
Pot_aire = ((Pot_aire_sens(:) +
Pot_aire_lat(:))/1000)'; % [kW]
%Ajuste de anterior nube de puntos (P_aire)
ajustesPotaire=
polyfit(t(15:length(t)),Pot_aire(15:length(t)),4);
plotQaire = polyval(ajustesPotaire, xT(xT>t(15)));

% 10- Potencia Perdidas
Pot_perdidas = potenciaelec-(Pot_ref+Pot_aire);
ajustesQperdkw= polyfit(t(:),Pot_perdidas(:,3));
plotQperdkw = polyval(ajustesQperdkw, xT);

%% Cálculo de rendimientos
% 11- Rendimiento frio
rend_frio = Pot_aire./potenciaelec;

%Ajuste de anterior nube de puntos (Rendimiento frio)
ajustesRendf=
polyfit(t(16:length(t)),rend_frio(16:length(t)),3);
plotrendf = polyval(ajustesRendf, xT(xT>t(16)));

% 12- Rendimiento calor
rend_calor = Pot_ref./potenciaelec;

%Ajuste de anterior nube de puntos (Rendimiento calor)
ajustesRendc= polyfit(t(12:length(t)),
rend_calor(12:length(t)),3);
plotrendc = polyval(ajustesRendc, xT(xT>t(12)));

% 13- Rendimiento total
rend_total = (Pot_aire+Pot_ref)./potenciaelec;
%Ajuste de anterior nube de puntos (Rendimiento calor)
ajustesRendtot = polyfit(t(12:length(t)),
rend_total(12:length(t)),3);
plotrendtot = polyval(ajustesRendtot, xT(xT>t(12)));

clc;
%% Representaciones gráficas
if (input("¿Desea mostrar las figuras para el actual
ensayo? [1 si/2 no]:")...
    == 1)
    figure('Name','1.- Temperaturas
T1,T2,T3,T4','NumberTitle','off')

```

```

%_____ 1.- Gráfica de tiempo-
(T1(Col4),T2(Col5),T3(Col6),T4(Col7))
plot(t,str2double(datos_ensayo(:,4)), 'o',...
      t,str2double(datos_ensayo(:,5)), '+',...
      t,str2double(datos_ensayo(:,6)), '*',...
      t,str2double(datos_ensayo(:,7)), 'x');
hold on;
for i=4:7
    switch i
        case 4
            plot(xT, plotTs(i-3,:), 'b');
        case 5
            plot(xT, plotTs(i-3,:), 'r');
        case 6
            plot(xT, plotTs(i-3,:), 'y');
        case 7
            plot(xT, plotTs(i-3,:), 'm');
    end
end
xlabel('Tiempo (t) [s]');
ylabel('Temperatura (T) [°C]');
title('Ensayo ' +
convertCharsToStrings(St_numensayo) + ' - Presion:
' ...
+ convertCharsToStrings(St_presion) + ' [bar]');
annotation('textbox', [0.66, 0.18, 0.1, 0.1],
'String',{...
    "T_{1-max}= " +
max(str2double(datos_ensayo(:,4))) + " °C      T_{1-
med}= "... +
round(mean(str2double(datos_ensayo(14:length(datos_ens
ayo(:,4)),4))),2)+" °C", ...
    "T_{2-max}= " +
max(str2double(datos_ensayo(:,5)))+ " °C      T_{2-med}= "
"..." +
round(mean(str2double(datos_ensayo(14:length(datos_ens
ayo(:,5)),5))),2)+" °C", ...
    "T_{3-max}= " +
max(str2double(datos_ensayo(:,6)))+ " °C      T_{3-med}= "
"..." +
round(mean(str2double(datos_ensayo(14:length(datos_ens
ayo(:,6)),6))),2)+" °C", ...

```

```

    "T_{4-max}= " +
max(str2double(datos_ensayo(:,7)))+ " °C      T_{4-med}=
"...
+
round(mean(str2double(datos_ensayo(14:length(datos_ensayo(:,7))),7))),2)+" °C"}));
legend('Ajuste(4th) T_1','Ajuste(4th) T_2',
'Ajuste(4th) T_3',...
'Ajuste(4th) T_4','Position',[0.805, 0.155,
0.1, 0.1]);
xlim([0 1600]);

figure('Name','2.- Temperatura ambiente, entrada y
salida agua',...
'NumberTitle','off');
%_____ 2.-Gráfica de tiempo-
(Tamb,Tentagua,Tsalagua)
plot(t,str2double(datos_ensayo(:,9)), 'o',...
t,str2double(datos_ensayo(:,10)), '+',...
t,str2double(datos_ensayo(:,11)), 'x');
hold on;
for i=9:11
    switch i
        case 9
            plot(xT, plotTs2(i-7,:), 'b');
        case 10
            plot(xT, plotTs2(i-7,:), 'r');
        case 11
            plot(xT, plotTs2(i-7,:), 'y');
    end
end
xlabel('Tiempo (t) [s]');
ylabel('Temperatura (T) [°C]');
title('Ensayo ' +
convertCharsToStrings(St_numensayo) +...
' - Presion: ' +
convertCharsToStrings(St_presion) + ' [bar]');
annotation('textbox', [0.825, 0.51, 0.1, 0.1],
'String',...
{ "T_{sal-agua-max}= " +...
    round(max(str2double(datos_ensayo(:,11))),2) +
" °C",...
    "T_{sal-agua-med}= " +...
    round(mean(str2double(...

datos_ensayo(5:length(datos_ensayo(:,11)),11))),2) + " °C",...

```

```

    "T_{ent-agua-med}= " +...
    round(mean(str2double(datos_ensayo(:,10))),2)
+ " °C",...
    "T_{amb-med}= " +...
    round(mean(str2double(datos_ensayo(:,9))),2) +
" °C});;
legend('Ajuste(4th) Temp. ambiente',...
'Ajuste(4th) Temp. entrada agua',...
'Ajuste(4th) Temp. salida agua',...
,'Position', [0.775, 0.6, 0.1, 0.1]);
xlim([0 1600]);

figure('Name','3.- Temperaturas foco caliente y
foco frio',...
'NumberTitle','off');
%_____ 3.- Gráfica de t-(Tfc(Col12),Tff(Col13))
plot(t,str2double(datos_ensayo(:,13)), 'o',...
t,str2double(datos_ensayo(:,12)), '+');
hold on;
for i=12:13
    switch i
        case 12
            plot(xT(xT>t(7)), plotTs3(i-11,:),
'r');
        case 13
            plot(xT(xT>t(7)), plotTs3(i-11,:),
'b');
    end
end
xlabel('Tiempo (t) [s]');
ylabel('Temperatura (T) [°C]');
title('Ensayo ' +
convertCharsToStrings(St_numensayo) +...
' - Presion: ' +
convertCharsToStrings(St_presion) + ' [bar]');
annotation('textbox',[0.69, 0.3, 0.1, 0.1],
'String',{...
    "T_{foco-frio-min}= " +
min(str2double(datos_ensayo(:,13))) ...
+ " °C      T_{foco-frio-med}= " ...
+
round(mean(str2double(datos_ensayo(5:length(datos_ensa
yo(:,13)),13))),2) + " °C",...
    "T_{foco-cal-max}= " +
max(str2double(datos_ensayo(:,12))) ...
+ " °C      T_{foco-cal-med}= " ...

```

```

+
round(mean(str2double(datos_ensayo(5:length(datos_ensa
yo(:,12)),12))),2) + " °C",...
});
legend('Ajuste (5th) Temp. foco frío',...
'Ajuste (5th) Temp. foco caliente',...
'Location',[0.775, 0.38, 0.1, 0.1]);
xlim([0 1600]);

figure('Name','4.- Intensidades I1,I2 e
I3','NumberTitle','off');
%_____ 4.- Gráfica de t-
(I1(Col18),I2(Col19),I3(Col20))
plot(t,str2double(datos_ensayo(:,18)),'-o',t, ...
str2double(datos_ensayo(:,19)),'-*',...
t,str2double(datos_ensayo(:,20)),'-x');
ylim([15 30]);
legend('I1', 'I2', 'I3','Location','Southeast');
xlabel('Tiempo [s]');
ylabel('Intensidad (I) [A]');
title('Ensayo ' +
convertCharsToStrings(St_numensayo) +...
' - Presion: '...
+ convertCharsToStrings(St_presion) + ' ...
[bar]');
xlim([0 1600]);

figure('Name','5.- Aire generado
[g]','NumberTitle','off');
%_____ 5.- Gráfica de t-airegenerado(Col22)
plot(t,str2double(datos_ensayo(:,22)), 'X');
hold on;
plot(xT, plotAirgen, 'b');
xlabel('Tiempo (t) [s]');
ylabel('Aire generado (m_{aire}) [g]');
title('Ensayo ' +
convertCharsToStrings(St_numensayo) +...
' - Presion: '...
+ convertCharsToStrings(St_presion) + ' ...
[bar]');
legend('Datos medidos [g, s]',...
'Ajuste (4th) de aire generado
[g]','Location','Southeast');
xlim([0 1600]);

figure('Name','6.- Caudal aire liquido
[g/s]','NumberTitle','off');

```

```

% _____ 6.-Gráfica de t-CaudalAireLiq
plot(t(:), m_dot_aire(:)*1000, 'x');
hold on;
plot(xT(xT>t(15)), plotCaudalAireLiq*1000, 'b')
xlabel('Tiempo (t) [s]', 'interpreter', 'latex');
ylabel('Caudal aire $\dot{m}_{aire}$ [g/s]', 'interpreter', 'latex');
title('Ensayo ' +
convertCharsToStrings(St_numensayo) + ...
' - Presion: '...
+ convertCharsToStrings(St_presion) + ' [bar]');
annotation('textbox', [0.804, 0.12, 0.1, 0.1], ...
'interpreter', 'latex', 'String',...
"$\dot{m}_{aire-med}=$" +
round(mean(m_dot_aire(23:length(m_dot_aire)))*1000,2)
+ ...
" [g/s]");
legend('Datos de caudal [g/s, s]', ...
'Ajuste (4th) de caudal
[g/s]', 'Location', 'Southeast',...
'interpreter', 'latex');
xlim([0 1600]);

figure('Name', '7.- Potencia
electrica[kW]', 'NumberTitle', 'off');
% _____ 7.-Gráfica de t-potencia electrica
plot(t,potenciaelec, 'X');
hold on;
plot(xT(xT>t(7)), plotpot, 'b');
xlabel('Tiempo (t) [s]');
ylabel('Potencia (P_{ele}) [kW]');
title('Ensayo ' +
convertCharsToStrings(St_numensayo) + ...
' - Presion: '...
+ convertCharsToStrings(St_presion) + ' [bar]');
legend('Datos medidos [kW, s]', ...
'Ajuste (3th) de potencia electrica
[kW]', 'Location', 'Southeast');
annotation('textbox', [0.804, 0.12, 0.1, 0.1], ...
'String',...
"P_{ele-med} = " + ...

round(mean(potenciaelec(8:length(potenciaelec))),2) +
" [kW]");

```

```

xlim([0 1600]);
ylim([10 20])

figure('Name','8.- Potencia de refrigeracion
[kW]',...
       'NumberTitle','off');
%_____ 8.- Gráfica de t-Pref
plot(t,Pot_ref,'x')
hold on;
plot(xT(xT>t(12)),plotQrefs,'b');
xlabel('Tiempo (t) [s]');
ylabel('Potencia de refrigeracion (P_{ref}) [kW]');
title('Ensayo ' +
convertCharsToStrings(St_numensayo) +...
' - Presion: '...
+ convertCharsToStrings(St_presion) + '[bar]');
legend('Datos de potencia [kW, s]',...
'Ajuste (3th) de potencia de refrigeracion
[kW]',...
'Location','Southeast');
annotation('textbox',[0.805, 0.12, 0.1, 0.1],
'String',...
"P_{ref-med}=" +
round(mean(Pot_ref(8:length(Pot_ref))),2) +...
" [kW]");
xlim([0 1600]);

figure('Name','9.- Potencia aire
[kW]', 'NumberTitle','off');
%_____ 9.-Gráfica de t-PotenciaAire
plot(t,Pot_aire,'x');
hold on;
plot(xT(xT>t(15)),plotQaire,'b');
xlabel('Tiempo (t) [s]');
ylabel('Potencia aire (P_{aire}) [kW]');
ylim([0 1]);
title('Ensayo ' +
convertCharsToStrings(St_numensayo) +...
' - Presion: '...
+ convertCharsToStrings(St_presion) + '[bar]');
legend('Potencia aire [kW, s]',...
'Ajuste (4th) de potencia aire
[kW]', 'Location','Southeast');

```

```

annotation('textbox', [0.801, 0.12, 0.1, 0.1],
'String',...
    "P_{aire-med}= " +...
    round(mean(Pot_aire(23:length(Pot_aire))),3) +
" [kW]");
    xlim([0 1600]);

figure('Name','10.- Potencia perdidas
[kW]', 'NumberTitle','off');
%_____ 10.- Gráfica Potencia Perdidas
plot(t,Pot_perdidas, 'x');
hold on;
plot(xT, plotQperdkw, 'b')
xlabel('Tiempo (t) [s]');
ylabel('Potencia perdidas P_{perdidas} [kW]');
title('Ensayo ' +
convertCharsToStrings(St_numensayo) +...
    ' - Presion: '...
    + convertCharsToStrings(St_presion) + ' '
[bar']);
legend('Potencia perdidas [kW, s]',...
    'Ajuste (3th) de potencia perdidas
[kW]', 'Location','Northeast');
xlim([0 1600]);

figure('Name','11.- Rendimiento
frio', 'NumberTitle','off');
%_____ 11.- Gráfica rendimiento frio
plot(t,rend_frio, 'x');
hold on;
plot(xT(xT>t(16)), plotrendf, 'b')
xlabel('Tiempo (t) [s]');
ylabel('Rendimiento frio (\eta_{frio}) [-]');
ylim([0 0.06]);
title('Ensayo ' +
convertCharsToStrings(St_numensayo) +...
    ' - Presion: '...
    + convertCharsToStrings(St_presion) + ' '
[bar']);
legend('Rendimiento frio [-]',...
    'Ajuste (3th) de rendimiento
frio', 'Location','Southeast');
annotation('textbox', [0.822, 0.12, 0.1, 0.1],
'String',...
    "\eta_{frio-med}= " +...

```

```

round(mean(rend_frio(23:length(rend_frio)))*100,2) +
"%" );
xlim([0 1800]);

figure('Name','12.- Rendimiento
calor','NumberTitle','off');
%_____ 12.- Gráfica Rendimiento calor
plot(t,rend_calor, 'x');
hold on;
plot(xT(xT>t(12)), plotrendc, 'b')
xlabel('Tiempo (t) [s]');
ylabel('Rendimiento calor ( $\eta_{calor}$ ) [-]');
ylim([0.5 1]);
title('Ensayo ' +
convertCharsToStrings(St_numensayo) + ...
' - Presion: '...
+ convertCharsToStrings(St_presion) + ' ...
[bar]');
legend('Rendimiento calor [-]',...
'Ajuste (3th) de rendimiento
calor','Location','Southeast');
annotation('textbox', [0.81, 0.12, 0.1, 0.1],
'String',...
"\mathbf{\eta_{calor-med}}= " + ...

round(mean(rend_calor(23:length(rend_calor)))*100,2) +
"%" );
xlim([0 1800]);

figure('Name','13.- Rendimiento
total','NumberTitle','off');
%_____ 13.- Gráfica Rendimiento total
plot(t,rend_total, 'x');
hold on;
plot(xT(xT>t(12)), plotrendtot, 'b');
xlabel('Tiempo (t) [s]');
ylabel('Rendimiento total ( $\eta_{total}$ ) [-]');
ylim([0.5 1]);
title('Ensayo ' +
convertCharsToStrings(St_numensayo) + ...
' - Presion: '...
+ convertCharsToStrings(St_presion) + ' ...
[bar]');
legend('Rendimiento total [-]',...
'Ajuste (3th) de rendimiento
total','Location','Southeast');

```

```

annotation('textbox', [0.81, 0.12, 0.1, 0.1],
'String',...
"\eta_{total-med} = " +...

round(mean(rend_total(23:length(rend_total)))*100,2) +
"%");
xlim([0 1600]);

%Ordenar figuras en pantalla
autoArrangeFigures(4,4,1);

end
clc;

%% Guardado de datos del actual ensayo
if (input("¿Desea guardar los datos en un archivo
.mat? [1 si/2 no]:"...
== 1)
    save(convertCharsToStrings',...
        titulodocumento(1:length(titulodocumento)-5))
+ '.mat')
    clc; clear;
end

```

---

## 7. ANEXO 2: Código “comparadorensayos.m”

---

```
% El siguiente script carga los .mat que existan en la
% carpeta y realiza
% una gráfica comparativa de todos los ensayos
```

```
%NOTA:
```

```
% (No hay suficientes marcadores para la grafica de
% t-Tamb, Tentagua, Tsalagua. Para el resto si habría.
% Por lo tanto, comento dicha grafica si existen 5
% ensayos.
```

```
%Para 4 ensayos funciona perfectamente.
```

```
close all;
```

```
clear;
```

```
clc;
```

```
filesEnsayos = dir('*bar.mat');
```

```
%ensayos: Guarda todos los datos de todos los ensayos
%(cada ensayo es un
%struct)
```

```
for i=1:length(filesEnsayos)
```

```
    ensayos{i}=load(filesEnsayos(i).name); %Es poco
```

```
eficiente
```

```
end
```

```
%Marcadores de plot
```

```
marcadores = ["o", "+", "*", ".", "x", "s", "d",
"p", ...
"h", "^", "v", ">", "<"];
```

```
%Colores
```

```
colores = ["r", "g", "b", "c", "m", "y", "k",
"#0072BD", ...
"#EDB120", "#7E2F8E", "#77AC30", "#4DBEEE",
"#A2142F"];
```

```
%
```

---

```
% %Esta primera es una locura con los puntos, por lo
% que solo tendencias.
```

```
% %_____ 1.- Gráfica de tiempo-
(T1(Col4),T2(Col5),T3(Col6),T4(Col7))
```

```
% figure('Name','1.- Temperaturas
```

```
T1,T2,T3,T4','NumberTitle','off')
```

```
% for i=1:length(filesEnsayos)
```

```

%      hold on;
%      for j=4:7
%          switch j
%              case 4
%                  plot(ensayos{i}.xT,
% ensayos{i}.plotTs(j-3,:));
%              case 5
%                  plot(ensayos{i}.xT,
% ensayos{i}.plotTs(j-3,:));
%              case 6
%                  plot(ensayos{i}.xT,
% ensayos{i}.plotTs(j-3,:));
%              case 7
%                  plot(ensayos{i}.xT,
% ensayos{i}.plotTs(j-3,:));
%          end
%      end
% xlabel('Tiempo (t) [s]');
% ylabel('Temperatura (T) [°C]');
% xlim([0 1600]);

% figure('Name','2.- Temperatura ambiente, entrada y
salida agua',...
%       'NumberTitle','off');
% hold on;
% %_____ 2.-Gráfica de tiempo-
(Tamb(Col9),Tentagua(Col10),Tsalagua(Col11))
% legendsTs = string.empty;
% x = 1; %Para marcadores
% k = 1; %Para colores
% t = 1; %Para legends
% for i=1:length(filesEnsayos)
%     plotea(t) = plot(ensayos{i}.t,
str2double(ensayos{i}.datos_ensayo(:,9)),...
%                 'LineStyle', 'none',...
%                 'Marker', marcadores(x),...
%                 'Color', colores(k));
%     t = t+1;
%     plotea(t) = plot(ensayos{i}.t,
str2double(ensayos{i}.datos_ensayo(:,10)),...
%                 'LineStyle', 'none',...
%                 'Marker', marcadores(x+1),...
%                 'Color', colores(k+1));
%     t = t+1;

```

```

%     plotea(t) =
plot(ensayos{i}.t,str2double(ensayos{i}.datos_ensayo(:,11)),...
%         'LineStyle', 'none',...
%         'Marker', marcadores(x+2),...
%         'Color', colores(k+2));
%     t = t+1;
%     legendsTs = [legendsTs, ...
%         "T_{amb} {" +
convertCharsToStrings(filesEnsayos(i).name(17:18)) ...
%         + "bar" + " " ...
%         +
convertCharsToStrings(filesEnsayos(i).name(3:9)) + "
"...
%         +
convertCharsToStrings(filesEnsayos(i).name(11:15)) +") }
"];
%     legendsTs = [legendsTs, ...
%         "T_{ent H_2O} {" +
convertCharsToStrings(filesEnsayos(i).name(17:18)) ...
%         + "bar" + " " ...
%         +
convertCharsToStrings(filesEnsayos(i).name(3:9)) + "
"...
%         +
convertCharsToStrings(filesEnsayos(i).name(11:15)) +") }"];
%     legendsTs = [legendsTs, ...
%         "T_{sal H_2O} {" +
convertCharsToStrings(filesEnsayos(i).name(17:18)) ...
%         + "bar" + " " ...
%         +
convertCharsToStrings(filesEnsayos(i).name(3:9)) + "
"...
%         +
convertCharsToStrings(filesEnsayos(i).name(11:15)) +") }];
%
for j=9:11
    switch j
        case 9
            plot(ensayos{i}.xT,
ensayos{i}.plotTs2(j-7,:),...
%                 'Color', colores(k),...
%                 'MarkerIndices', 1:30:1000);
        case 10
            plot(ensayos{i}.xT,
ensayos{i}.plotTs2(j-7,:),...

```

```

%
%           'Color', colores(k+1),...
%           'MarkerIndices', 1:30:1000);
%
%       case 11
%           plot(ensayos{i}.xT,
% ensayos{i}.plotTs2(j-7,:),...
%           'Color', colores(k+2),...
%           'MarkerIndices', 1:30:1000);
%
%       end
%
%   end
%
%   x = x+3;
%
%   k = k+3;
%
% end
%
% xlabel('Tiempo (t) [s]');
% ylabel('Temperatura (T) [°C]');
% legend(plotea, legendsTs,'Location','Best');
% xlim([0 1600]);
%
% plotea = 0;

figure('Name','3.- Temperaturas foco caliente y foco
frio',...
    'NumberTitle','off');
hold on;
%
%_____ 3.- Gráfica de t-(Tfc(Col12),Tff(Col13))
legendsFcFf = string.empty;
x = 1; %Para marcadores
k = 1; %Para colores
t = 1; %Para legends
for i=1:length(filesEnsayos)
    plotea(t) =
plot(ensayos{i}.t,str2double(ensayos{i}.datos_ensayo(:,13)),...
    'LineStyle', 'none',...
    'Marker', marcadores(x), 'Color', colores(k));
    t=t+1;
    plotea(t) =
plot(ensayos{i}.t,str2double(ensayos{i}.datos_ensayo(:,12)),...
    'LineStyle', 'none',...
    'Marker', marcadores(x+1), 'Color',
colores(k+1));
    t=t+1;
    for j=12:13
        switch j
            case 12
                plot(ensayos{i}.xT(ensayos{i}.xT>ensayos{i}.t(7)),
ensayos{i}.plotTs3(j-11,:),...

```

```

        'Color', colores(k+1),...
        'MarkerIndices', 1:30:1000);
legendsFcFf = [legendsFcFf, ...
    "T_{fc} {" +
convertCharsToStrings(filesEnsayos(i).name(17:18)) ...
    + "bar" + " " ...
    +
convertCharsToStrings(filesEnsayos(i).name(3:9)) + "
"...
    +
convertCharsToStrings(filesEnsayos(i).name(11:15)) +
") }"];
case 13

plot(ensayos{i}.xT(ensayos{i}.xT>ensayos{i}.t(7)),
ensayos{i}.plotTs3(j-11,:),...
    'Color', colores(k),...
    'MarkerIndices', 1:30:1000);
legendsFcFf = [legendsFcFf, ...
    "T_{ff} {" +
convertCharsToStrings(filesEnsayos(i).name(17:18)) ...
    + "bar" + " " ...
    +
convertCharsToStrings(filesEnsayos(i).name(3:9)) + "
"...
    +
convertCharsToStrings(filesEnsayos(i).name(11:15)) +
") }"];
end
end
x = x+2;
k = k+2;
end
xlabel('Tiempo (t) [s]');
ylabel('Temperatura (T) [°C]');
legend(plotea, legendsFcFf, 'Location', 'Best');
xlim([0 1600]);
plotea = 0;

figure('Name','4.- Intensidades I1,I2 e
I3','NumberTitle','off');
hold on;
%_____ 4.- Gráfica de t-
(I1(Col18),I2(Col19),I3(Col20))
legendsI = string.empty;
k=1;
for i=1:length(filesEnsayos)

```

```

plot(ensayos{i}.t,str2double(ensayos{i}.datos_ensayo(:,18)),...
      "—" + marcadores(k),...

ensayos{i}.t,str2double(ensayos{i}.datos_ensayo(:,19))
, ...
      "—" + marcadores(k+1),...

ensayos{i}.t,str2double(ensayos{i}.datos_ensayo(:,20))
, ...
      "—" + marcadores(k+2));
k=k+1;
legendsI = [legendsI, ...
    "I_1 {" + convertCharsToStrings(filesEnsayos(i).name(17:18)) + "bar "... +
    convertCharsToStrings(filesEnsayos(i).name(3:9)) ...
    + " " +
    convertCharsToStrings(filesEnsayos(i).name(11:15)) + ") }", ...
    "I_2 {" + convertCharsToStrings(filesEnsayos(i).name(17:18)) ...
    + "bar " +
    convertCharsToStrings(filesEnsayos(i).name(3:9)) ...
    + " " +
    convertCharsToStrings(filesEnsayos(i).name(11:15)) + ") }", ...
    "I_3 {" + convertCharsToStrings(filesEnsayos(i).name(17:18)) ...
    + "bar " +
    convertCharsToStrings(filesEnsayos(i).name(3:9)) ...
    + " " +
    convertCharsToStrings(filesEnsayos(i).name(11:15)) + ") }];
end

ylim([15 30]);
xlabel('Tiempo [s]');
ylabel('Intensidad (I) [A]');
legend(legendsI,'Location','Best');

figure('Name','5.- Aire generado
[g]','NumberTitle','off');
hold on;
xlim([0 1600]);

```

```

% _____ 5.- Gráfica de t-airegenerado (Col22)
legendsAirGen = string.empty;
x = 1; %Para marcadores
k = 1; %Para colores
t = 1; %Para legends
for i=1:length(filesEnsayos)
    plotea(t) =
plot(ensayos{i}.t,str2double(ensayos{i}.datos_ensayo(:,22)),...
      'Marker', marcadores(x), 'LineStyle', 'none',
'Color', colores(k));
    plot(ensayos{i}.xT, ensayos{i}.plotAirgen, ...
          'Color', colores(k), 'MarkerIndices',
1:30:1000);
    k = k+1;
    x = x+1;
    t = t+1;
    legendsAirGen = [legendsAirGen, ...
      "m_{aire} [g] {" + ...
convertCharsToStrings(filesEnsayos(i).name(17:18)) ...
      + "bar" + " " ...
      +
convertCharsToStrings(filesEnsayos(i).name(3:9)) + " ...
" ...
      +
convertCharsToStrings(filesEnsayos(i).name(11:15)) + ...
") }"];
end
xlabel('Tiempo (t) [s]');
ylabel('Aire generado (m_{aire}) [g]');
legend(plotea, legendsAirGen,'Location','Best');
xlim([0 1600]);
plotea = 0;

figure('Name','6.- Caudal aire liquido
[g/s]', 'NumberTitle','off');
hold on;
% _____ 6.-Gráfica de t-CaudalAireLiq
legendsCaudalaire = string.empty;
x = 1; %Para marcadores
k = 1; %Para colores
t = 1; %Para legends
for i=1:length(filesEnsayos)
    plotea(t) = plot(ensayos{i}.t(:),
ensayos{i}.m_dot_aire(:)*1000, ...

```

```

'Marker', marcadores(x), 'LineStyle', 'none',
'Color', colores(k));

plot(ensayos{i}.xT(ensayos{i}.xT>ensayos{i}.t(15)), 
ensayos{i}.plotCaudalAireLiq*1000, ...
    'Color', colores(k), 'MarkerIndices',
1:30:1000);
    k = k+1;
    x = x+1;
    t = t+1;
    legendsCaudalaire = [legendsCaudalaire, ...
        "m_{aire} [g/s] {" + 
convertCharsToStrings(filesEnsayos(i).name(17:18)) +
...
        " bar" + " " ...
        +
convertCharsToStrings(filesEnsayos(i).name(3:9)) + "
"...
        +
convertCharsToStrings(filesEnsayos(i).name(11:15)) +
"}]};

end
xlabel('Tiempo (t) [s]', 'interpreter', 'latex');
ylabel('Caudal aire $\dot{m}_{aire}$ [g/s]', 'interpreter', 'latex');
ylim([0 2.5]);
legend(plotea, legendsCaudalaire, 'Location', 'Best');
xlim([0 1600]);
plotea = 0;

figure('Name', '7.- Potencia electrica
[kW]', 'NumberTitle', 'off');
hold on;
xlim([0 1600]);
%_____ 7.-Gráfica de t-potencia
legendsPotele = string.empty;
x = 1; %Para marcadores
k = 1; %Para colores
t = 1; %Para legends
for i=1:length(filesEnsayos)
    plotea(t) =
plot(ensayos{i}.t, ensayos{i}.potenciaelec, ...
    'Marker', marcadores(x), 'LineStyle', 'none',
'Color', colores(k));
    plot(ensayos{i}.xT(ensayos{i}.xT>ensayos{i}.t(7)), 
ensayos{i}.plotpot, ...

```

```

'Color', colores(k), 'MarkerIndices',
1:30:1000);
k=k+1;
t=t+1;
x=x+1;
legendsPotele = [legendsPotele, ...
    "P_{ele} [kW] {" +
convertCharsToStrings(filesEnsayos(i).name(17:18)) +
...
    " bar" + " " ...
+
convertCharsToStrings(filesEnsayos(i).name(3:9)) + "
"...
+
convertCharsToStrings(filesEnsayos(i).name(11:15)) +
"}"];
end
xlabel('Tiempo (t) [s]');
ylabel('Potencia (P_{ele}) [kW]');
legend(plotea, legendsPotele, 'Location', 'Best');
plotea = 0;

figure('Name','8.- Potencia de refrigeracion
[kW]', 'NumberTitle', 'off');
hold on;
xlim([0 1600]);
%_____ 8.- Gráfica de t-Potref
legendsPref = string.empty;
x = 1; %Para marcadores
k = 1; %Para colores
t = 1; %Para legends
for i=1:length(filesEnsayos)
    plotea(t) =
plot(ensayos{i}.t,ensayos{i}.Pot_ref, ...
    'Marker', marcadores(x), 'LineStyle', 'none',
'Color', colores(k));

plot(ensayos{i}.xT(ensayos{i}.xT>ensayos{i}.t(12)),ens
ayos{i}.plotQrefs, ...
    'Color', colores(k), 'MarkerIndices',
1:30:1000);
k=k+1;
t=t+1;
x=x+1;
legendsPref = [legendsPref, ...

```

```

    "P_{ref} [kW] {" +
convertCharsToStrings(filesEnsayos(i).name(17:18)) +
...
    " bar" + " " ...
+
convertCharsToStrings(filesEnsayos(i).name(3:9)) + "
"...
+
convertCharsToStrings(filesEnsayos(i).name(11:15)) +
"}]");
end

xlabel('Tiempo (t) [s]');
ylabel('Potencia de refrigeracion (P_{ref}) [kW]');
legend(plotea, legendsPref,'Location','Best');
xlim([0 1600]);
plotea = 0;

figure('Name','9.- Potencia aire
[kW]', 'NumberTitle', 'off');
hold on;
%_____ 9.-Gráfica de t-PotenciaAire
legendsPaire = string.empty;
x = 1; %Para marcadores
k = 1; %Para colores
t = 1; %Para legends
for i=1:length(filesEnsayos)
    plotea(t) =
plot(ensayos{i}.t,ensayos{i}.Pot_aire, ...
    'Marker', marcadores(x), 'LineStyle', 'none',
    'Color', colores(k));

plot(ensayos{i}.xT(ensayos{i}.xT>ensayos{i}.t(15)),ens
ayos{i}.plotQaire, ...
    'Color', colores(k), 'MarkerIndices',
1:30:1000);
    k=k+1;
    t=t+1;
    x=x+1;
    legendsPaire = [legendsPaire, ...
        "P_{aire} [kW] {" +
convertCharsToStrings(filesEnsayos(i).name(17:18)) +
...
        " bar" + " " ...
+
convertCharsToStrings(filesEnsayos(i).name(3:9)) + "
"...

```

```

+
convertCharsToStrings(filesEnsayos(i).name(11:15)) +
"}) }"];
end
xlabel('Tiempo (t) [s]');
ylabel('Potencia aire (P_{aire}) [kW]');
ylim([0 1]);
legend(plotea, legendsPaire, 'Location', 'Best');
xlim([0 1600]);
plotea = 0;

figure('Name','10.- Potencia perdidas
[kW]', 'NumberTitle', 'off');
hold on;
%_____ 10.- Gráfica Potencia Perdidas
legendsPotPerdidas = string.empty;
x = 1; %Para marcadores
k = 1; %Para colores
t = 1; %Para legends
for i=1:length(filesEnsayos)
    plotea(t) =
plot(ensayos{i}.t,ensayos{i}.Pot_perdidas, ...
    'Marker', marcadores(x), 'LineStyle', 'none',
    'Color', colores(k));
    plot(ensayos{i}.xT, ensayos{i}.plotQperdkw, ...
        'Color', colores(k), 'MarkerIndices',
        1:30:1000);
    k=k+1;
    t=t+1;
    x=x+1;
    legendsPotPerdidas = [legendsPotPerdidas, ...
        "P_{perdidas} [kW] _{(" +
convertCharsToStrings(filesEnsayos(i).name(17:18)) +
...
        " bar" + " " ...
        +
convertCharsToStrings(filesEnsayos(i).name(3:9)) + "
"...
        +
convertCharsToStrings(filesEnsayos(i).name(11:15)) +
"}) }"];
end
xlabel('Tiempo (t) [s]');
ylabel('Potencia perdidas P_{perdidas} [kW]');
legend(plotea, legendsPotPerdidas, 'Location', 'Best');
xlim([0 1600]);
plotea = 0;

```

```

figure('Name','11.- Rendimiento
frio','NumberTitle','off');
hold on;
%_____ 11.- Gráfica rendimiento frio
legendsRendFrio = string.empty;
x = 1; %Para marcadores
k = 1; %Para colores
t = 1; %Para legends
for i=1:length(filesEnsayos)
    plotea(t) =
plot(ensayos{i}.t,ensayos{i}.rend_frio, ...
      'Marker', marcadores(x), 'LineStyle', 'none',
'Color', colores(k));

plot(ensayos{i}.xT(ensayos{i}.xT>ensayos{i}.t(16)), 
ensayos{i}.plotrendf, ...
      'Color', colores(k), 'MarkerIndices',
1:30:1000);
    k=k+1;
    t=t+1;
    x=x+1;
    legendsRendFrio = [legendsRendFrio, ...
      "\eta_{frio} {" +
convertCharsToStrings(filesEnsayos(i).name(17:18)) +
...
      " bar" + " " ...
      +
convertCharsToStrings(filesEnsayos(i).name(3:9)) + "
...
      +
convertCharsToStrings(filesEnsayos(i).name(11:15)) +
"}) }];
end
xlabel('Tiempo (t) [s]');
ylabel('Rendimiento frio (\eta_{frio}) [-]');
ylim([0 0.06]);
xlim([0 1600]);
legend(plotea, legendsRendFrio,'Location','Best');
plotea = 0;

figure('Name','12.- Rendimiento
calor','NumberTitle','off');
hold on;
%_____ 12.- Gráfica Rendimiento calor
legendsRendCalor = string.empty;
x = 1; %Para marcadores

```

```

k = 1; %Para colores
t = 1; %Para legends
for i=1:length(filesEnsayos)
    plotea(t) =
plot(ensayos{i}.t,ensayos{i}.rend_calor, ...
      'Marker', marcadores(x), 'LineStyle', 'none',
      'Color', colores(k));

plot(ensayos{i}.xT(ensayos{i}.xT>ensayos{i}.t(12)), 
ensayos{i}.plotrendc, ...
      'Color', colores(k), 'MarkerIndices',
1:30:1000);
    k=k+1;
    t=t+1;
    x=x+1;
    legendsRendCalor = [legendsRendCalor, ...
      "\eta_{calor} \{ (" +
convertCharsToStrings(filesEnsayos(i).name(17:18)) +
...
      " bar" + " " ...
      +
convertCharsToStrings(filesEnsayos(i).name(3:9))+ "
"...
      +
convertCharsToStrings(filesEnsayos(i).name(11:15)) +
") }"];
end
xlabel('Tiempo (t) [s]');
ylabel('Rendimiento calor (\eta_{calor}) [-]');
ylim([0.5 1]);
xlim([0 1600]);
legend(plotea, legendsRendCalor, 'Location', 'Best');
plotea = 0;

figure('Name','13.- Rendimiento
total','NumberTitle','off');
hold on;
%_____ 13.- Gráfica Rendimiento total
legendsRendTotal = string.empty;
x = 1; %Para marcadores
k = 1; %Para colores
t = 1; %Para legends
for i=1:length(filesEnsayos)
    plotea(t) =
plot(ensayos{i}.t,ensayos{i}.rend_total, ...
      'Marker', marcadores(x), 'LineStyle', 'none',
      'Color', colores(k));

```

```

plot(ensayos{i}.xT(ensayos{i}.xT>ensayos{i}.t(12)),
ensayos{i}.plotrendtot,...,
    'Color', colores(k), 'MarkerIndices',
1:30:1000);
k=k+1;
t=t+1;
x=x+1;
legendsRendTotal = [legendsRendTotal, ...
    "\eta_{total} \{(" +
convertCharsToStrings(filesEnsayos(i).name(17:18)) +
...
    " bar" + " " ...
    +
convertCharsToStrings(filesEnsayos(i).name(3:9)) + "
"...
    +
convertCharsToStrings(filesEnsayos(i).name(11:15)) +
")\}"];
end
xlabel('Tiempo (t) [s]');
ylabel('Rendimiento total (\eta_{total}) [-]');
ylim([0.5 1]);
xlim([0 1600]);
legend(plotea, legendsRendTotal, 'Location', 'Best');
plotea = 0;

%Ordenar figuras en pantalla
autoArrangeFigures(4,4,1);

```

---

## 8. ANEXO 3: Gráficas

---

### 8.1. Ensayo 1: sin tapa de entrada de aire y 19 bares de presión de trabajo.

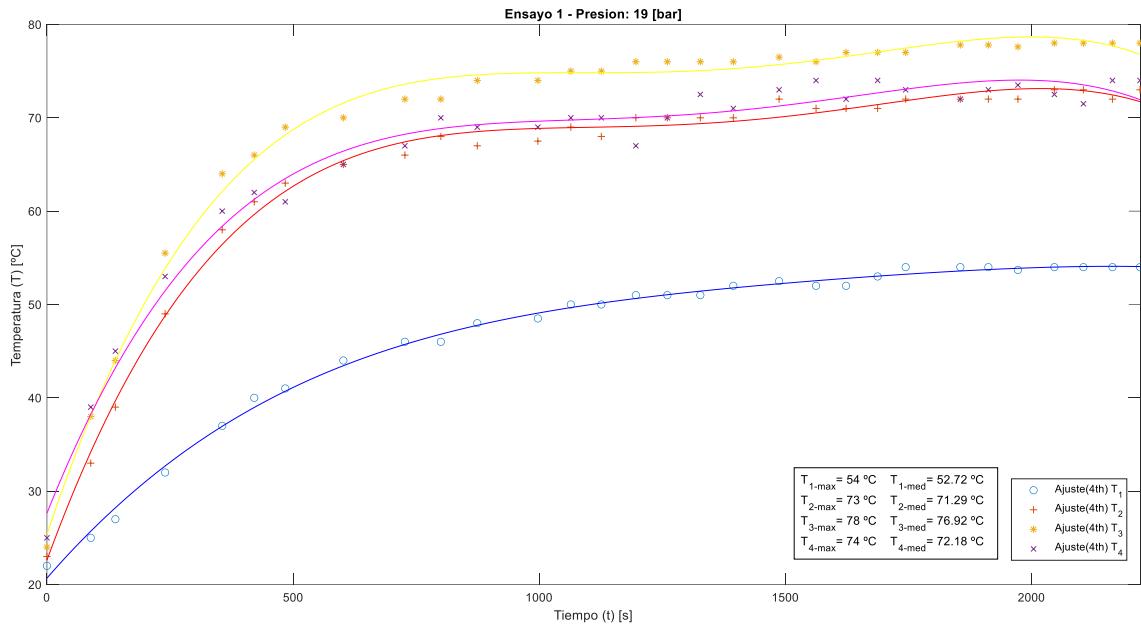


Figura 86. Gráfica de  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_3$  y  $T_4$  en función del tiempo del ensayo a  $P_{\text{trab}} = 19$  [bar] y sin tapa de entrada de.  $T_{\text{a}_{\text{ent,agua\_media}}} = 24.3^\circ\text{C}$ .

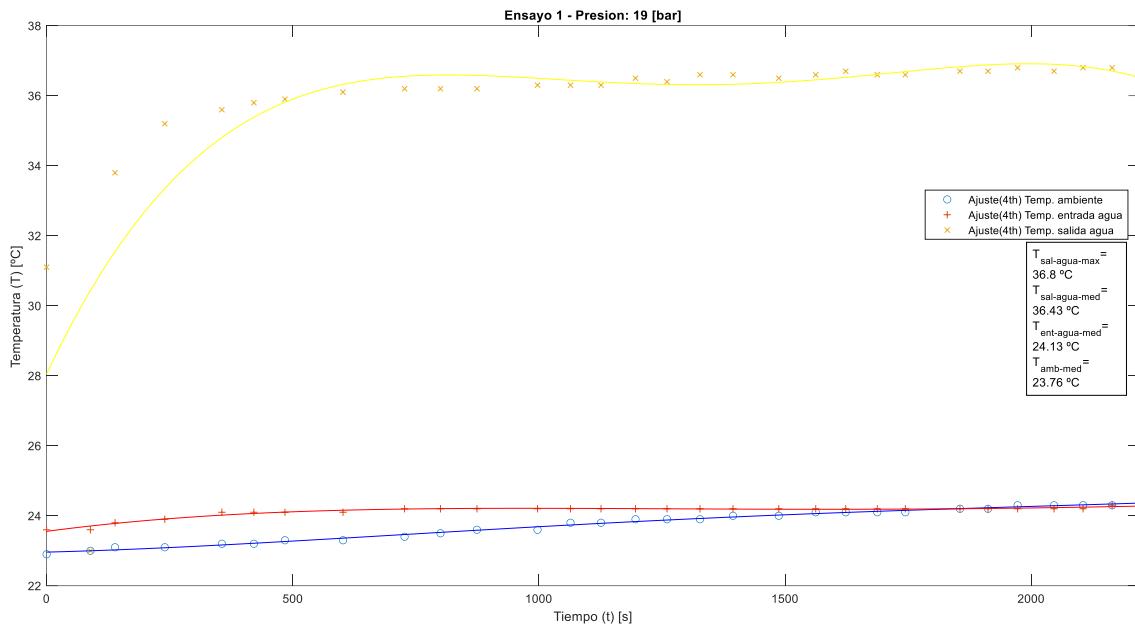


Figura 87. Gráfica de  $T_{\text{sal,agua}}$ ,  $T_{\text{ent,agua}}$ , y  $T_{\text{amb}}$  en función del tiempo. Ensayo a  $P_{\text{trab}} = 24.3$  [bar] y sin tapa de entrada de aire.

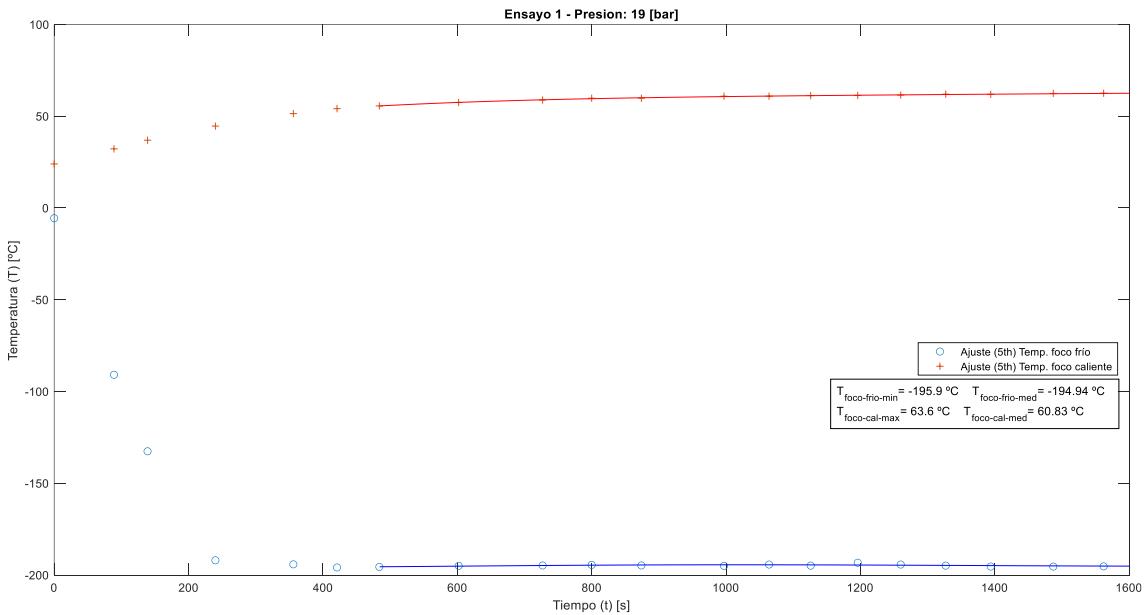


Figura 88. Gráfica de  $T_{ff}$  y  $T_{fc}$  en función del tiempo. Ensayo a  $P_{\text{trab}} = 19$  [bar] y sin tapa de entrada de aire.  $T_{\text{ent,agua media}}^{\text{a}} = 24.3^{\circ}\text{C}$ .

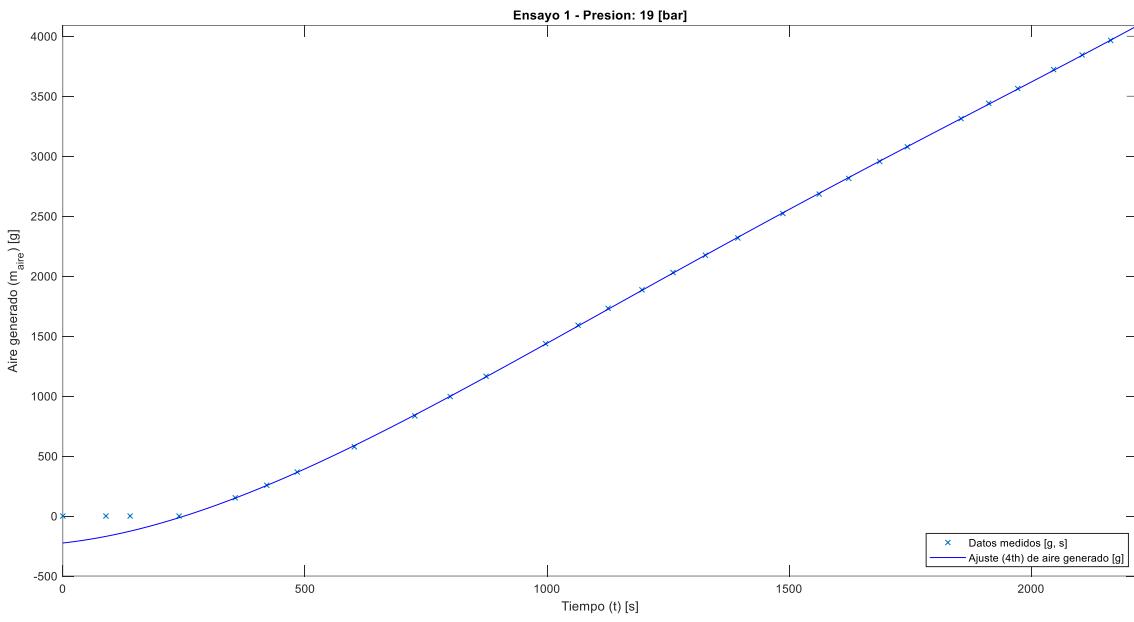


Figura 89. Gráfica de producción de aire líquido en función del tiempo. Ensayo a  $P_{trab} = 19$  [bar] y sin tapa de entrada de aire.  $T_{ent,agua\_media}^a = 24.3^\circ\text{C}$ .

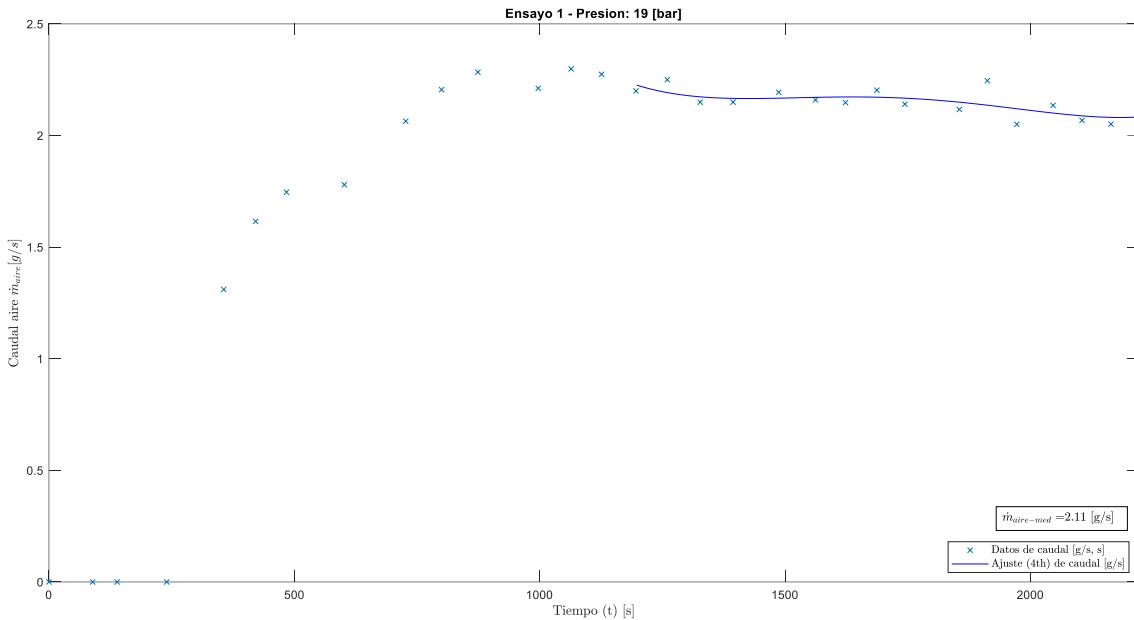


Figura 90. Gráfica de caudal de aire líquido generado en función del tiempo. Ensayo a  $P_{trab} = 19$  [bar] y sin tapa de entrada de aire.  $T_{ent,agua\_media}^a = 24.3^\circ\text{C}$ .

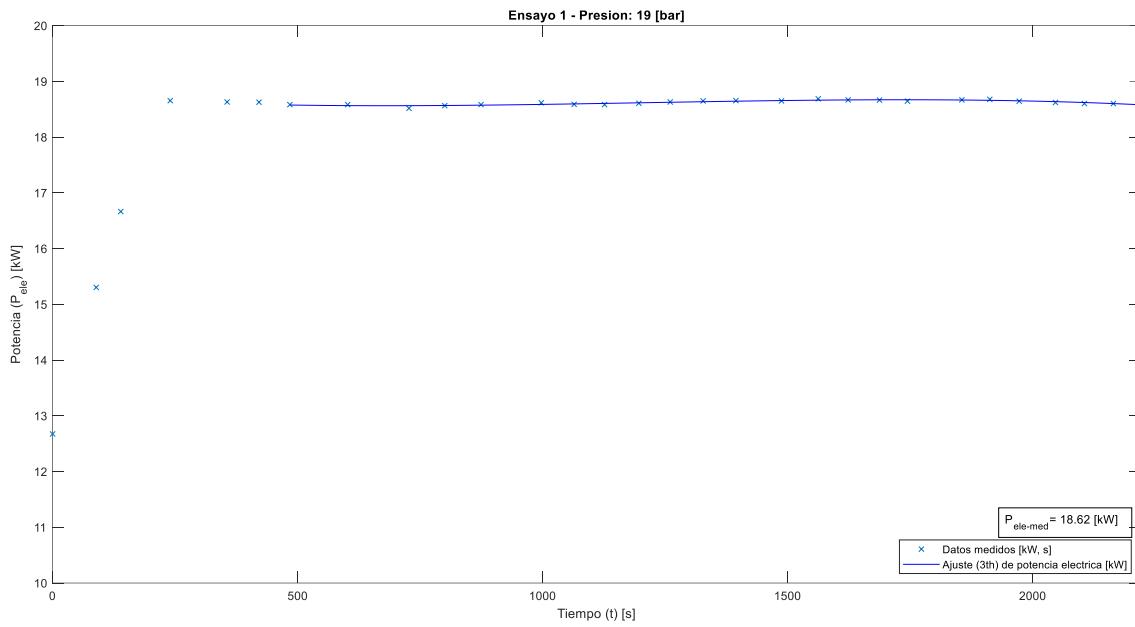


Figura 91. Gráfica de potencia eléctrica consumida en función del tiempo. Ensayo a  $P_{trab} = 19$  [bar]

y sin tapa de entrada de aire.  $T^a_{ent,agua\_media} = 24.3^\circ\text{C}$ .

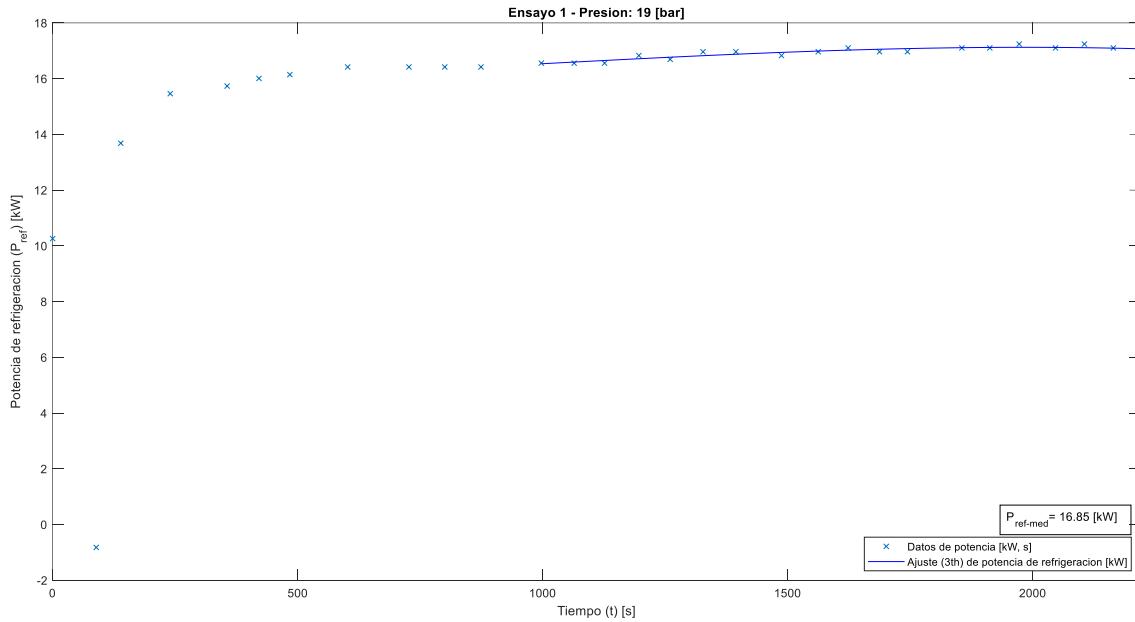


Figura 92. Gráfica de potencia de refrigeración en función del tiempo. Ensayo a  $P_{trab} = 19$  [bar] y sin

tapa de entrada de aire.  $T^a_{ent,agua\_media} = 24.3^\circ\text{C}$ .

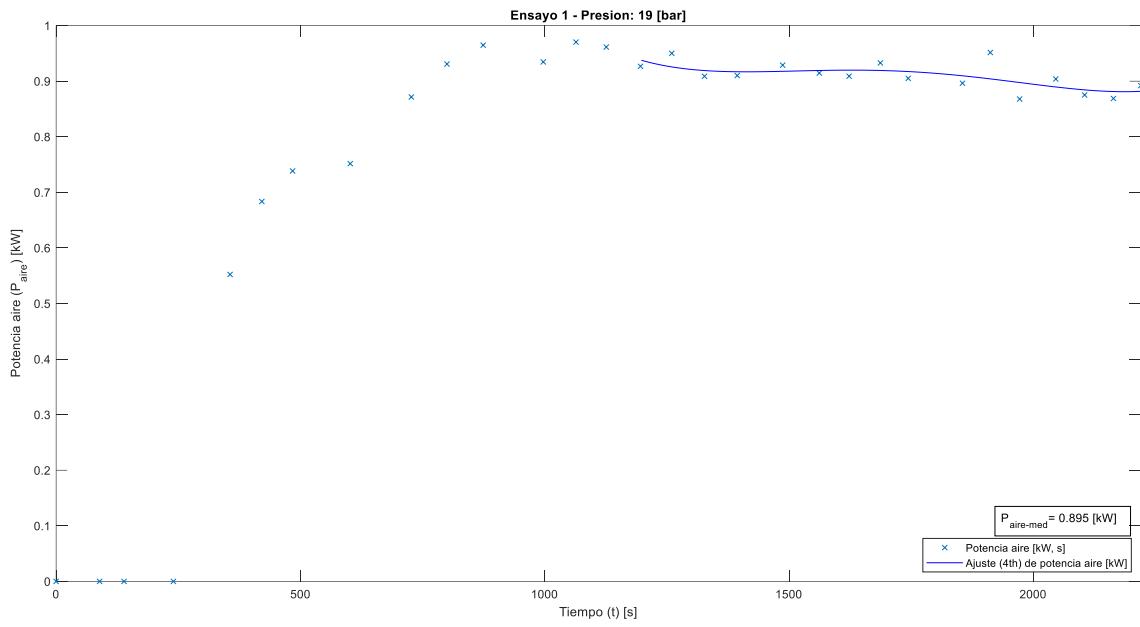


Figura 93. Gráfica de potencia extraída al aire en función del tiempo. Ensayo a  $P_{trab} = 19$  [bar] y sin tapa de entrada de aire  $T_{ent,agua\_media}^a = 24.3^\circ\text{C}$ .

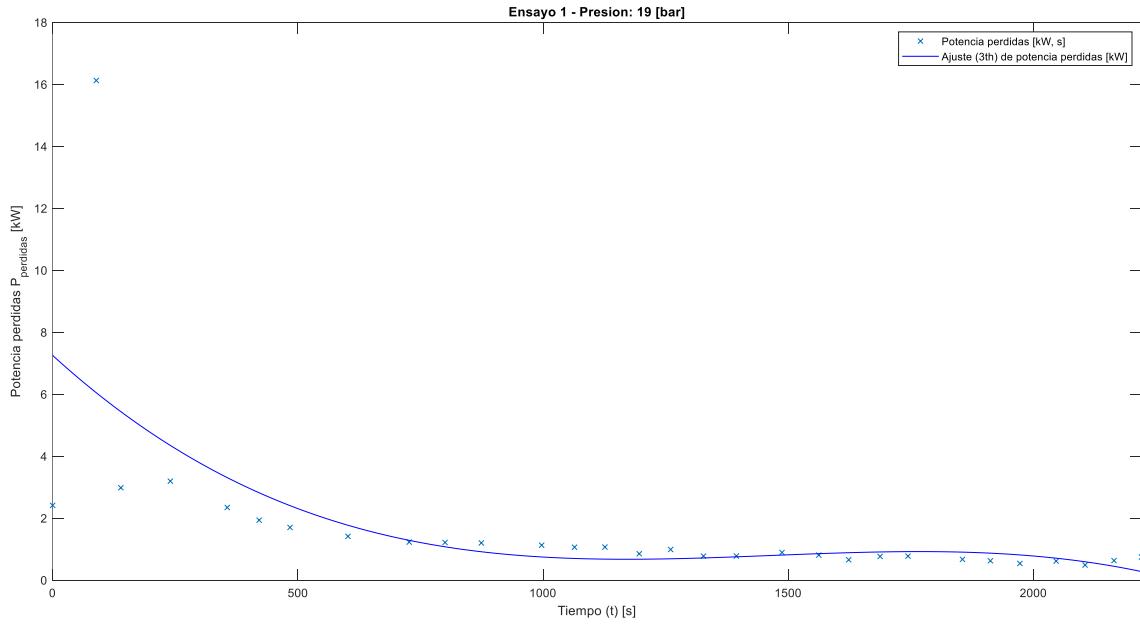


Figura 94. Gráfica de potencia de pérdidas en función del tiempo. Ensayo a  $P_{trab} = 19$  [bar] y sin tapa de entrada de aire.  $T_{ent,agua\_media}^a = 24.3^\circ\text{C}$ .

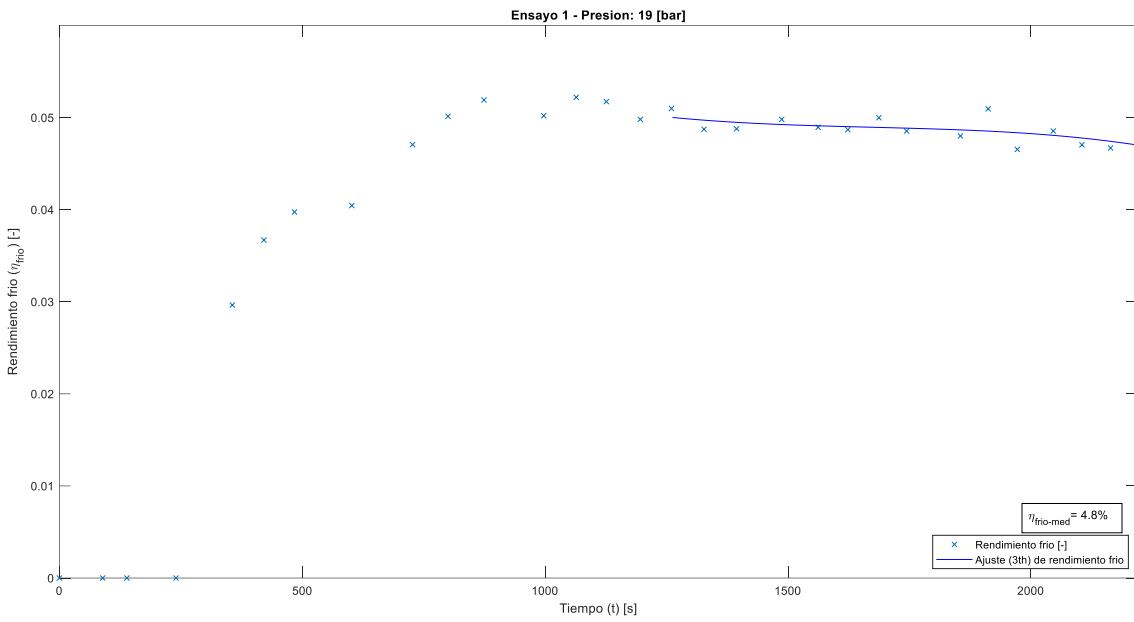


Figura 95. Gráfica de rendimiento frío en función del tiempo. Ensayo a  $P_{trab} = 19$  [bar] y sin tapa de entrada de aire.  $T_{ent,agua\_media}^a = 24.3^\circ\text{C}$ .

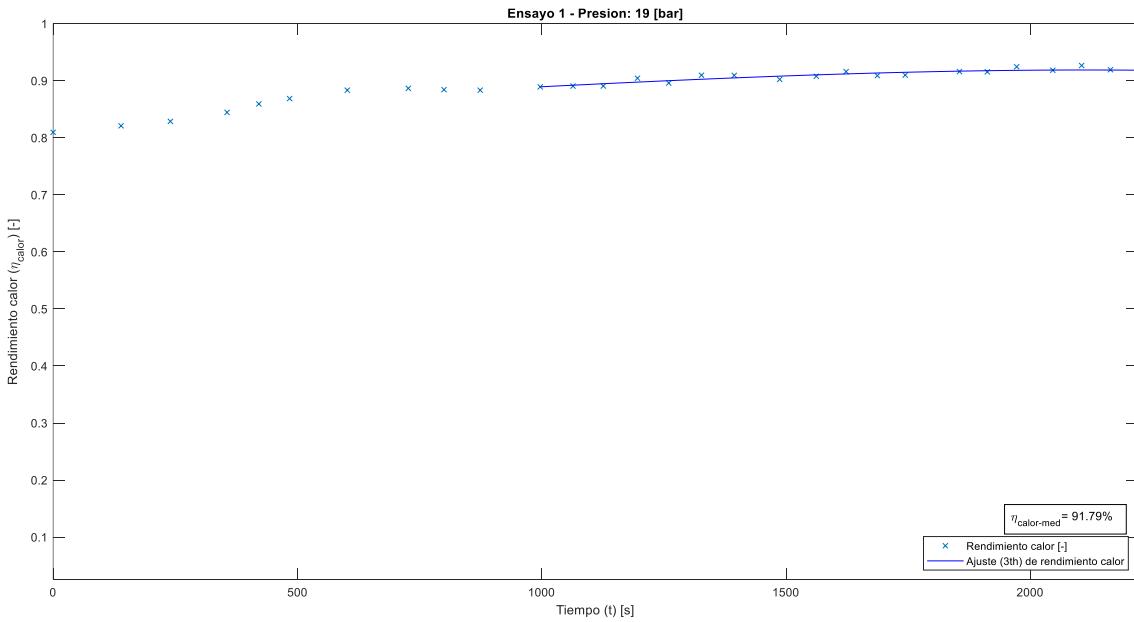


Figura 96. Gráfica de rendimiento calorífico en función del tiempo. Ensayo a  $P_{trab} = 19$  [bar] y sin tapa de entrada de aire.  $T_{ent,agua\_media}^a = 24.3^\circ\text{C}$ .

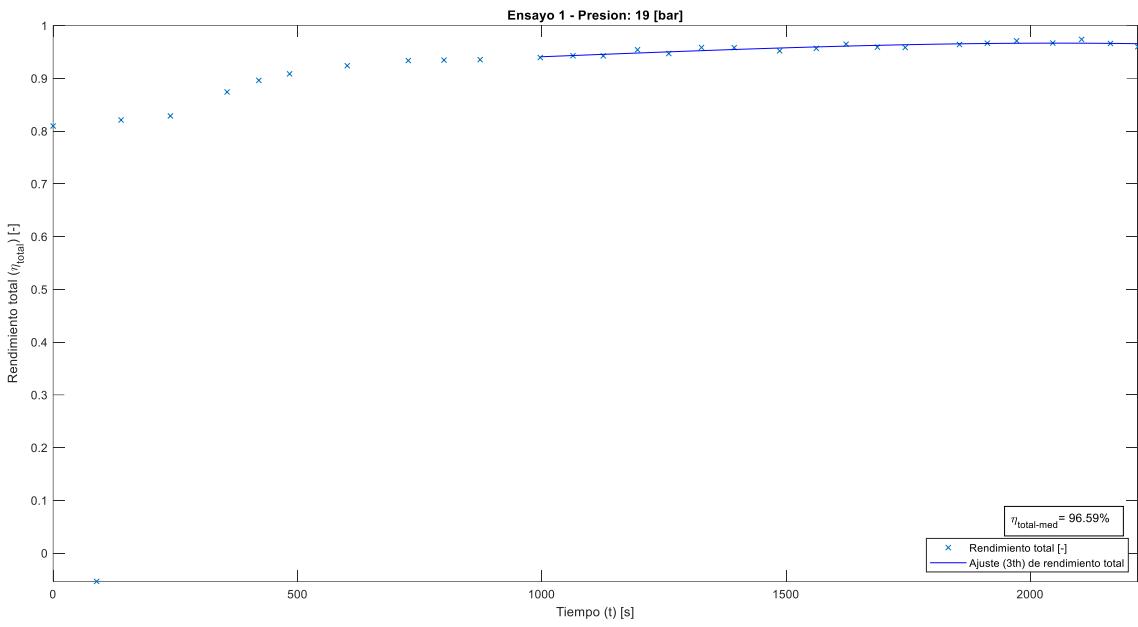


Figura 97. Gráfica de rendimiento total en función del tiempo. Ensayo a  $P_{trab} = 19$  [bar] y sin tapa de entrada de aire.  $T_{ent,agua\_media}^a = 24.3^\circ\text{C}$ .

## 8.2. Ensayo 2: con tapa de entrada de aire y 19 bares de presión de trabajo.

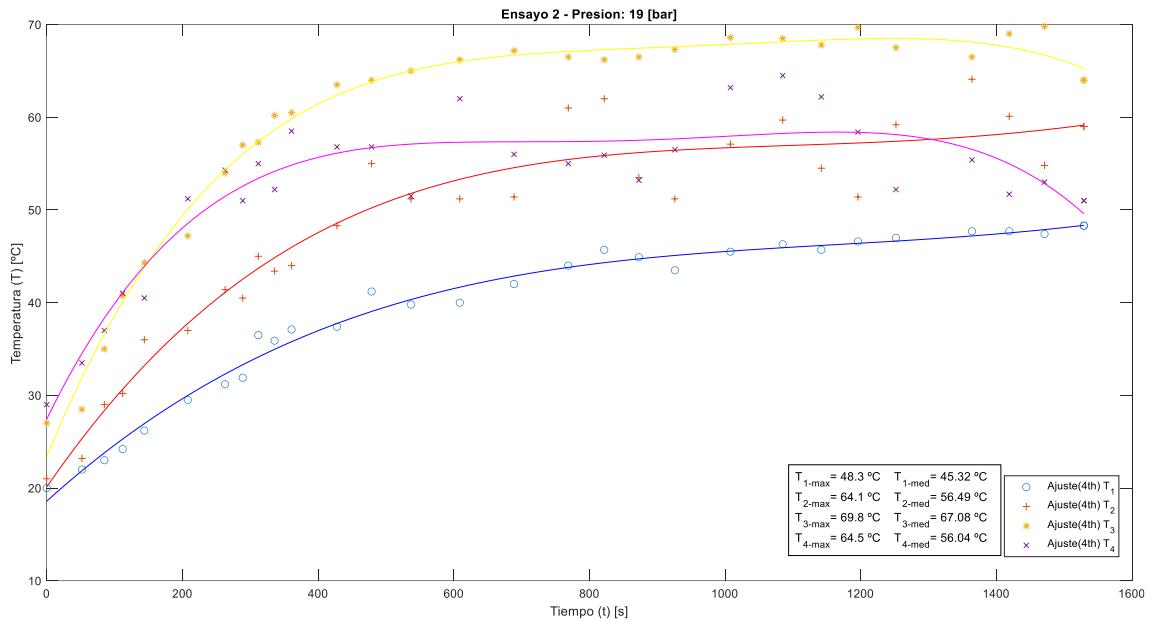


Figura 98. Gráfica de  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_3$  y  $T_4$  en función del tiempo del ensayo a  $P_{\text{trab}} = 19$  [bar] y con tapa de entrada de  $T_{\text{ent,agua\_media}}^{\text{a}} = 24.3^\circ\text{C}$ .

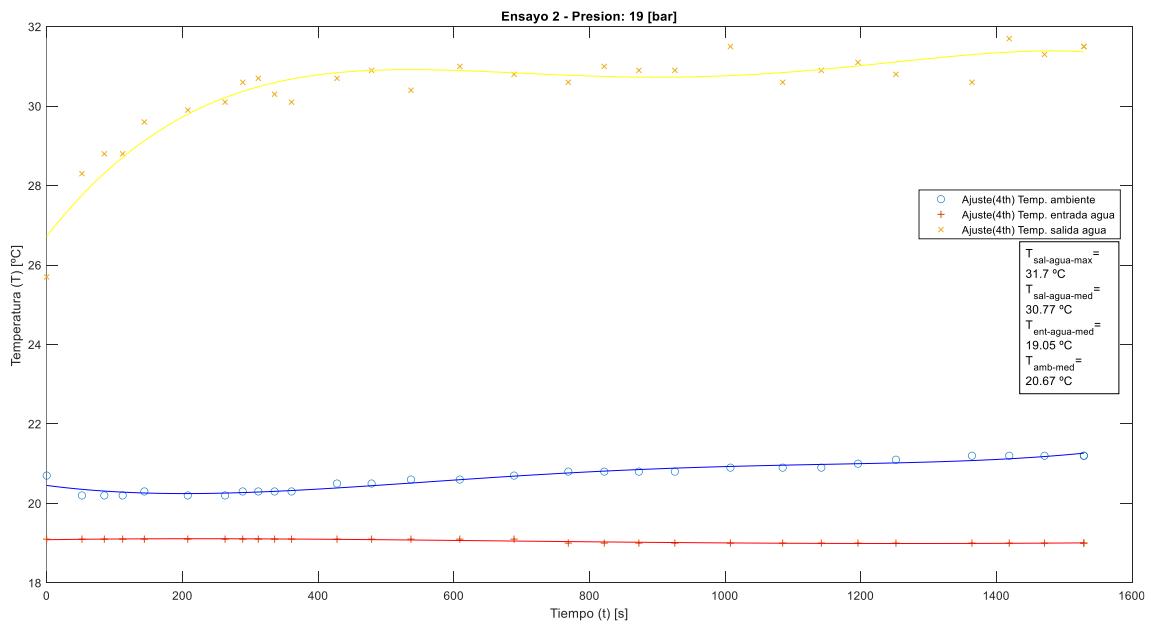


Figura 99. Gráfica de  $T_{\text{sal,agua}}$ ,  $T_{\text{ent,agua}}$ , y  $T_{\text{amb}}$  en función del tiempo. Ensayo a  $P_{\text{trab}} = 19$  [bar] y con tapa de entrada de aire.

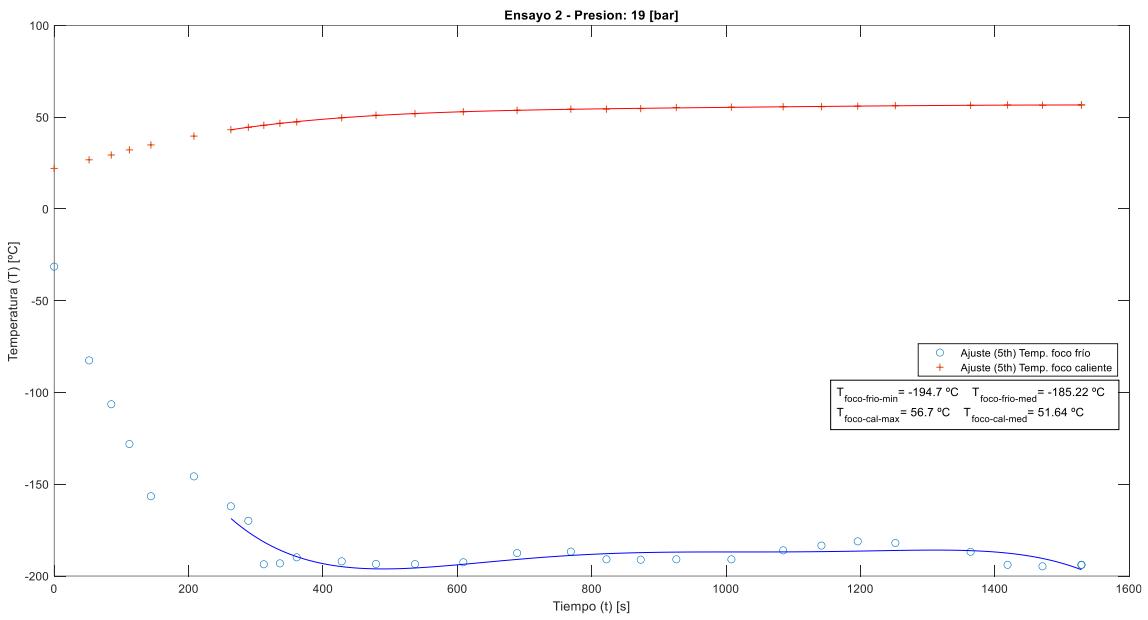


Figura 100. Gráfica de  $T_{ff}$  y  $T_{fc}$  en función del tiempo. Ensayo a  $P_{trab} = 19$  [bar] y con tapa de entrada de aire.  $T^a_{ent,agua_{media}} = 19^\circ\text{C}$ .

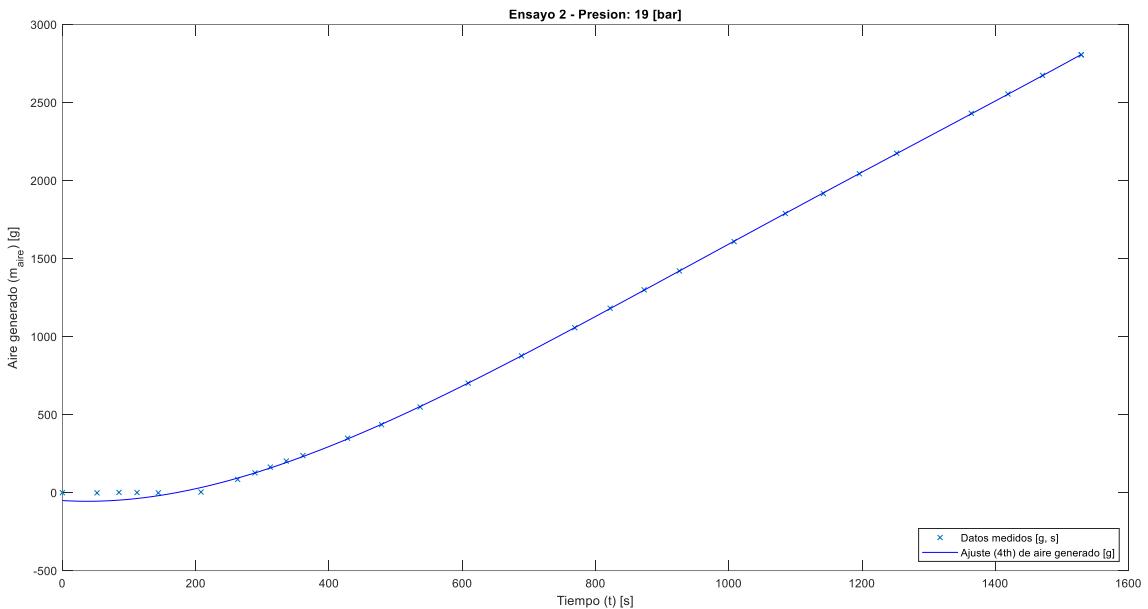


Figura 101. Gráfica de producción de aire líquido en función del tiempo. Ensayo a  $P_{trab} = 19$  [bar] y con tapa de entrada de aire.  $T^a_{ent,agua_{media}} = 19^\circ\text{C}$ .

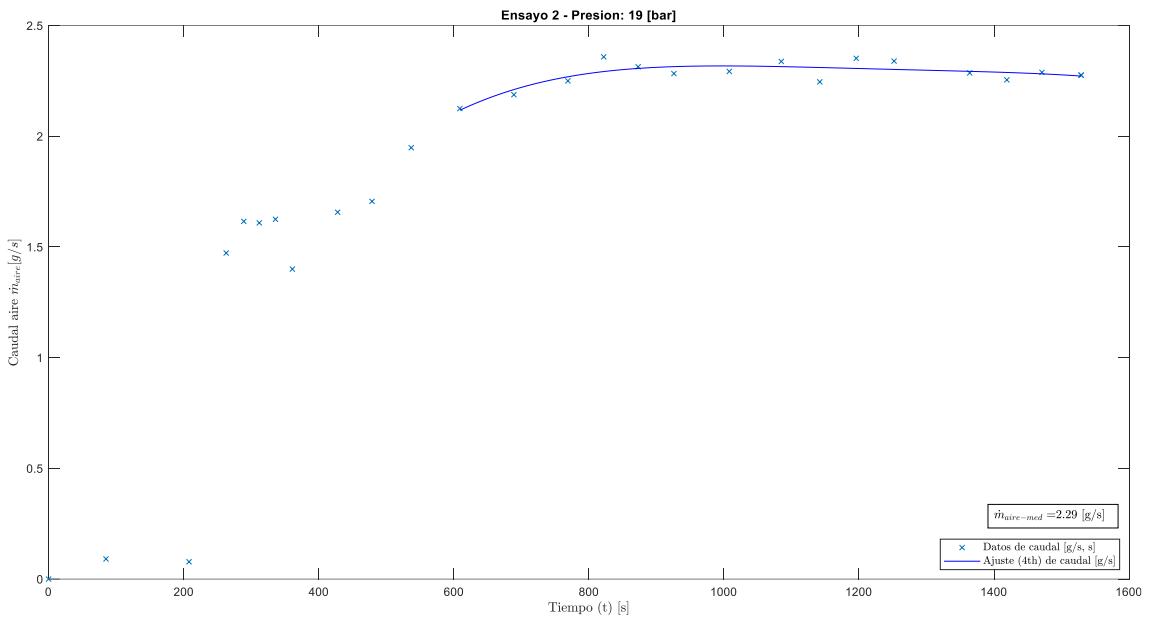


Figura 102. Gráfica de caudal de aire líquido generado en función del tiempo. Ensayo a  $P_{trab} = 19$  [bar] y con tapa de entrada de aire.  $T_{ent,agua\_media}^a = 19^\circ\text{C}$ .

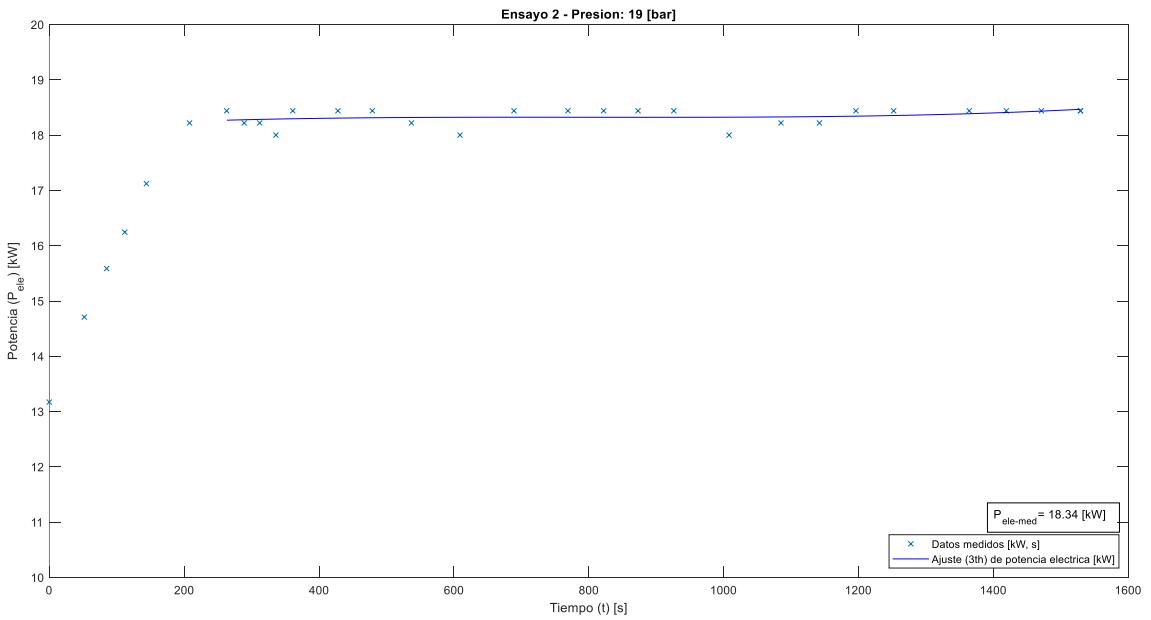


Figura 103. Gráfica de potencia eléctrica consumida en función del tiempo. Ensayo a  $P_{trab} = 19$  [bar] y con tapa de entrada de aire.  $T_{ent,agua\_media}^a = 19^\circ\text{C}$ .

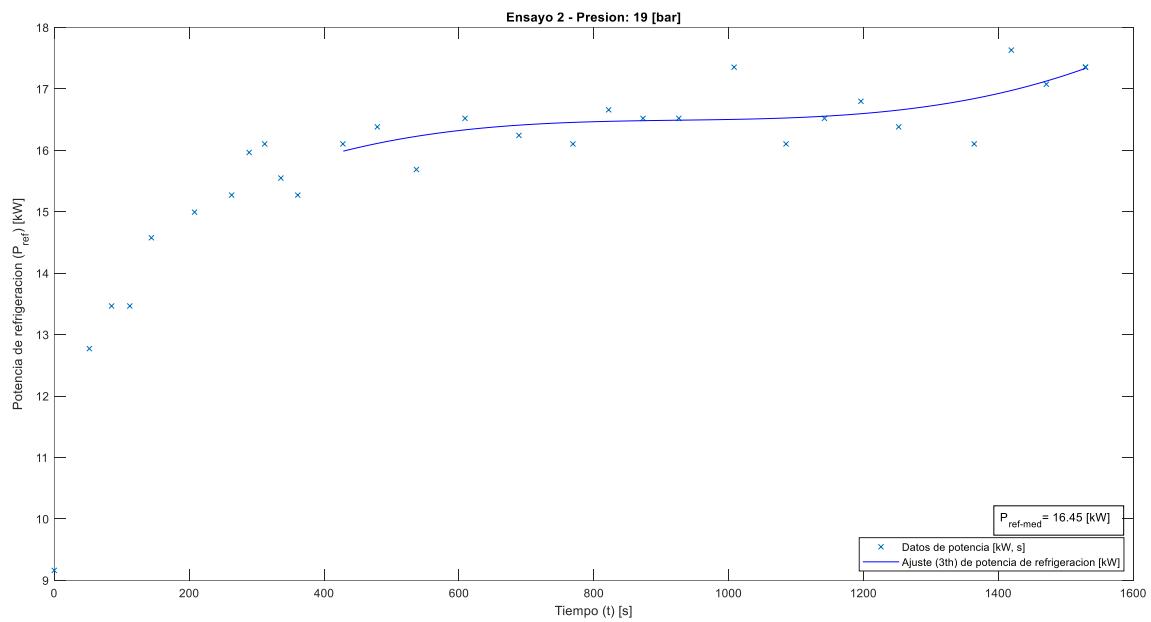


Figura 104. Gráfica de potencia de refrigeración en función del tiempo. Ensayo a  $P_{trab} = 19 \text{ [bar]}$  y con tapa de entrada de aire.  $T_{ent,agua\_media}^a = 19^\circ\text{C}$ .

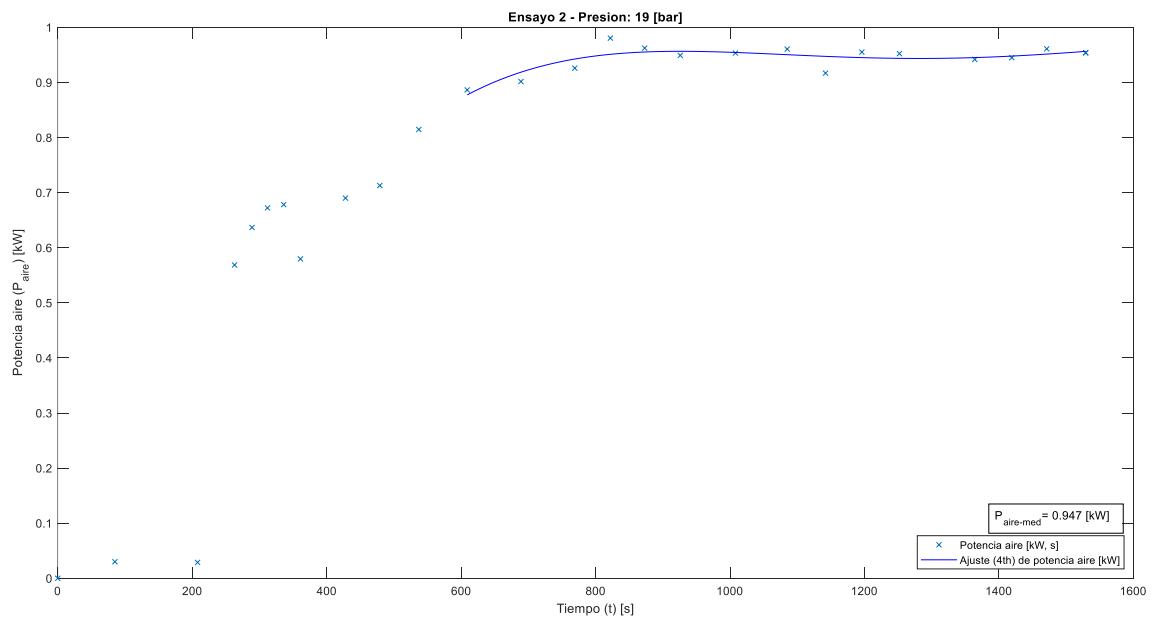


Figura 105. Gráfica de potencia extraída al aire en función del tiempo. Ensayo a  $P_{trab} = 19 \text{ [bar]}$  y con tapa de entrada de aire  $T_{ent,agua\_media}^a = 19^\circ\text{C}$ .

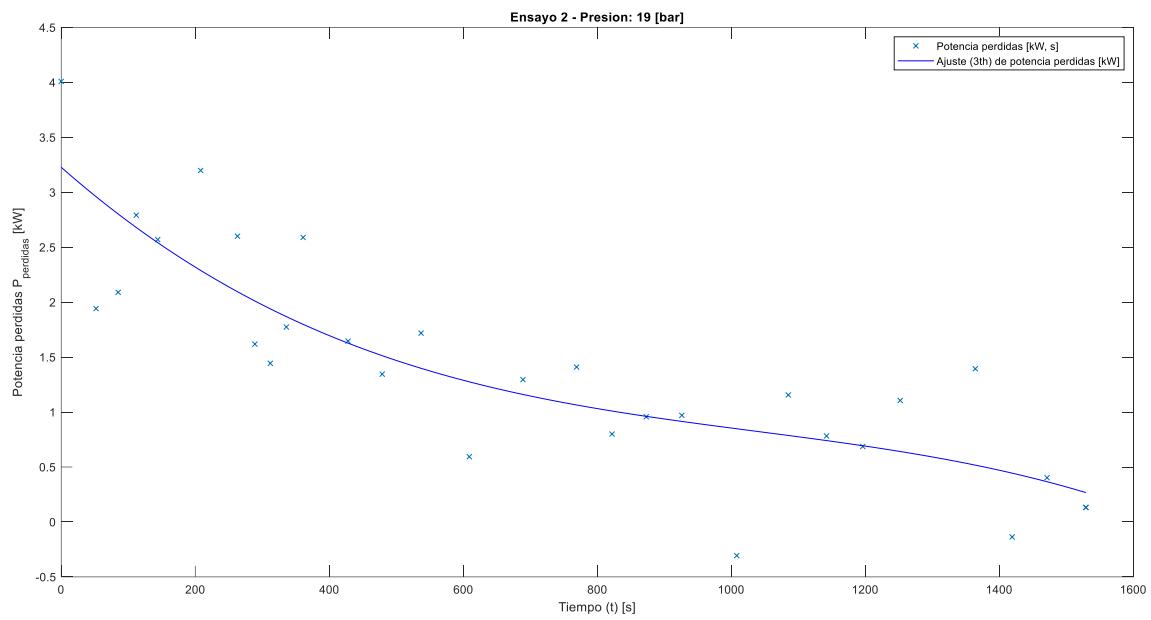


Figura 106. Gráfica de potencia de pérdidas en función del tiempo. Ensayo a  $P_{trab} = 19$  [bar] y con tapa de entrada de aire.  $T^a_{ent,agua\_media} = 19^\circ\text{C}$ .

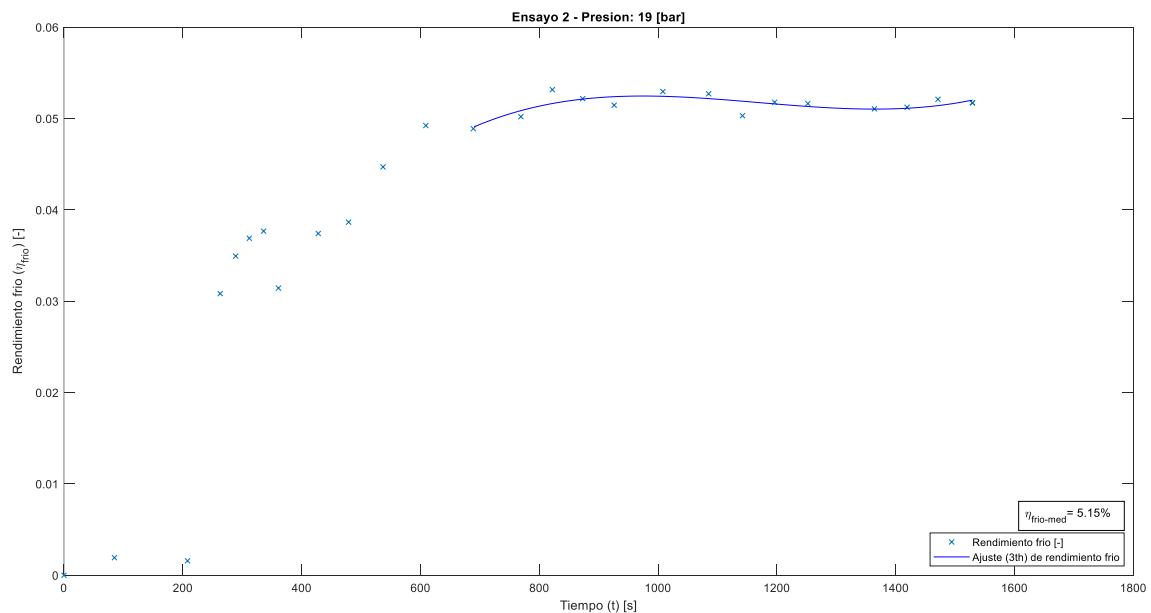


Figura 107. Gráfica de rendimiento frío en función del tiempo. Ensayo a  $P_{trab} = 19$  [bar] y con tapa de entrada de aire.  $T^a_{ent,agua\_media} = 19^\circ\text{C}$ .

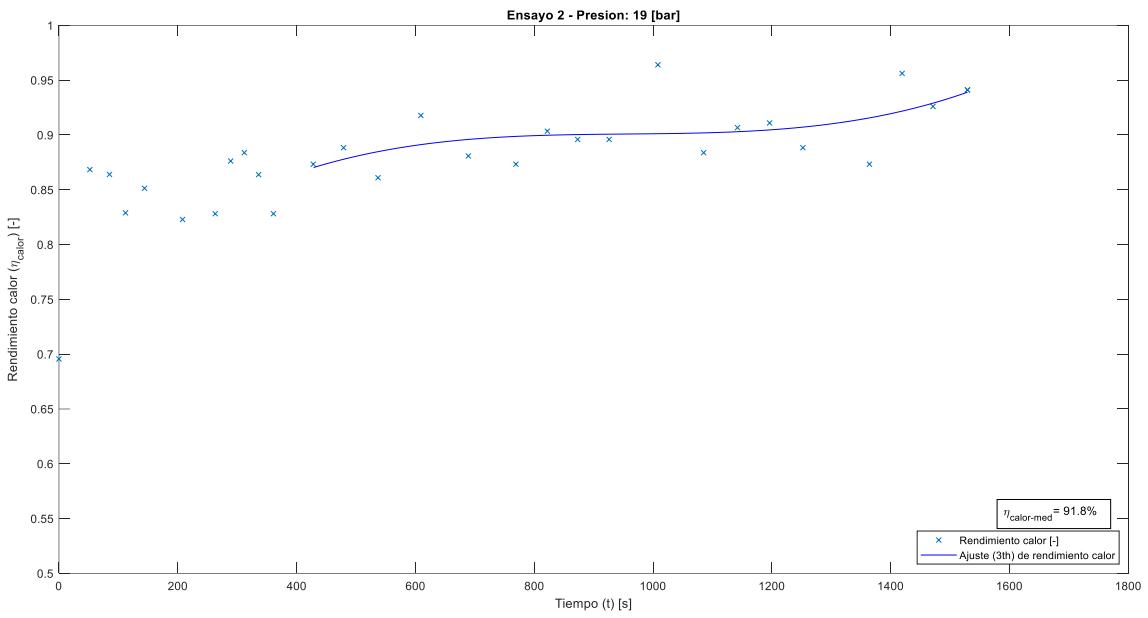


Figura 108. Gráfica de rendimiento calorífico en función del tiempo. Ensayo a  $P_{trab} = 19$  [bar] y con tapa de entrada de aire.  $T_{ent,agua\_media}^a = 19^\circ\text{C}$ .

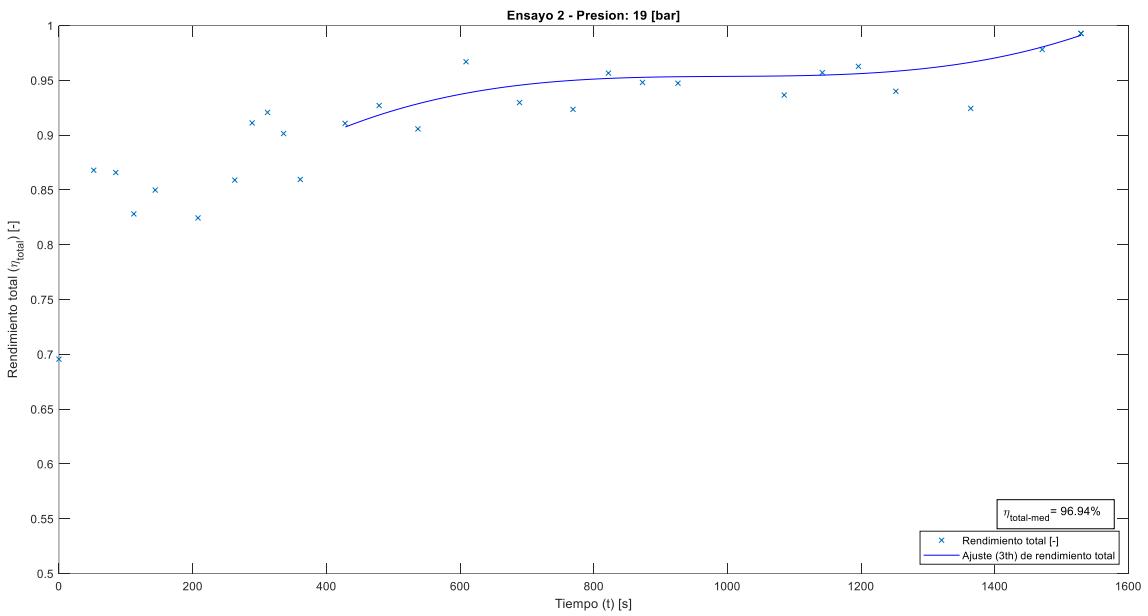


Figura 109. Gráfica de rendimiento total en función del tiempo. Ensayo a  $P_{trab} = 19$  [bar] y con tapa de entrada de aire.  $T_{ent,agua\_media}^a = 19^\circ\text{C}$ .

### 8.3. Ensayo 3: con tapa de entrada de aire y 18 bares de presión de trabajo.

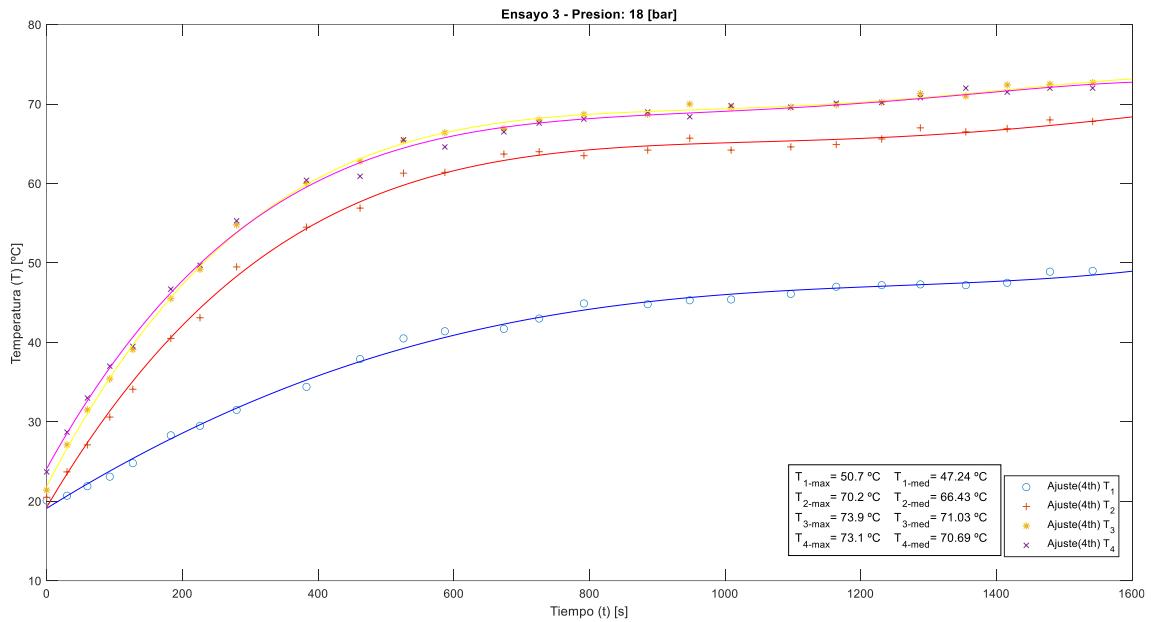


Figura 110. Gráfica de  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_3$  y  $T_4$  en función del tiempo del ensayo a  $P_{\text{trab}} = 18$  [bar], con tapa de entrada de aire.  $T_{\text{ent,agua\_media}}^{\text{a}} = 19.2^\circ\text{C}$ .

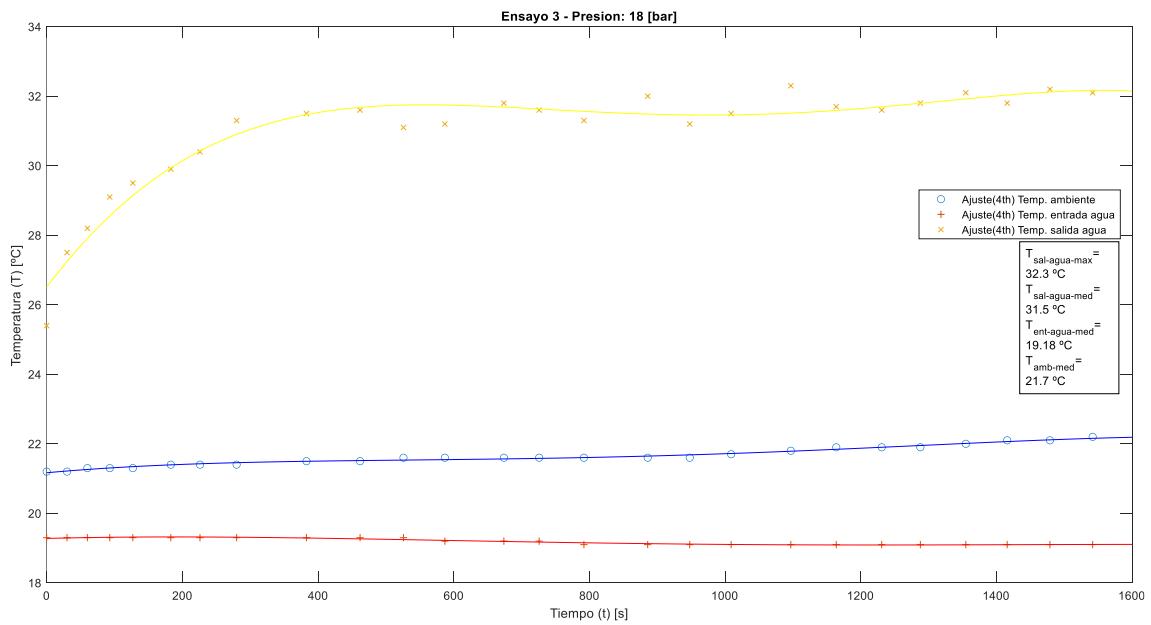


Figura 111. Gráfica de  $T_{\text{sal,agua}}$ ,  $T_{\text{ent,agua}}$ , y  $T_{\text{amb}}$  en función del tiempo. Ensayo a  $P_{\text{trab}} = 18$  [bar], con tapa de entrada de aire.

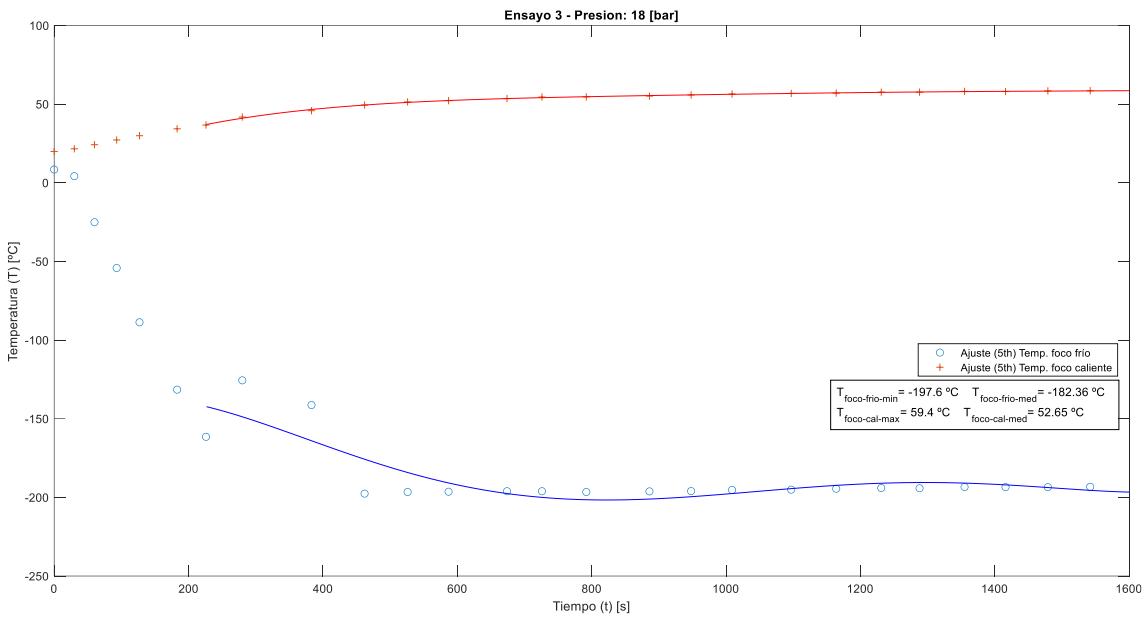


Figura 112. Gráfica de  $T_{ff}$  y  $T_{fc}$  en función del tiempo. Ensayo a  $P_{trab} = 18$  [bar], con tapa de entrada de aire.  $T_{ent,agua\_media}^a = 19.2^\circ\text{C}$ .

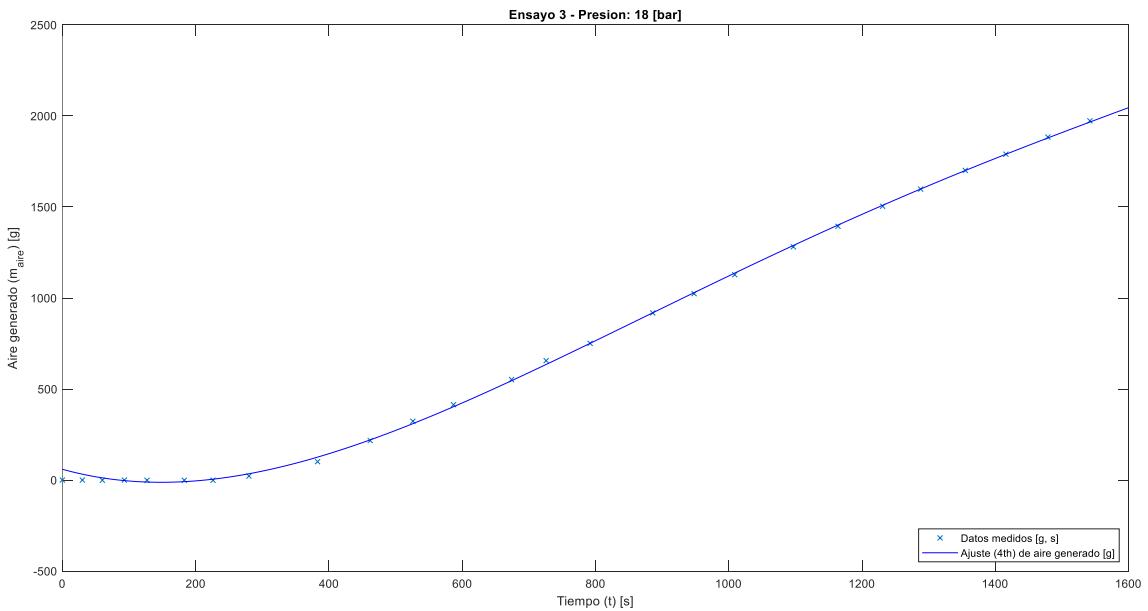


Figura 113. Gráfica de producción de aire líquido en función del tiempo. Ensayo a  $P_{trab} = 18$  [bar], con tapa de entrada de aire.  $T_{ent,agua\_media}^a = 19.2^\circ\text{C}$ .

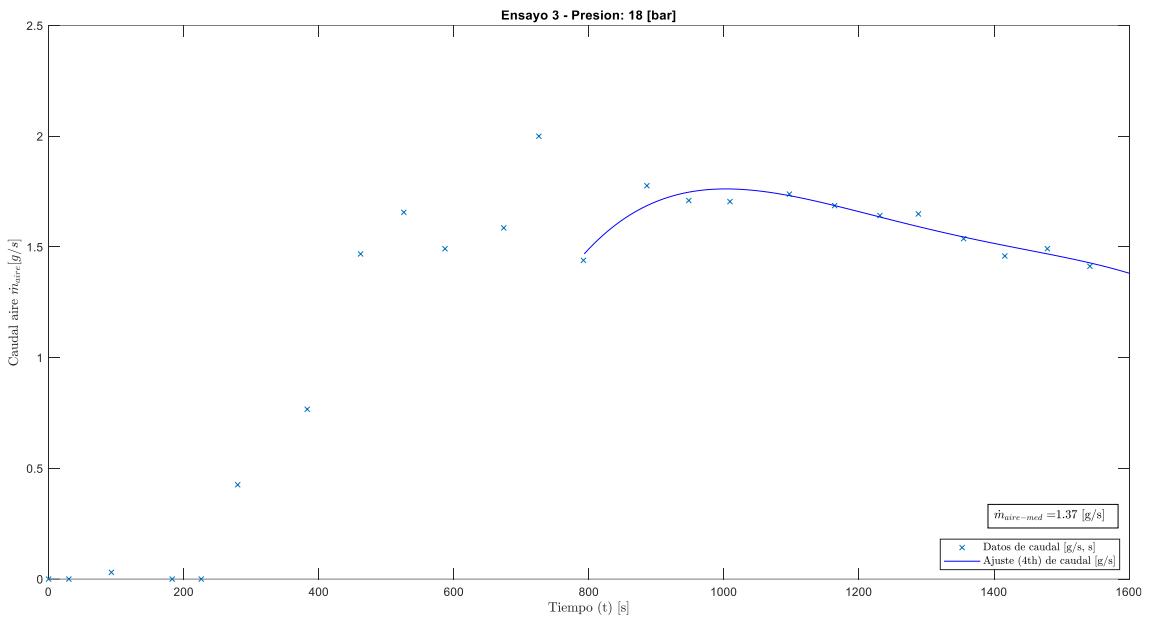


Figura 114. Gráfica de caudal de aire líquido generado en función del tiempo. Ensayo a  $P_{trab} = 18$  [bar], con tapa de entrada de aire.  $T_{ent,agua\_media}^a = 19.2^\circ\text{C}$ .

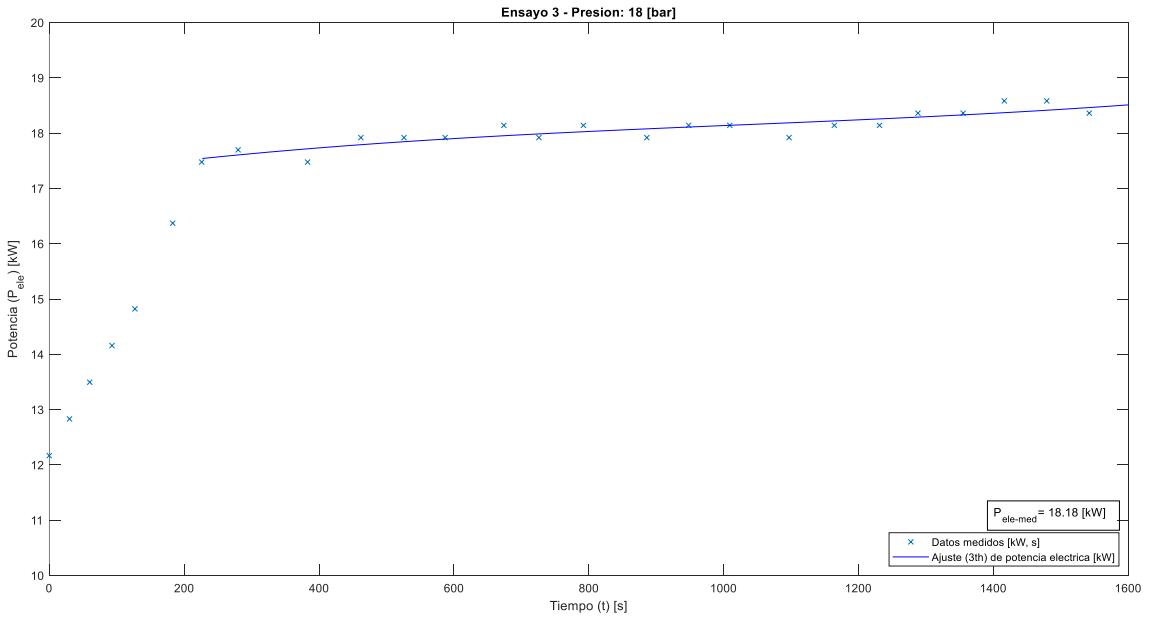


Figura 115. Gráfica de potencia eléctrica consumida en función del tiempo. Ensayo a  $P_{trab} = 18$  [bar], con tapa de entrada de aire.  $T_{ent,agua\_media}^a = 19.2^\circ\text{C}$ .

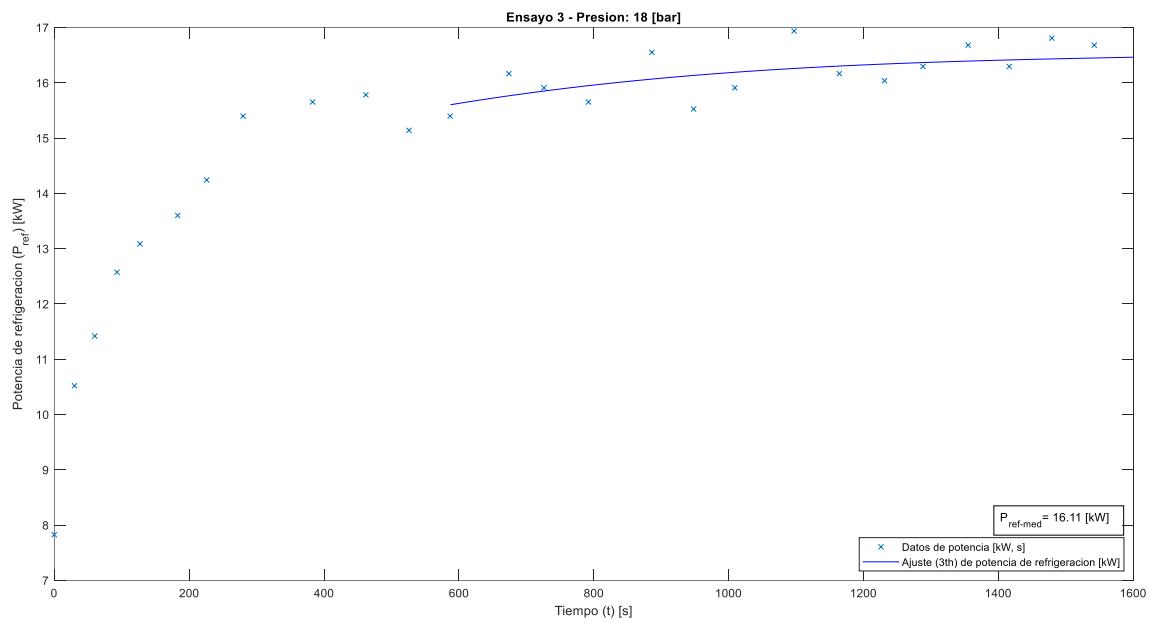


Figura 116. Gráfica de potencia de refrigeración en función del tiempo. Ensayo a  $P_{trab} = 18$  [bar], con tapa de entrada de aire.  $T_{ent,agua\_media}^a = 19.2^\circ\text{C}$ .

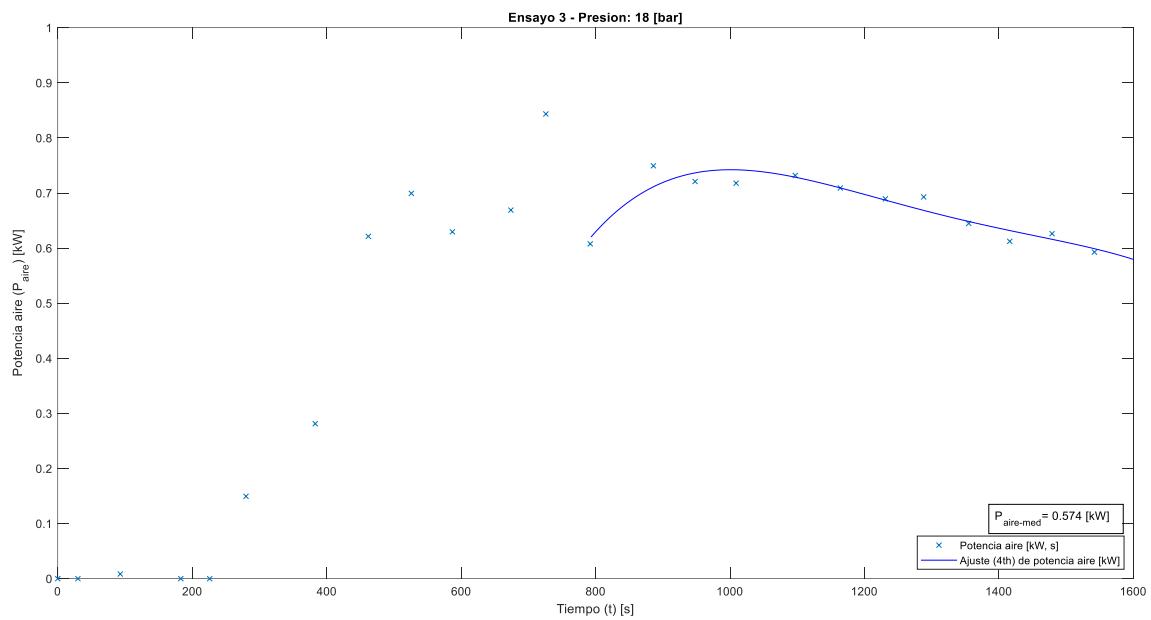


Figura 117. Gráfica de potencia extraída al aire en función del tiempo. Ensayo a  $P_{trab} = 18$  [bar], con tapa de entrada de aire.  $T_{ent,agua\_media}^a = 19.2^\circ\text{C}$ .

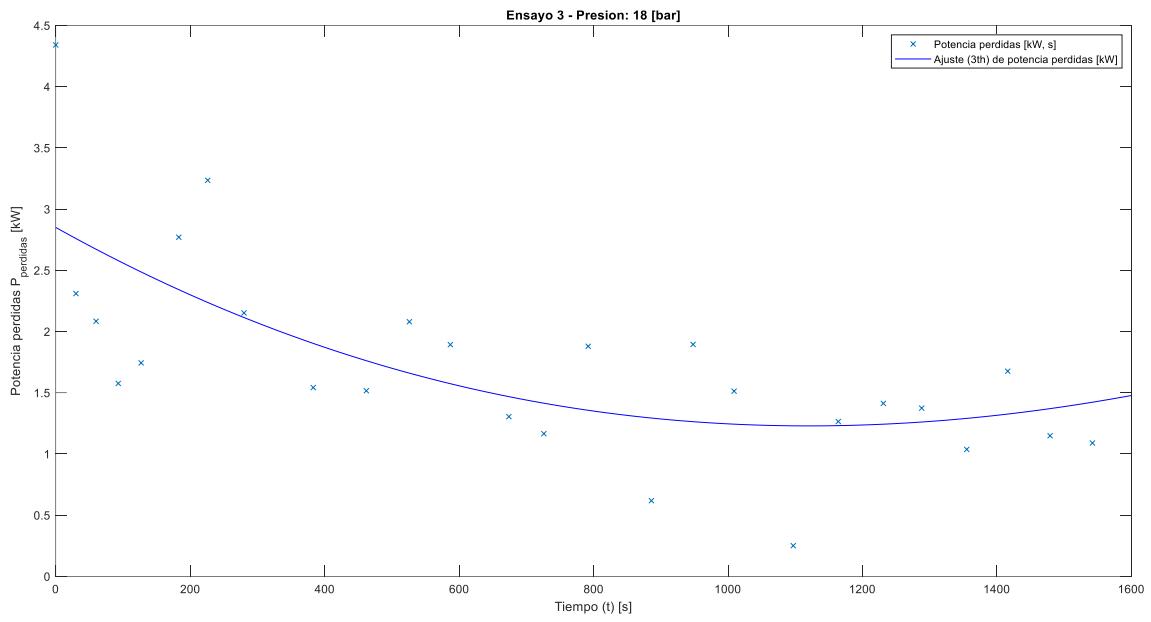


Figura 118. Gráfica de potencia de pérdidas en función del tiempo. Ensayo a  $P_{\text{trab}} = 18$  [bar], con tapa de entrada de aire.  $T_{\text{ent,agua\_media}}^{\text{a}} = 19.2^\circ\text{C}$

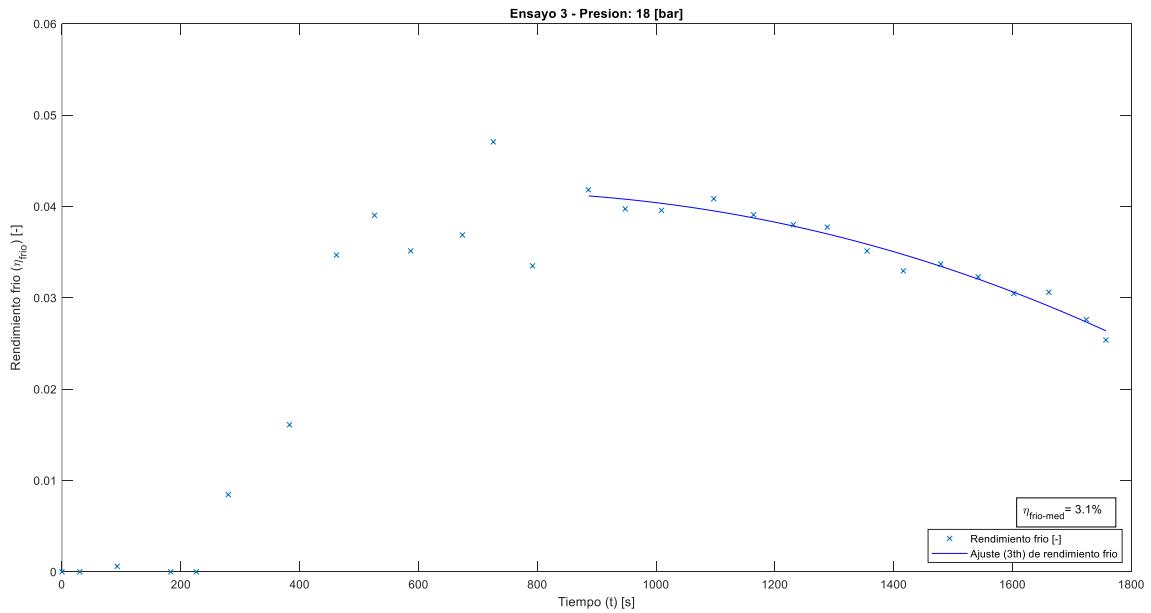


Figura 119. Gráfica de rendimiento frío en función del tiempo. Ensayo a  $P_{\text{trab}} = 18$  [bar], con tapa de entrada de aire.  $T_{\text{ent,agua\_media}}^{\text{a}} = 19.2^\circ\text{C}$ .

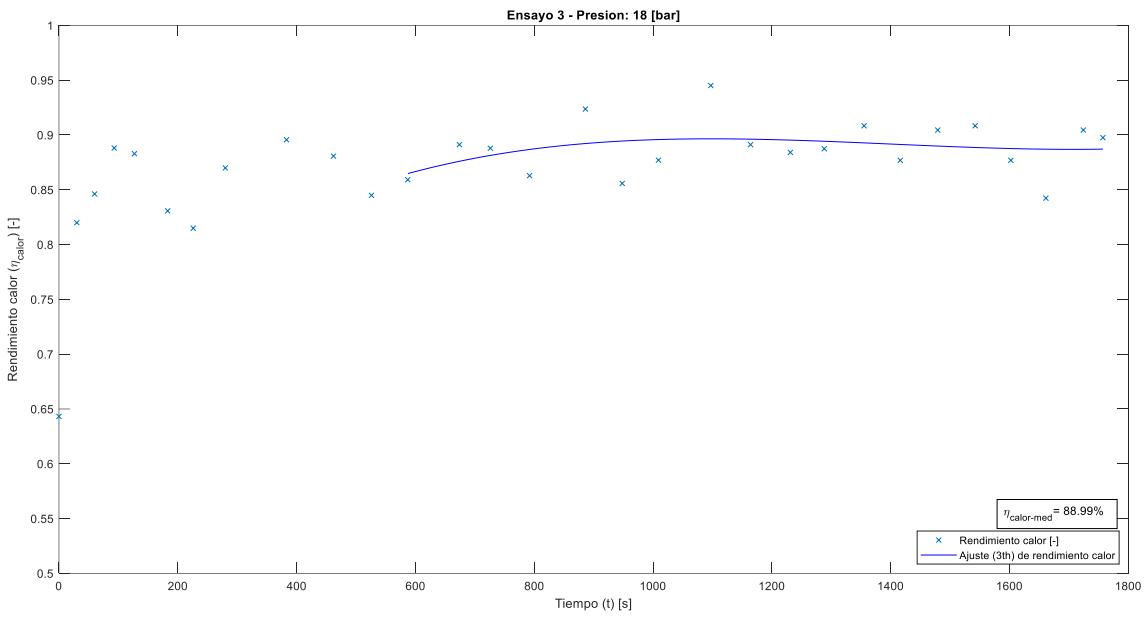


Figura 120. Gráfica de rendimiento calorífico en función del tiempo. Ensayo a  $P_{trab} = 18$  [bar], con tapa de entrada de aire.  $T_{ent,agua\_media}^a = 19.2^\circ\text{C}$ .

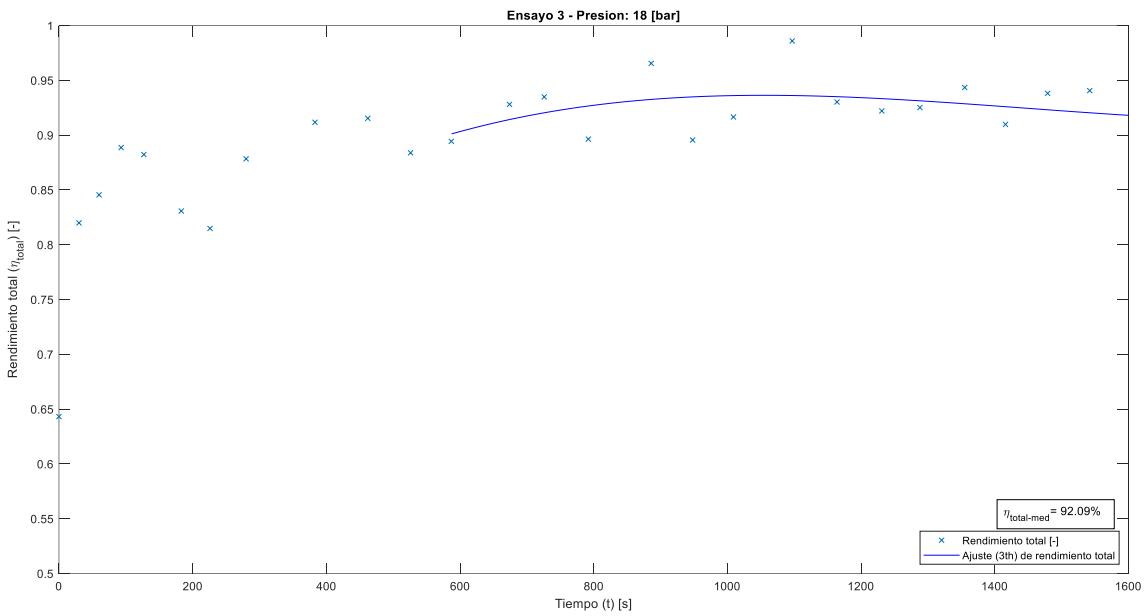
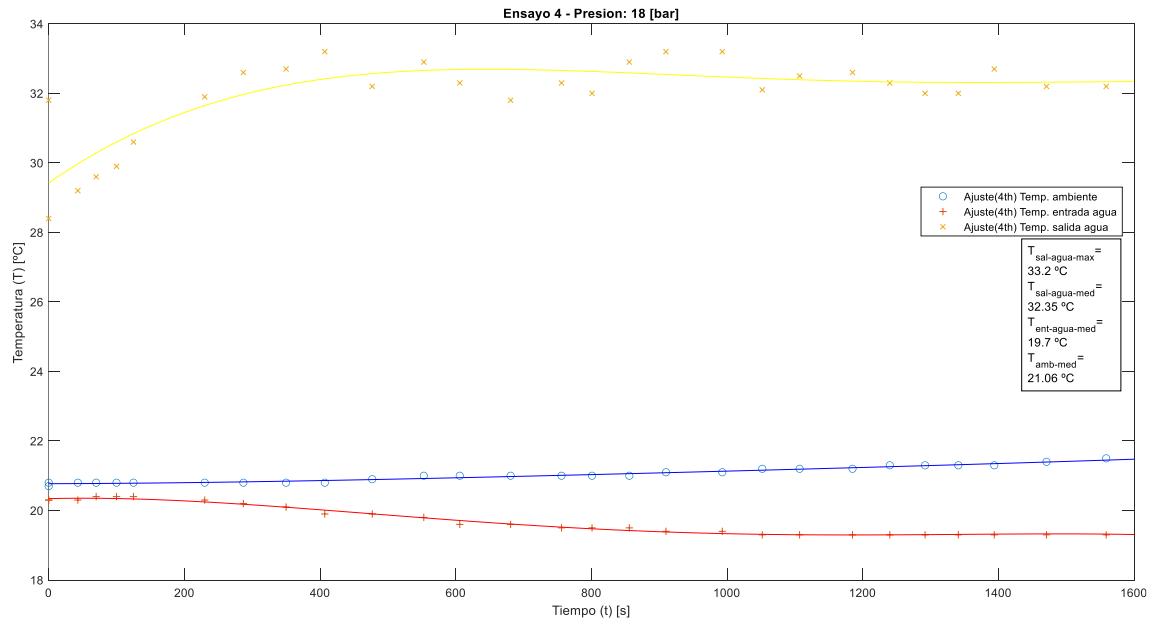
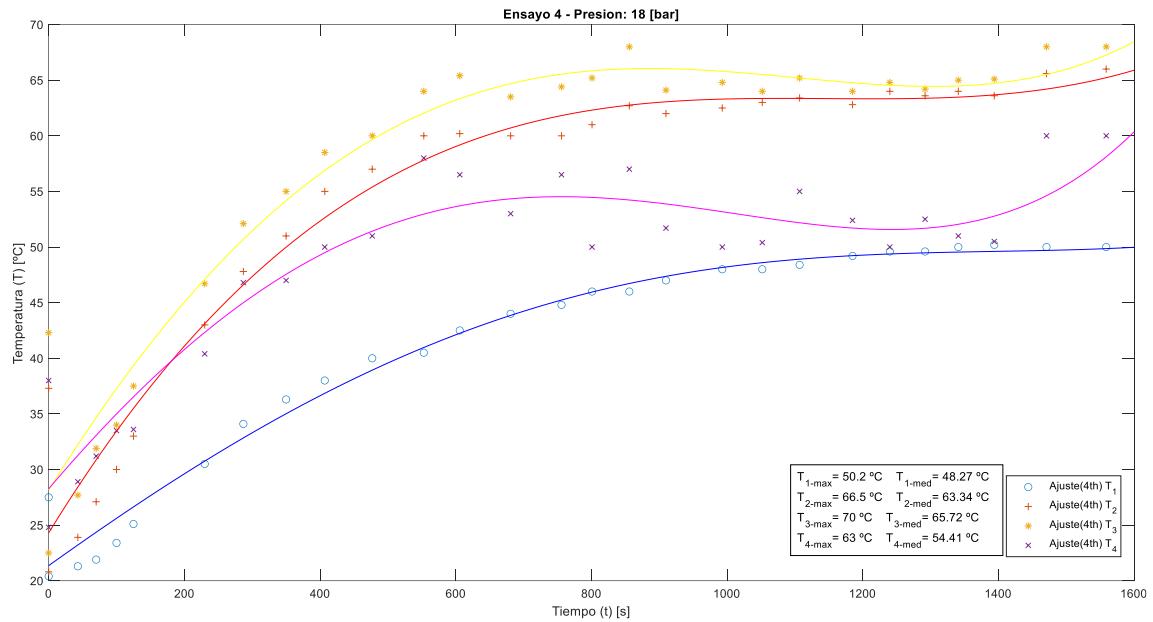
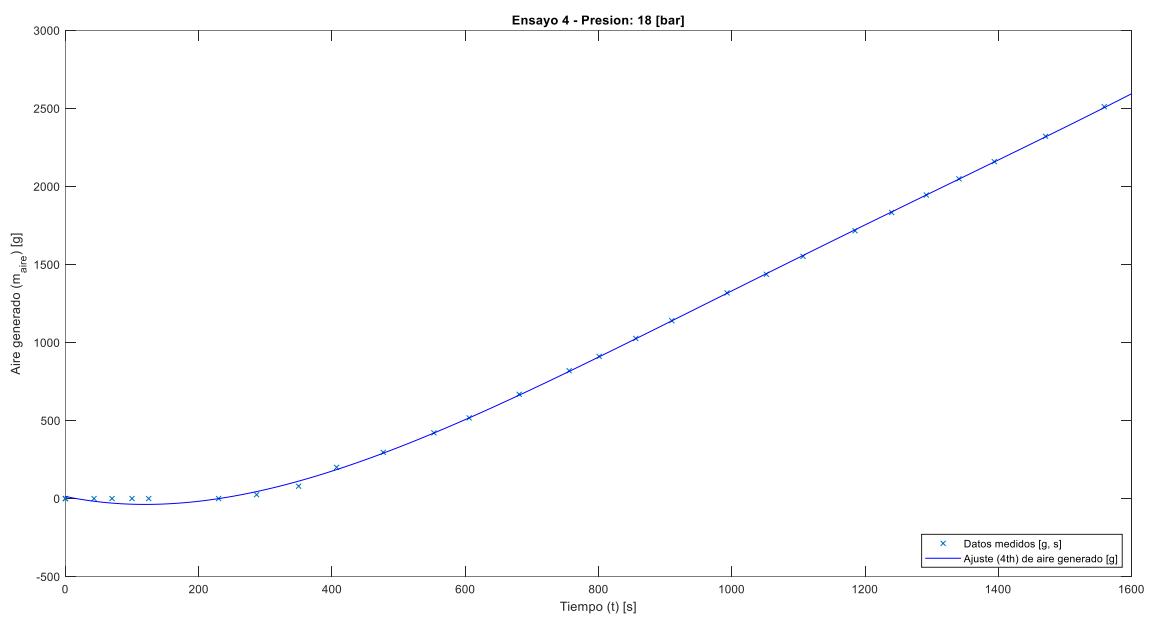
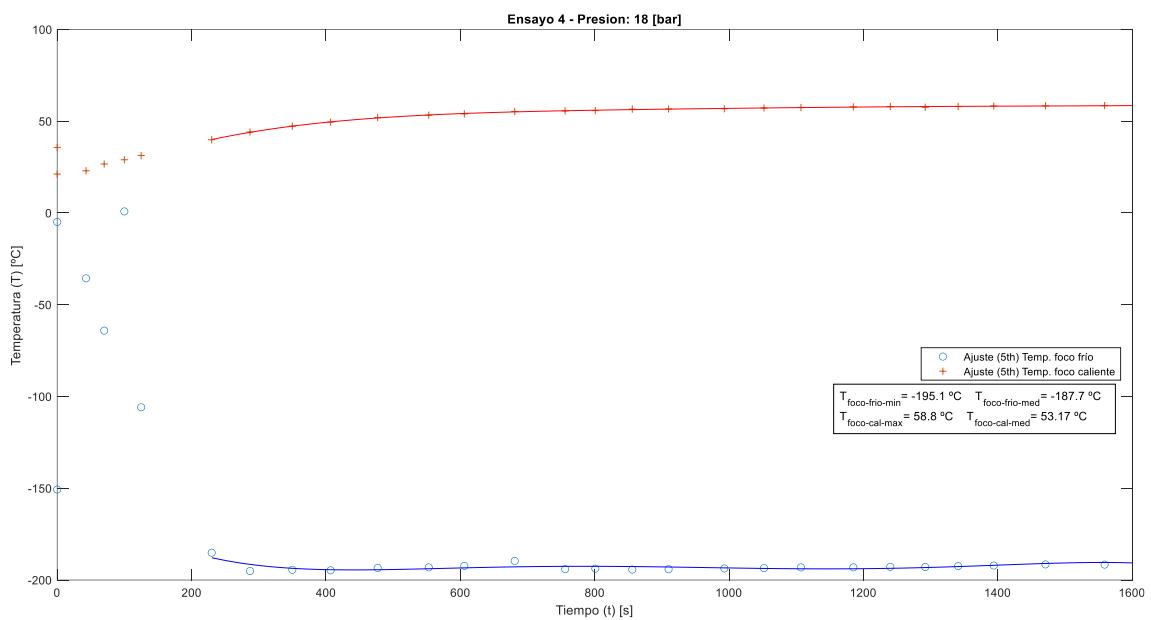
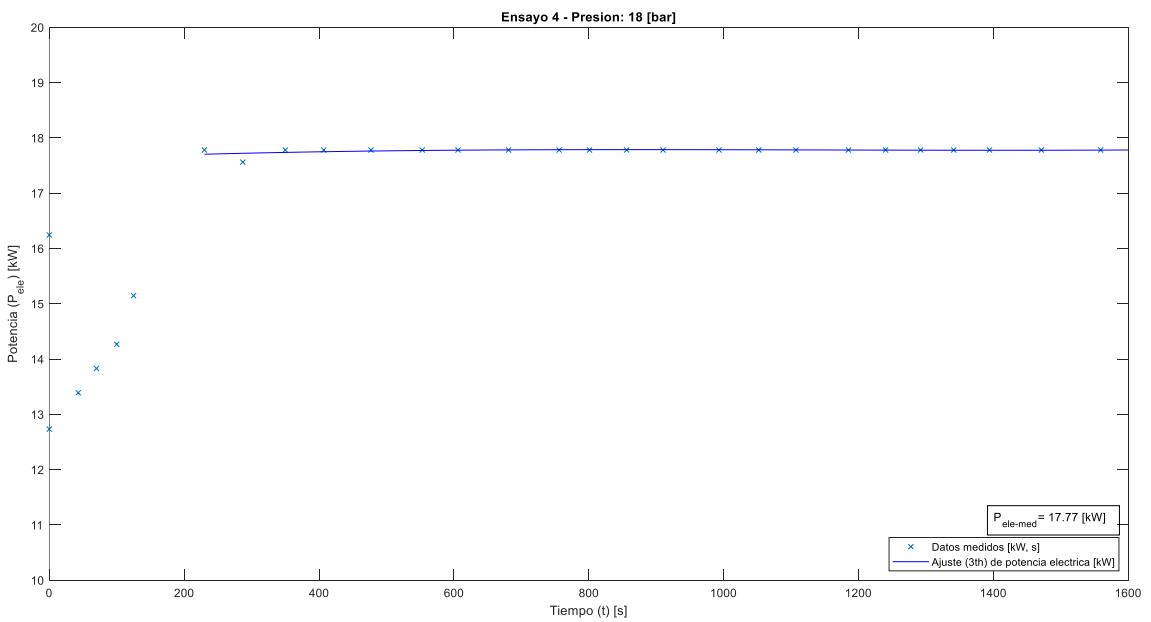
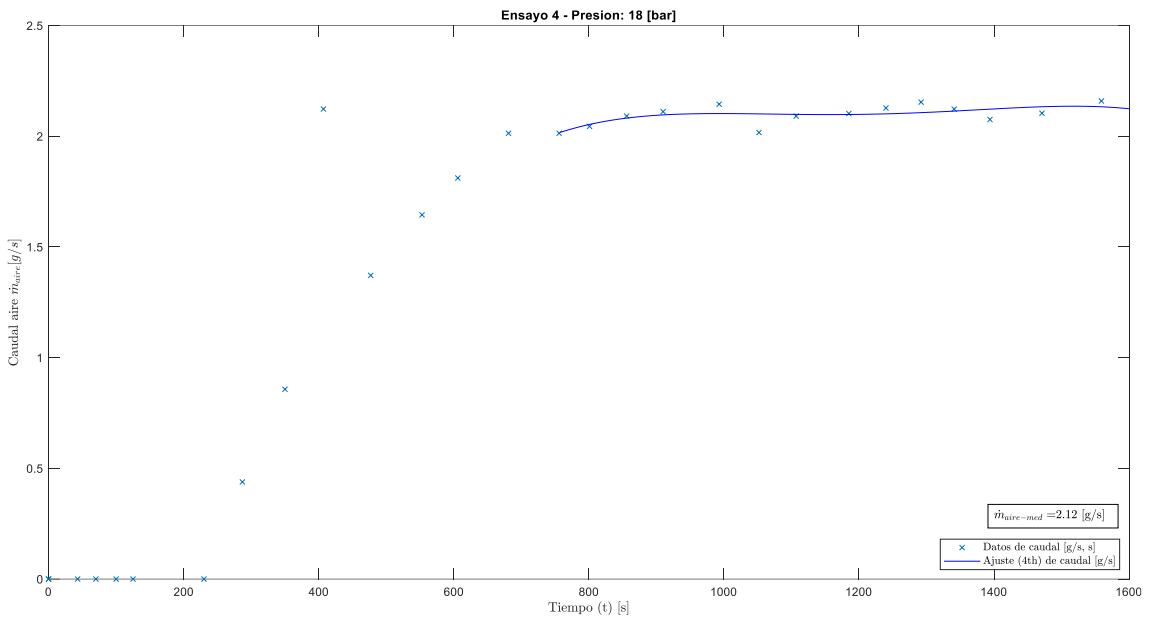


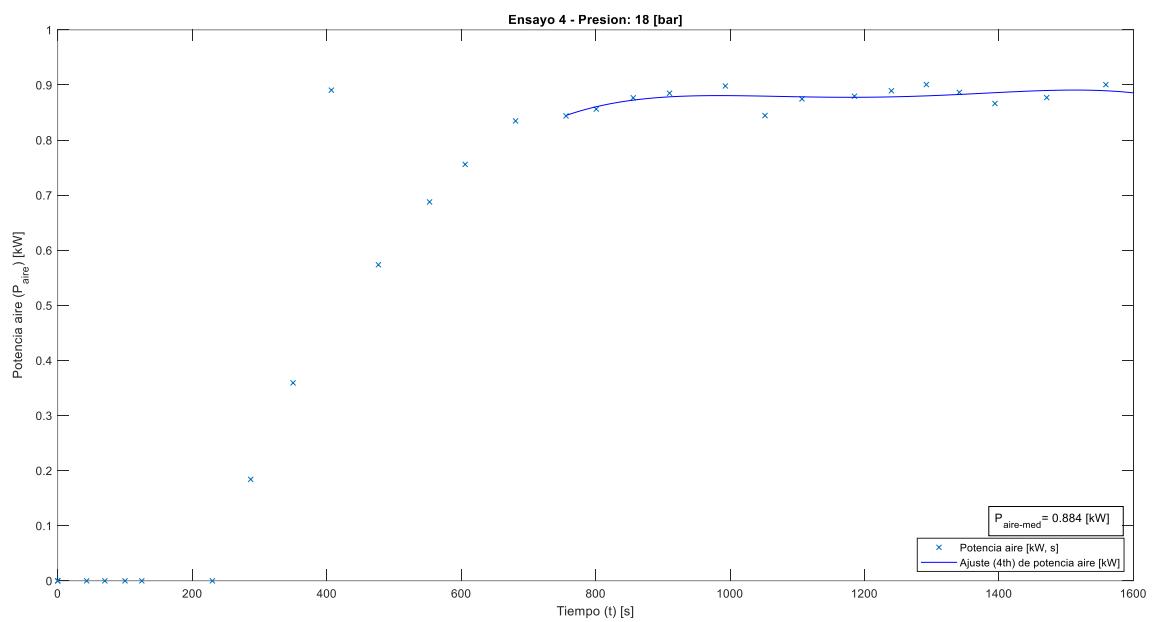
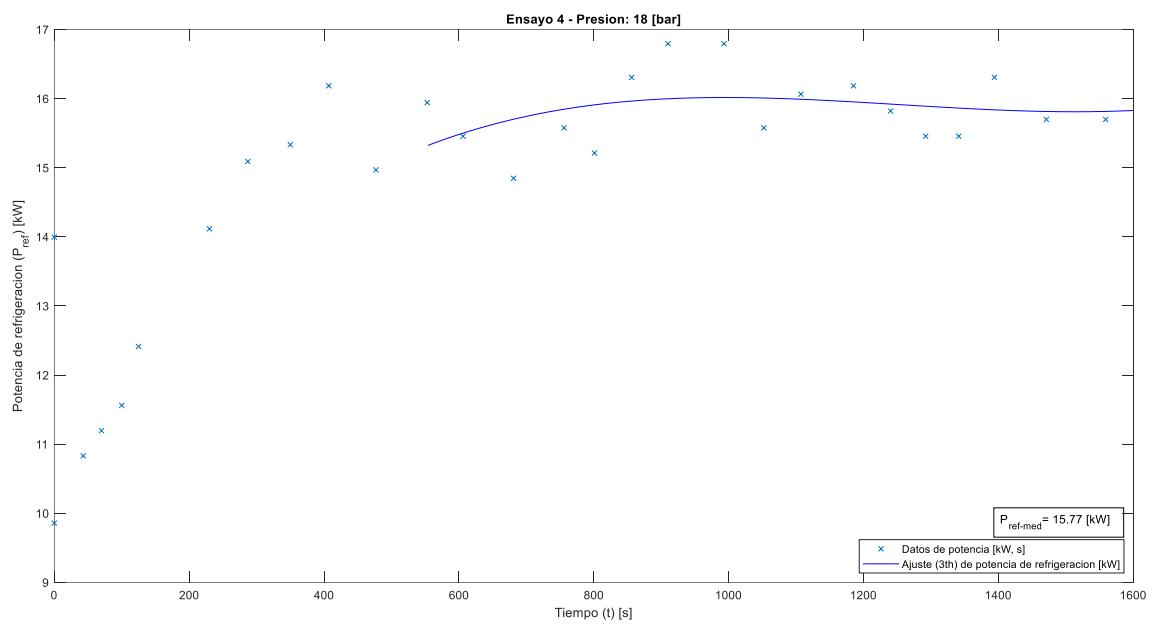
Figura 121. Gráfica de rendimiento total en función del tiempo. Ensayo a  $P_{trab} = 18$  [bar], con tapa de entrada de aire.  $T_{ent,agua\_media}^a = 19.2^\circ\text{C}$ .

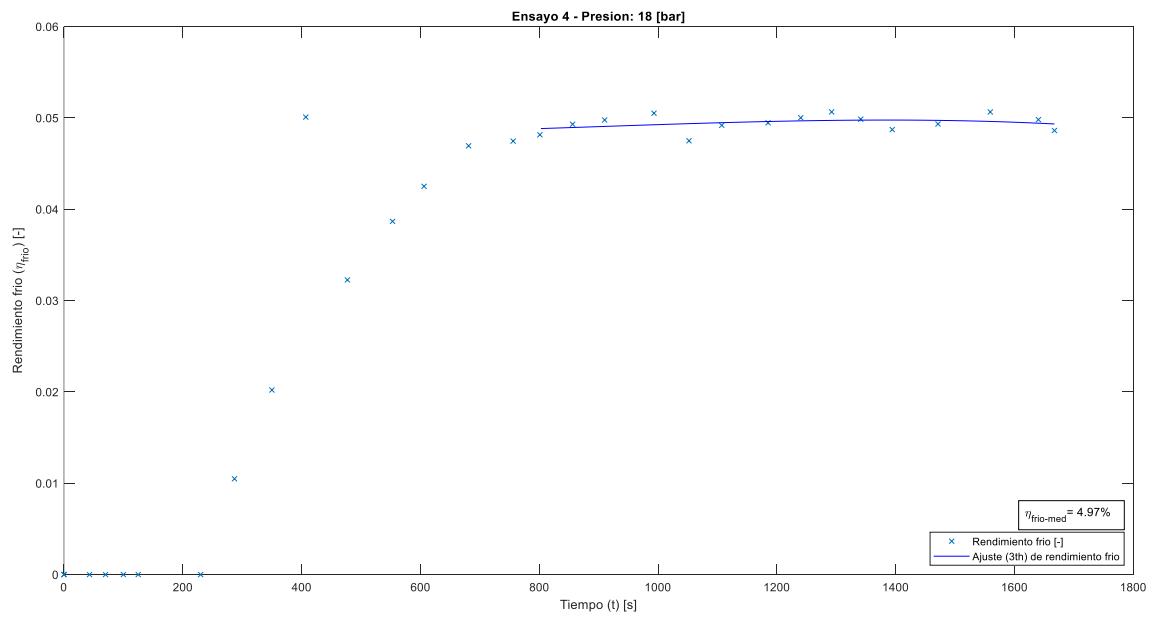
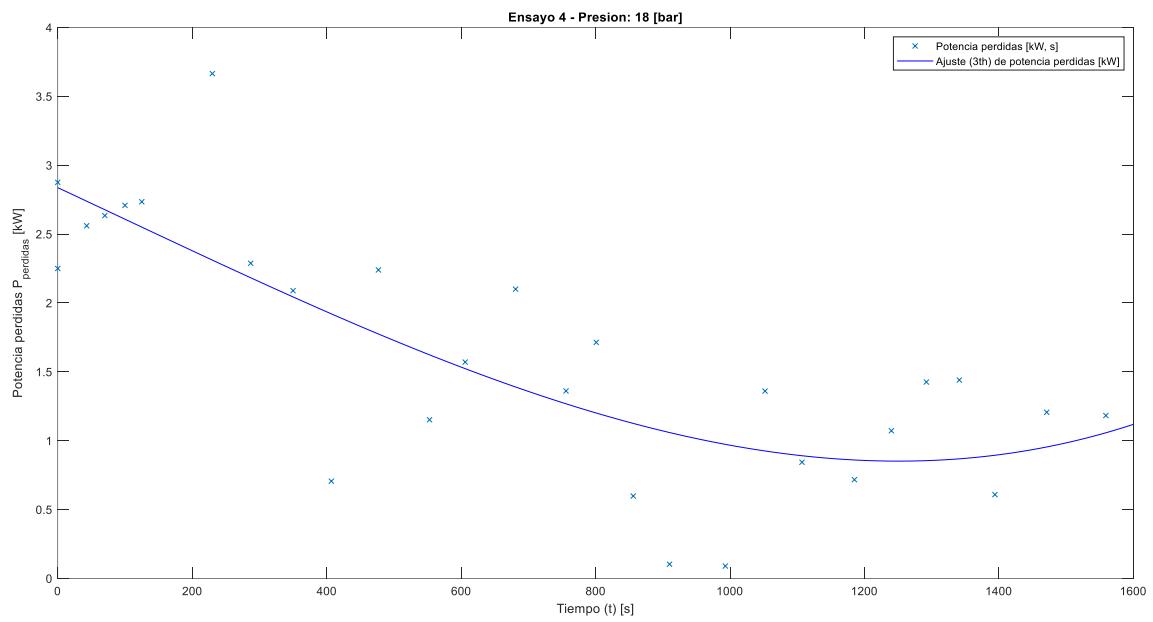
#### 8.4. Ensayo 4: sin tapa de entrada de aire y 18 bares de presión de trabajo.

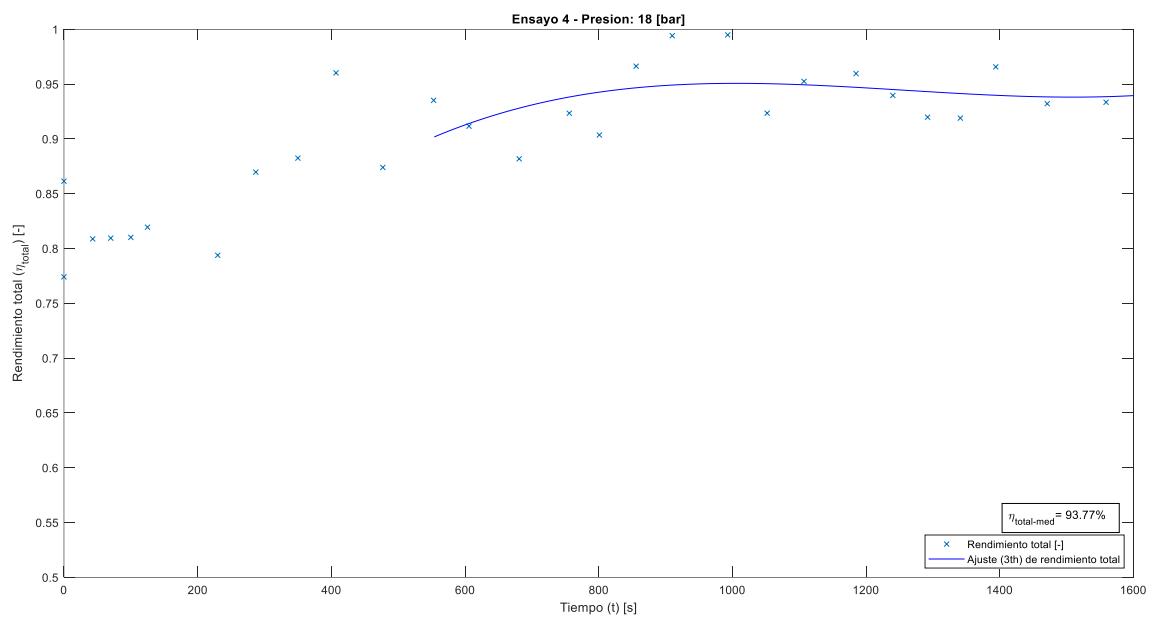
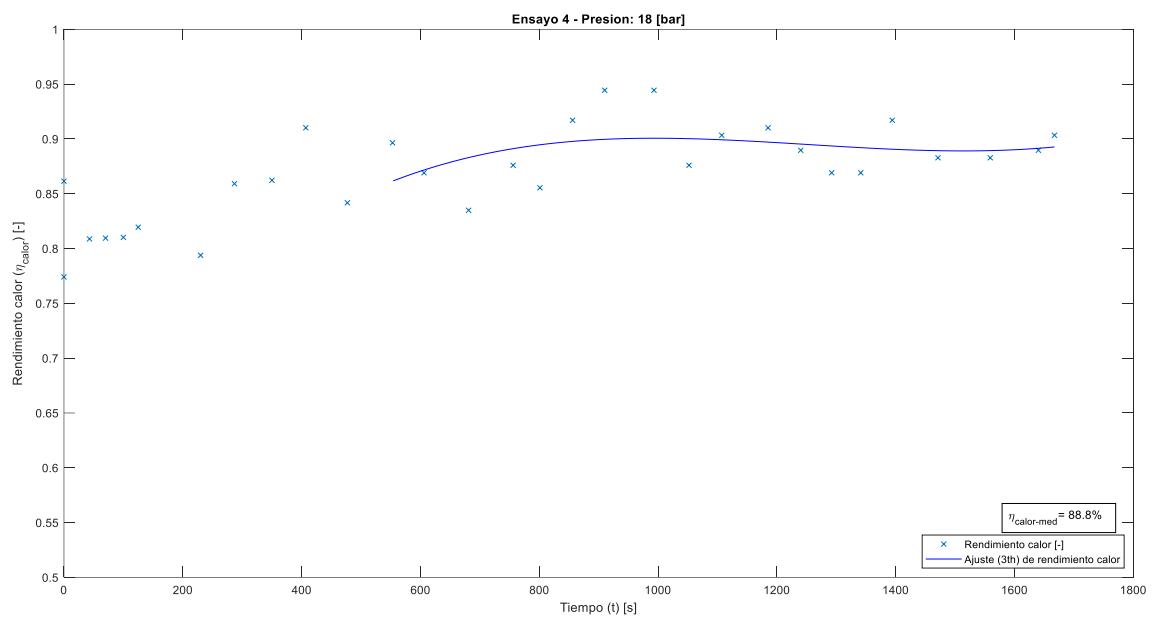












## 8.5. Ensayo 6: sin tapa de entrada de aire y 16 bares de presión de trabajo.

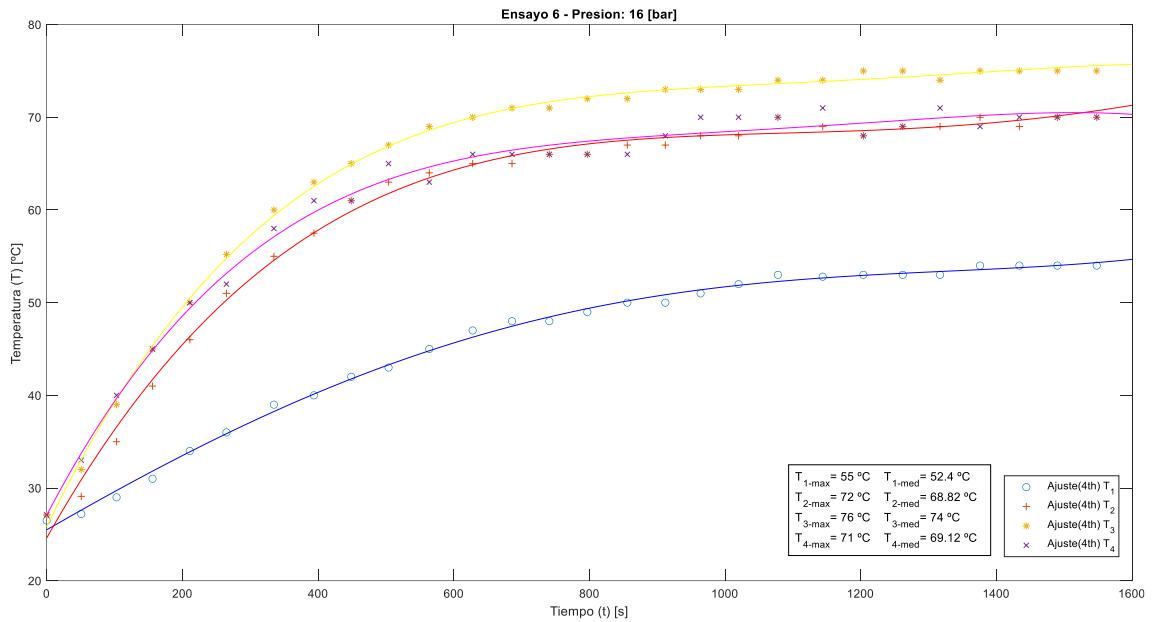


Figura 122. Gráfica de  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_3$  y  $T_4$  en función del tiempo del ensayo a  $P_{trab} = 16$  [bar] y sin tapa de entrada de aire.  $T_{ent,agua\_media}^a = 27.2^\circ\text{C}$

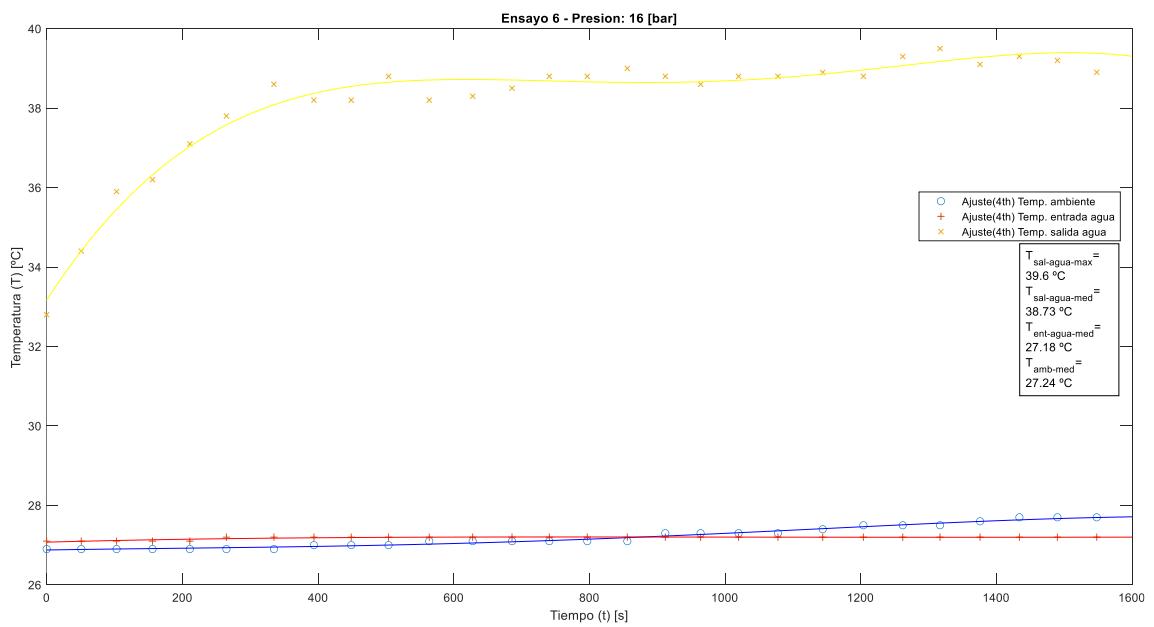


Figura 123. Gráfica de  $T_{sal,agua}$ ,  $T_{ent,agua}$ , y  $T_{amb}$  en función del tiempo. Ensayo a  $P_{trab} = 16$  [bar] y sin tapa de entrada de aire.

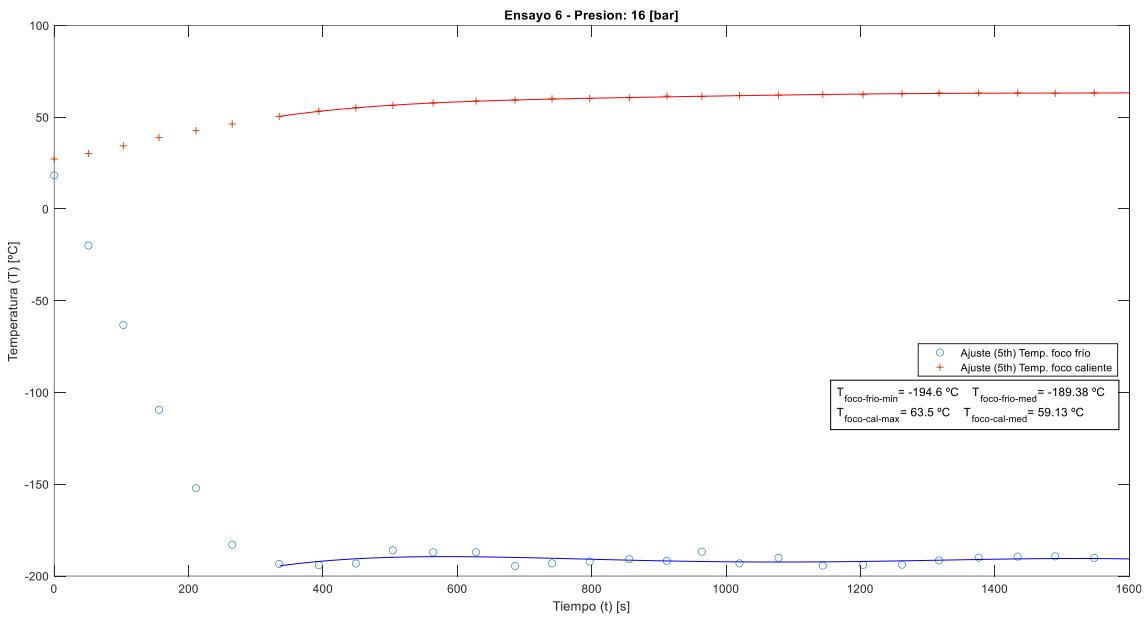


Figura 124. Gráfica de  $T_{ff}$  y  $T_{fc}$  en función del tiempo. Ensayo a  $P_{trab} = 16$  [bar] y sin tapa de entrada de aire.  $T_{ent,agua\_media}^a = 27.2^\circ\text{C}$ .

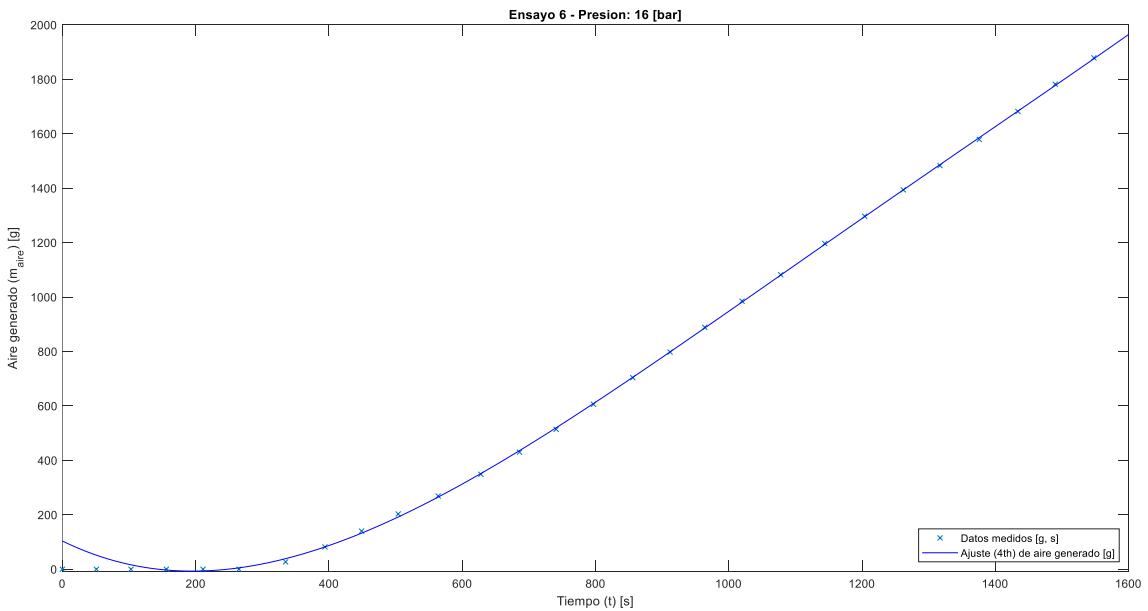


Figura 125. Gráfica de producción de aire líquido en función del tiempo. Ensayo a  $P_{trab} = 16$  [bar] y sin tapa de entrada de aire.  $T_{ent,agua\_media}^a = 27.2^\circ\text{C}$ .

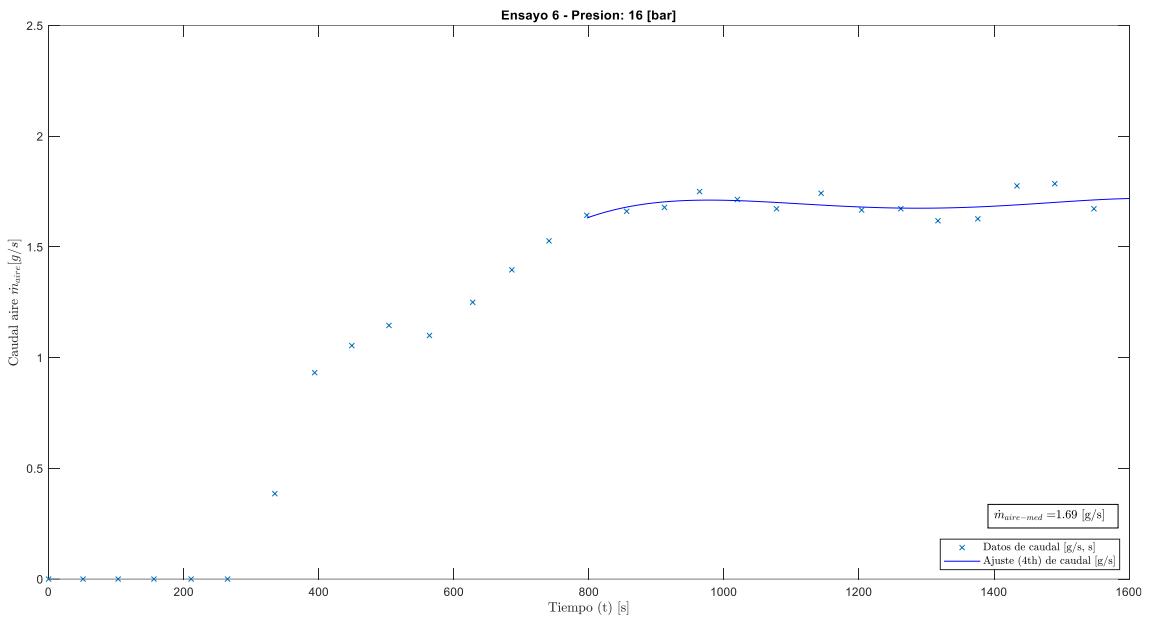


Figura 126. Gráfica de caudal de aire líquido generado en función del tiempo. Ensayo a  $P_{trab} = 16$  [bar] y sin tapa de entrada de aire.  $T_{ent,agua\_media}^a = 27.2^\circ\text{C}$ .

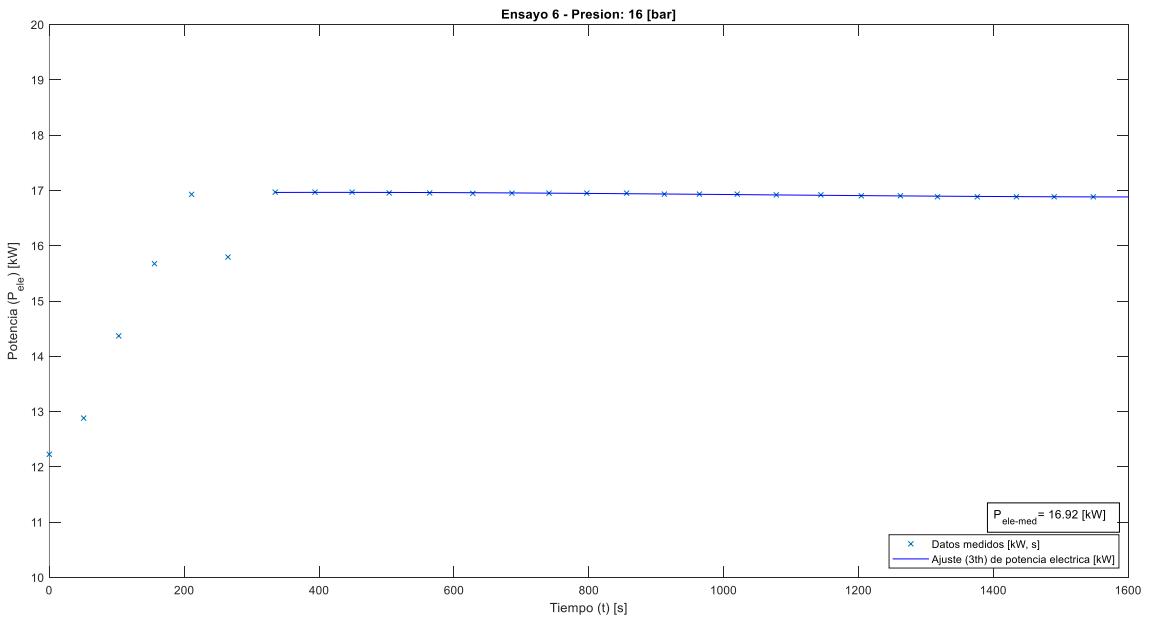


Figura 127. Gráfica de potencia eléctrica consumida en función del tiempo. Ensayo a  $P_{trab} = 16$  [bar] y sin tapa de entrada de aire.  $T_{ent,agua\_media}^a = 27.2^\circ\text{C}$ .

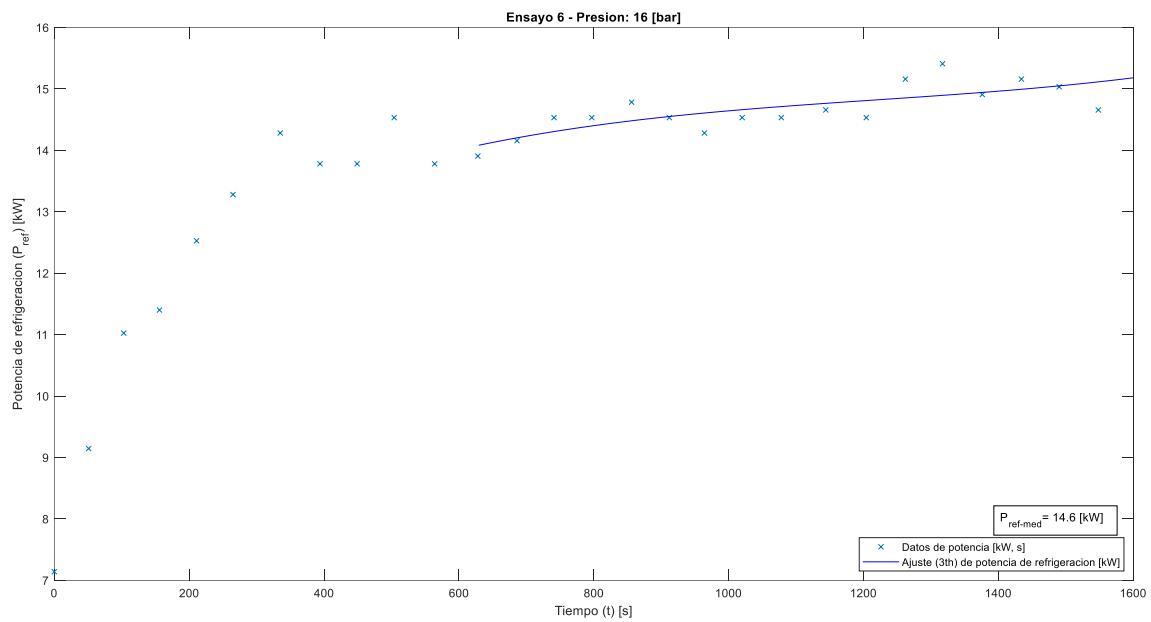


Figura 128. Gráfica de potencia de refrigeración en función del tiempo. Ensayo a  $P_{trab} = 16 \text{ [bar]}$  y sin tapa de entrada de aire.  $T_{ent,agua\_media}^a = 27.2^\circ\text{C}$ .

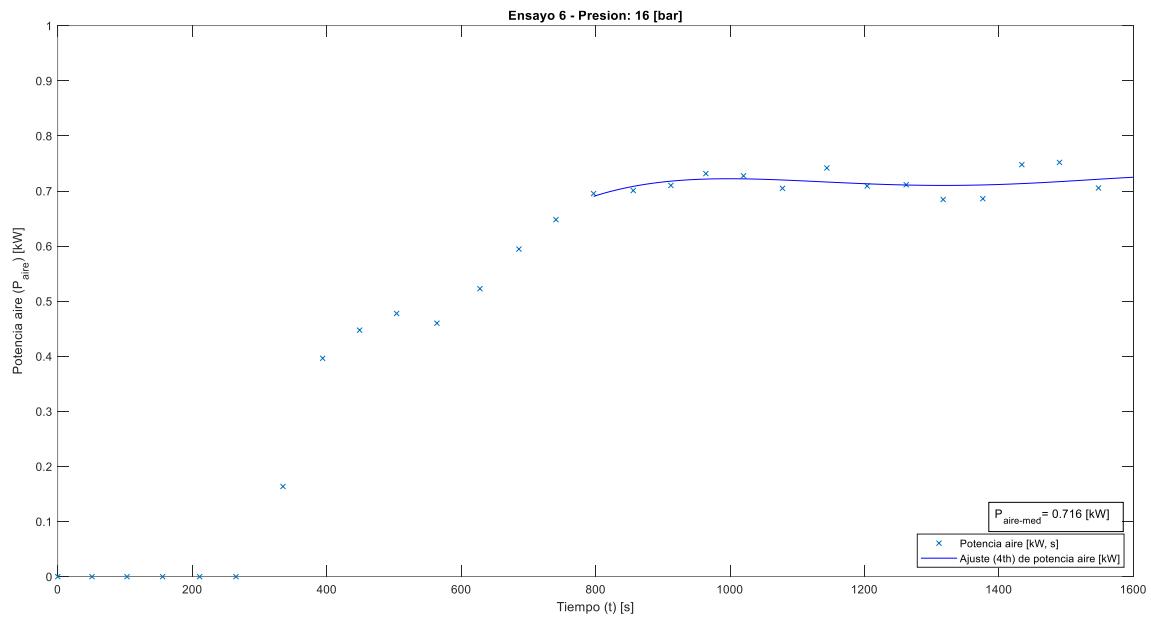


Figura 129. Gráfica de potencia extraída al aire en función del tiempo. Ensayo a  $P_{trab} = 16 \text{ [bar]}$  y sin tapa de entrada de aire.  $T_{ent,agua\_media}^a = 27.2^\circ\text{C}$ .

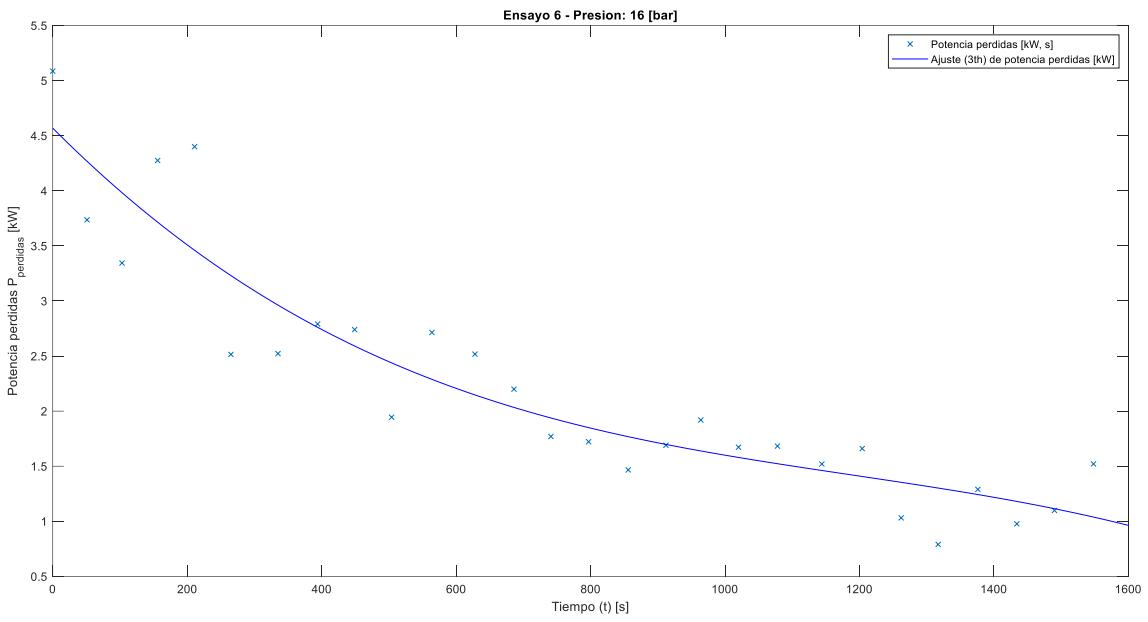


Figura 130. Gráfica de potencia de pérdidas en función del tiempo. Ensayo a  $P_{\text{trab}} = 16$  [bar] y sin tapa de entrada de aire.  $T_{\text{a ent, agua media}}^{\circ} = 27.2^{\circ}\text{C}$ .

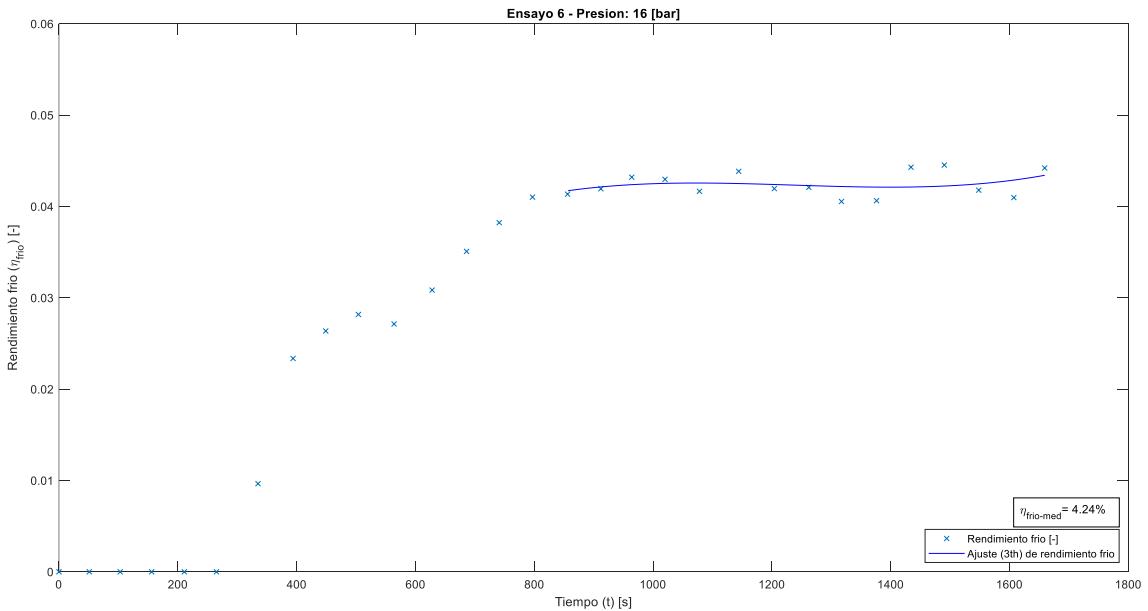


Figura 131. Gráfica de rendimiento frío en función del tiempo. Ensayo a  $P_{\text{trab}} = 16$  [bar] y sin tapa de entrada de aire.  $T_{\text{a ent, agua media}}^{\circ} = 27.2^{\circ}\text{C}$ .

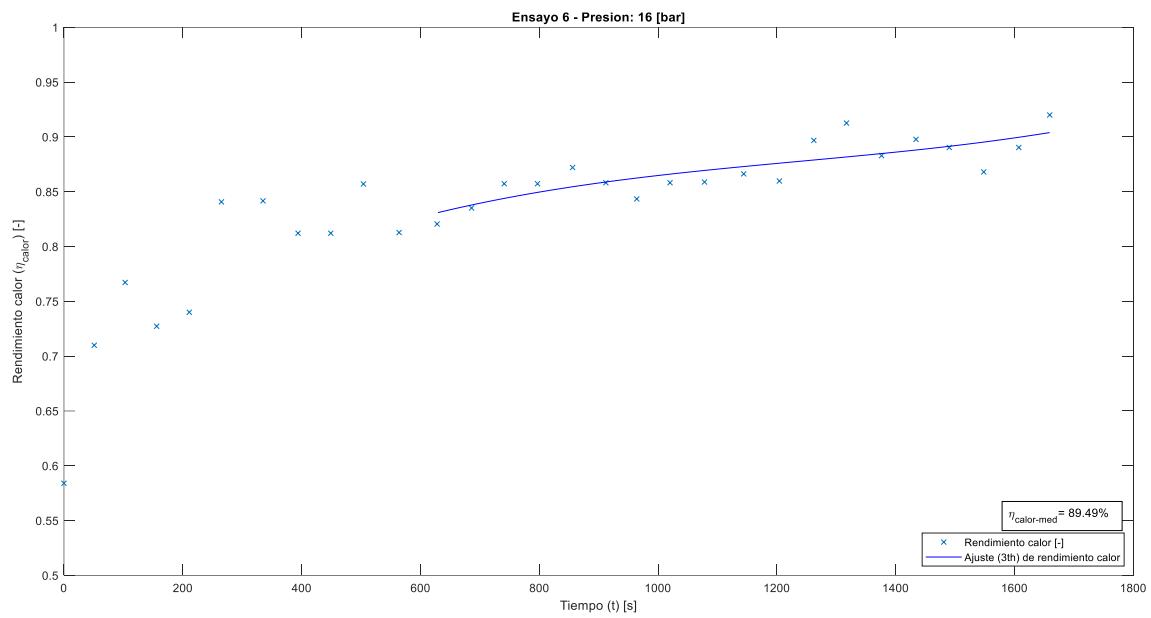


Figura 132. Gráfica de rendimiento calorífico en función del tiempo. Ensayo a  $P_{\text{trab}} = 16$  [bar] y sin tapa de entrada de aire.  $T_{\text{ent,agua media}}^{\text{a}} = 27.2^{\circ}\text{C}$ .

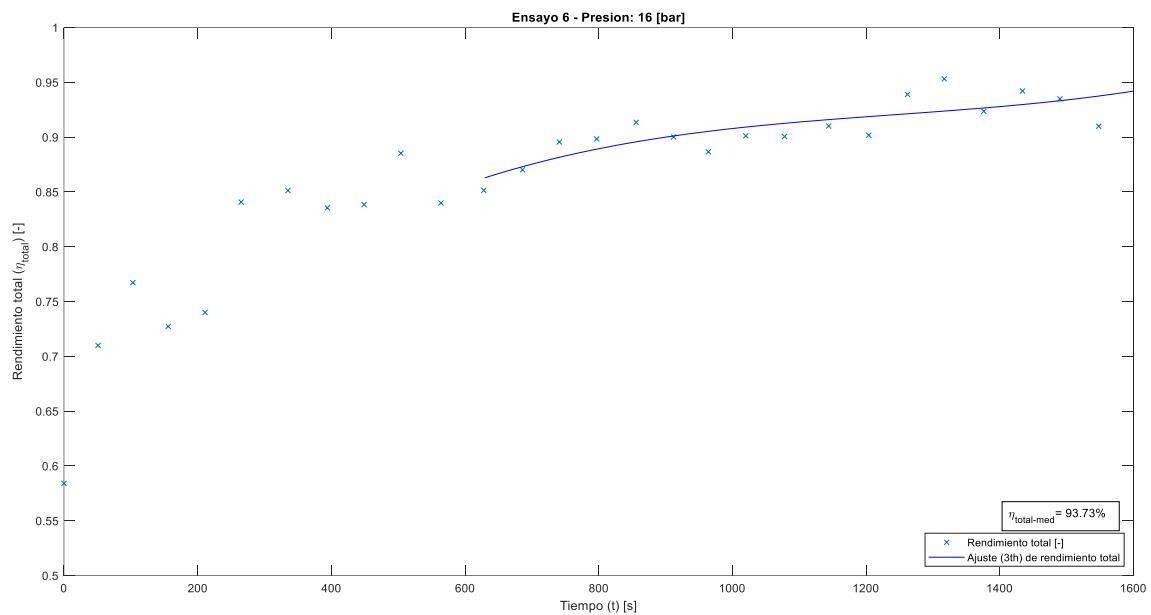


Figura 133. Gráfica de rendimiento total en función del tiempo. Ensayo a  $P_{\text{trab}} = 16$  [bar] y sin tapa de entrada de aire.  $T_{\text{ent,agua media}}^{\text{a}} = 27.27^{\circ}\text{C}$ .

8.6. Ensayo 9: sin tapa de entrada de aire, 15 bares de presión de trabajo y  $T_{ent,agua} = 24.45^{\circ}\text{C}$ .

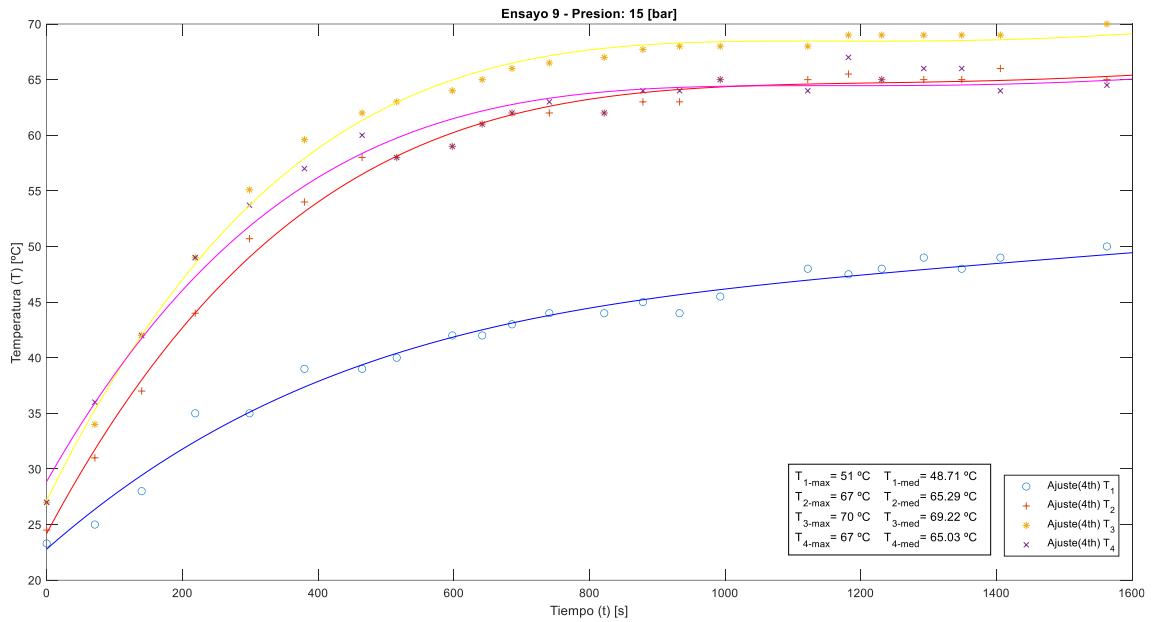


Figura 134. Gráfica de  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_3$  y  $T_4$  en función del tiempo del ensayo a  $P_{trab} = 15$  [bar] y sin tapa de entrada de aire.  $T_{ent,agua\text{media}} = 24.45^{\circ}\text{C}$

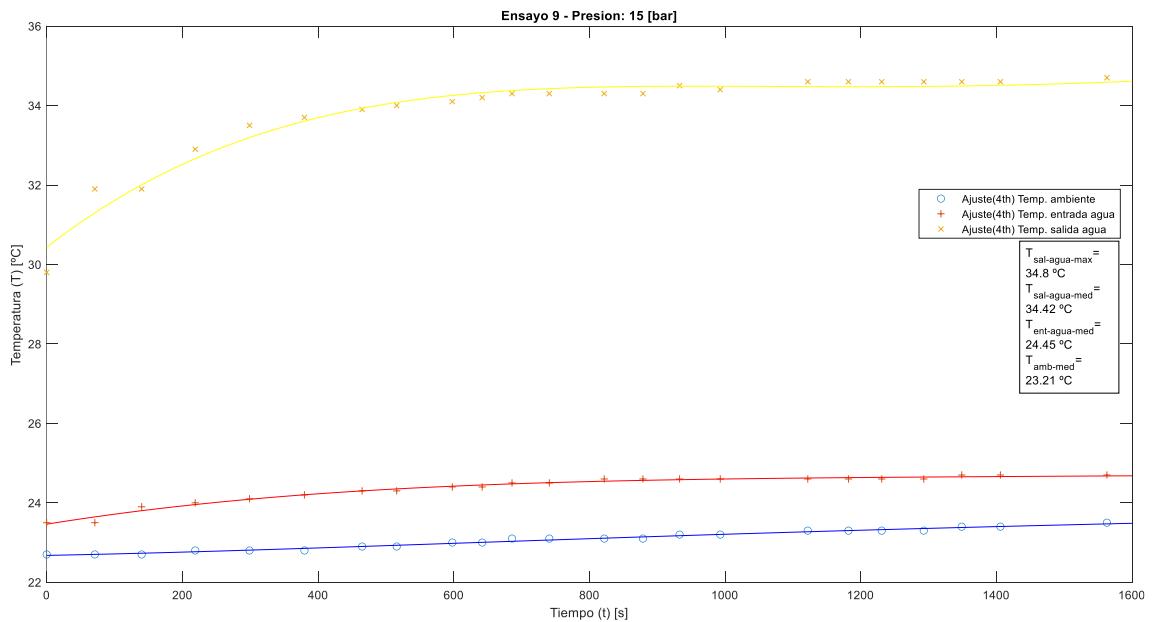


Figura 135. Gráfica de  $T_{sal,agua}$ ,  $T_{ent,agua}$ , y  $T_{amb}$  en función del tiempo. Ensayo a  $P_{trab} = 15$  [bar] y sin tapa de entrada de aire.

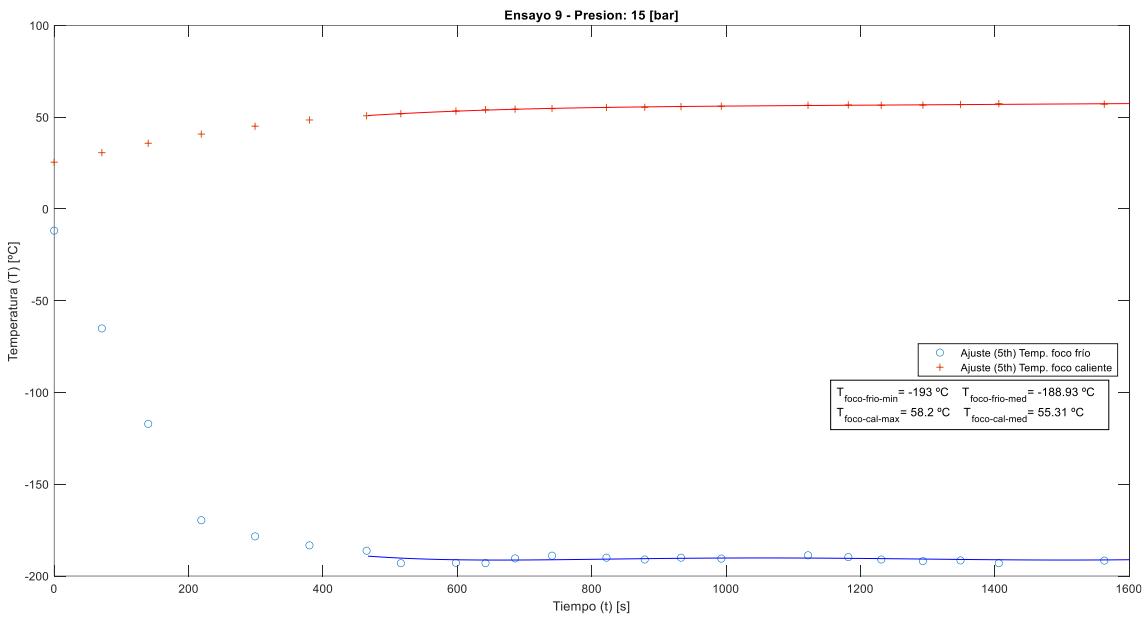


Figura 136. Gráfica de  $T_{ff}$  y  $T_{fc}$  en función del tiempo. Ensayo a  $P_{trab} = 15$  [bar] y sin tapa de entrada de aire.  $T_{ent,agua\_media}^a = 24.45$   $^{\circ}\text{C}$ .

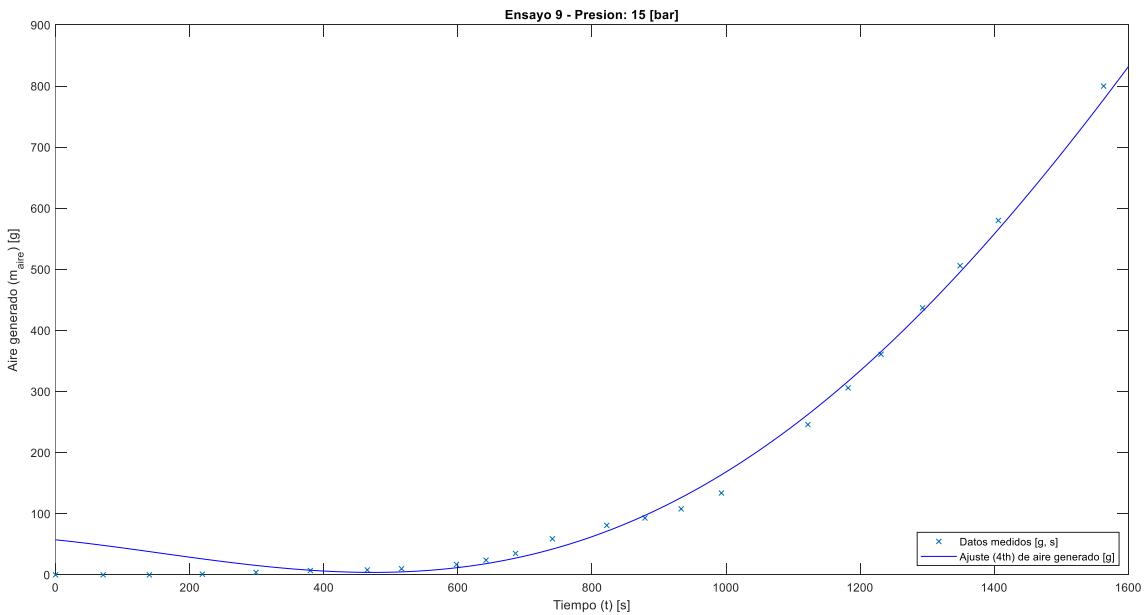


Figura 137. Gráfica de producción de aire líquido en función del tiempo. Ensayo a  $P_{trab} = 15$  [bar] y sin tapa de entrada de aire.  $T_{ent,agua\_media}^a = 24.45$   $^{\circ}\text{C}$ .

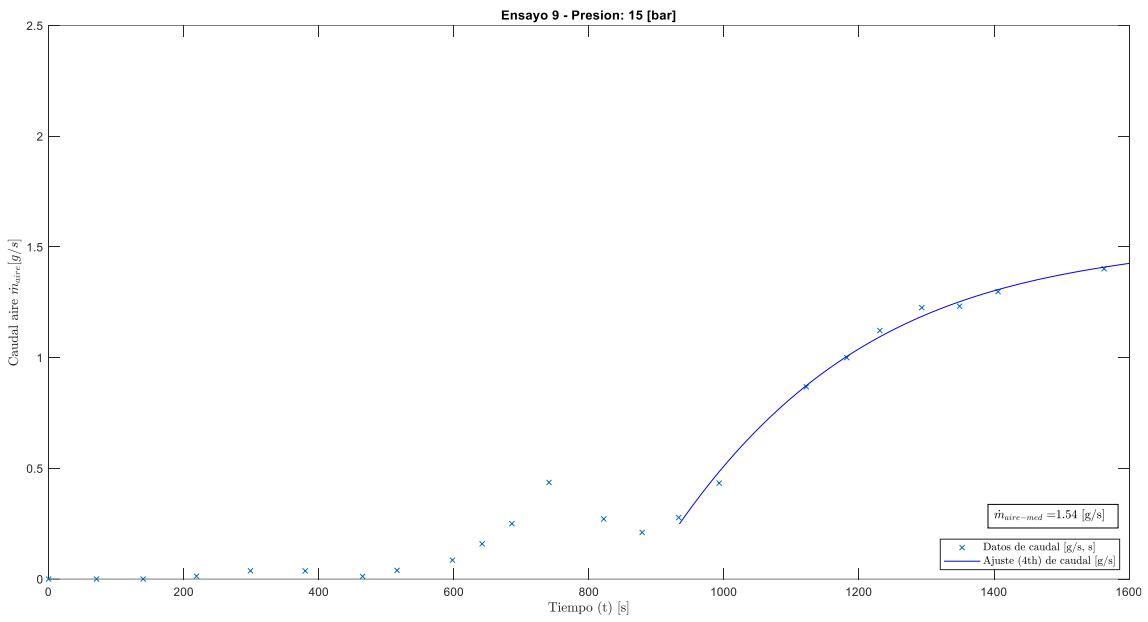


Figura 138. Gráfica de caudal de aire líquido generado en función del tiempo. Ensayo a  $P_{trab} = 15$  [bar] y sin tapa de entrada de aire.  $T^a_{ent,agua\_media} = 24.45^\circ\text{C}$ .

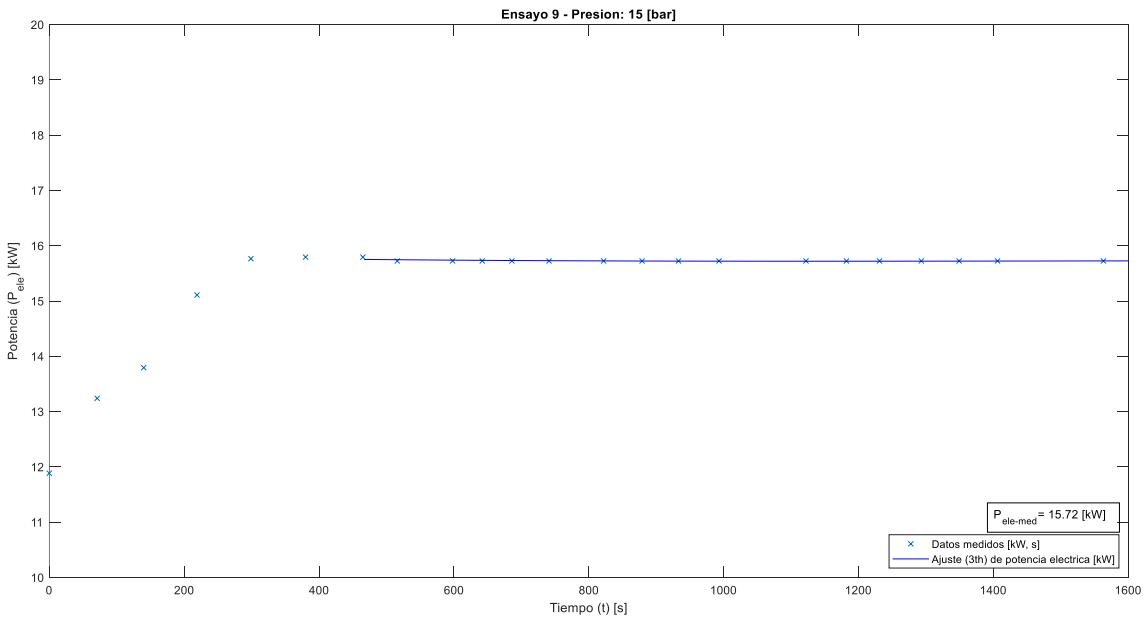


Figura 139. Gráfica de potencia eléctrica consumida en función del tiempo. Ensayo a  $P_{trab} = 15$  [bar] y sin tapa de entrada de aire.  $T^a_{ent,agua\_media} = 24.45^\circ\text{C}$ .

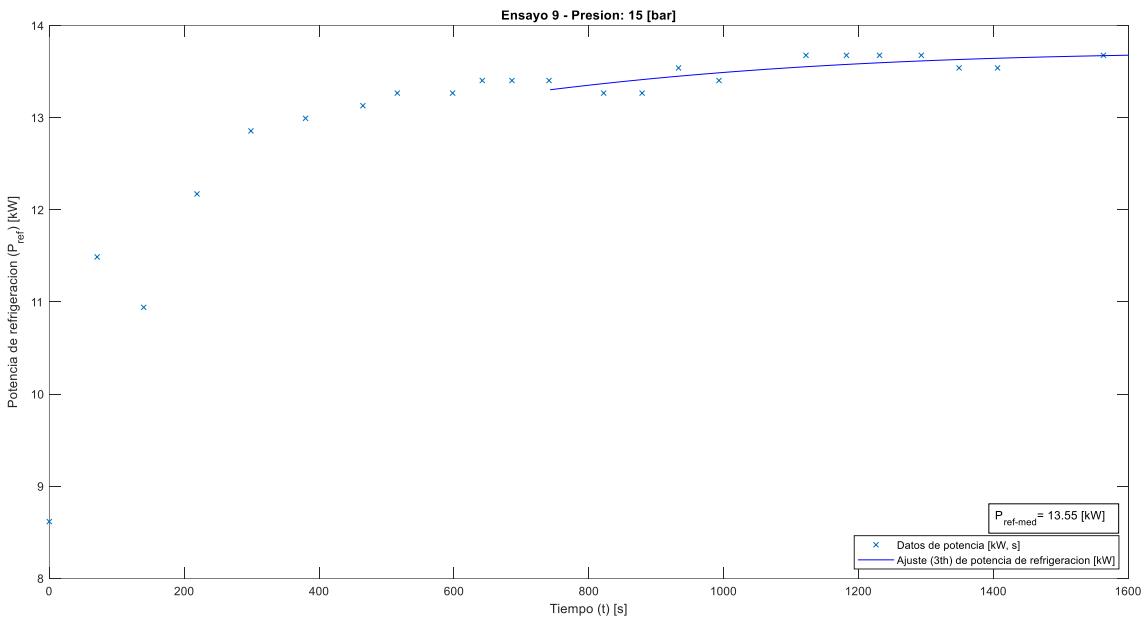


Figura 140. Gráfica de potencia de refrigeración en función del tiempo. Ensayo a  $P_{trab} = 15$  [bar] y sin tapa de entrada de aire.  $T_{ent,agua\_media}^a = 24.45^\circ\text{C}$ .

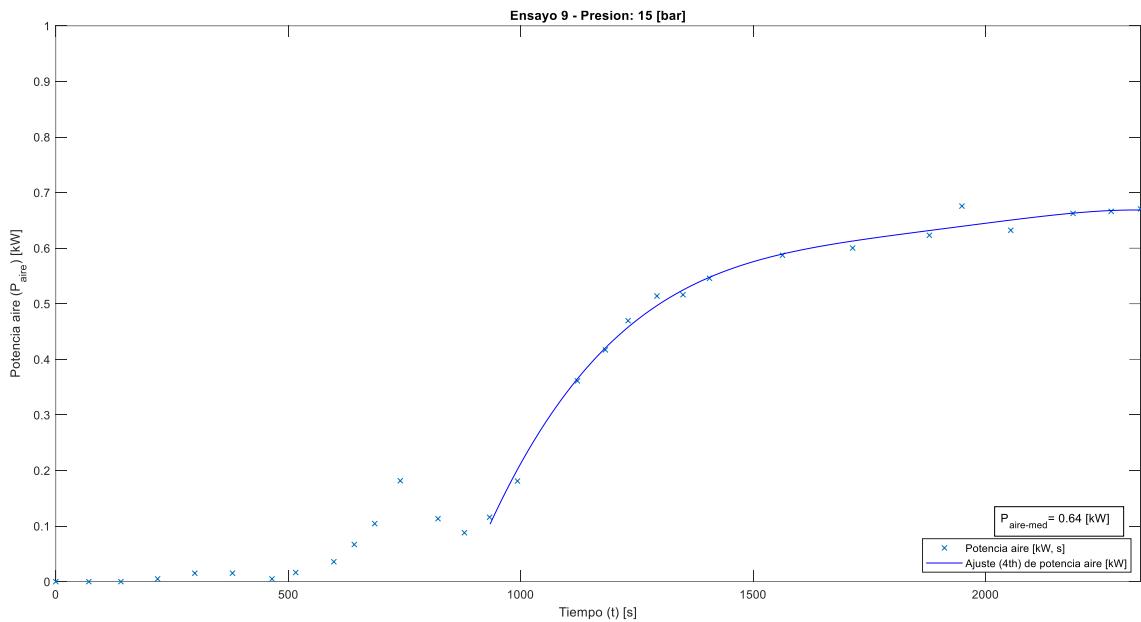


Figura 141. Gráfica de potencia extraída al aire en función del tiempo. Ensayo a  $P_{trab} = 15$  [bar] y sin tapa de entrada de aire.  $T_{ent,agua\_media}^a = 24.45^\circ\text{C}$ .

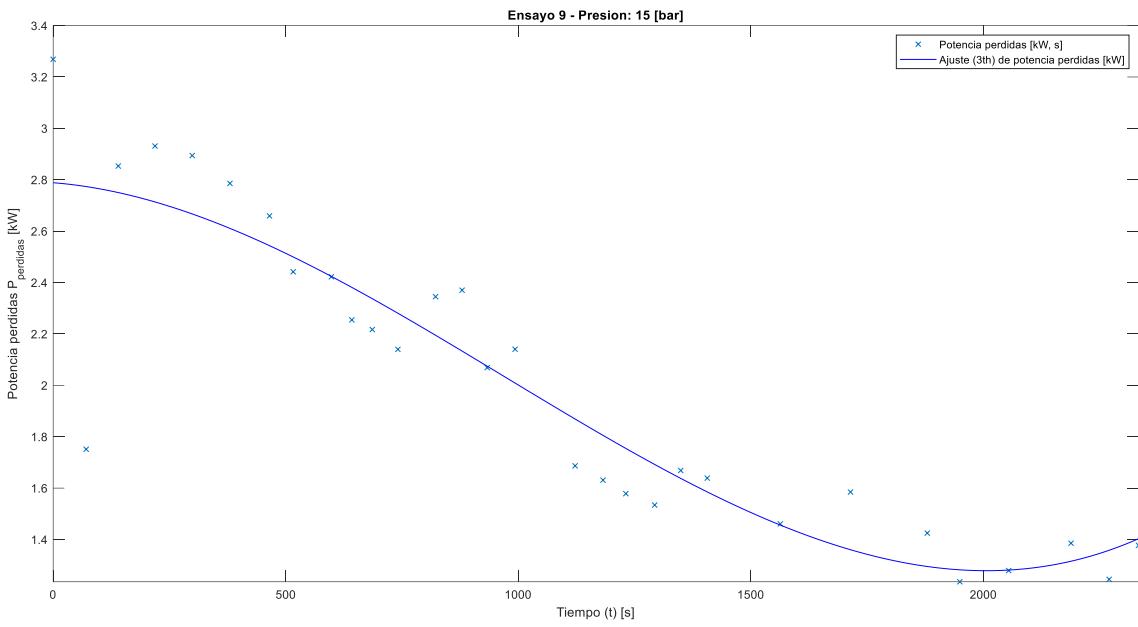


Figura 142. Gráfica de potencia de pérdidas en función del tiempo. Ensayo a  $P_{\text{trab}} = 15$  [bar] y sin tapa de entrada de aire.  $T_{\text{ent,agua media}}^{\text{a}} = 24.45^{\circ}\text{C}$ .

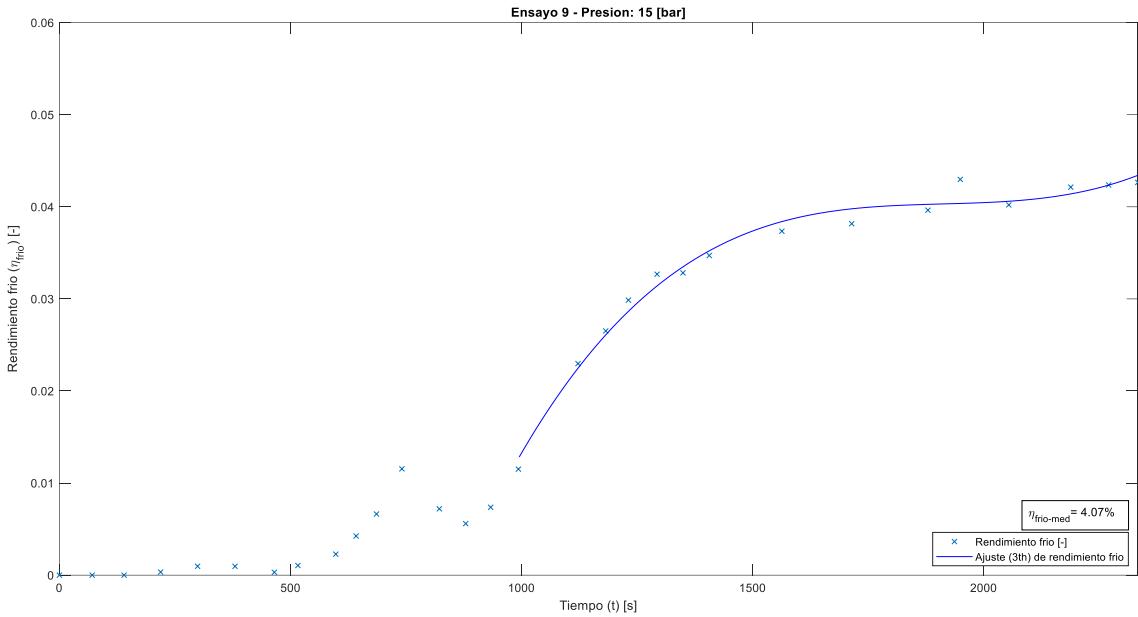


Figura 143. Gráfica de rendimiento frío en función del tiempo. Ensayo a  $P_{\text{trab}} = 15$  [bar] y sin tapa de entrada de aire.  $T_{\text{ent,agua media}}^{\text{a}} = 24.45^{\circ}\text{C}$ .

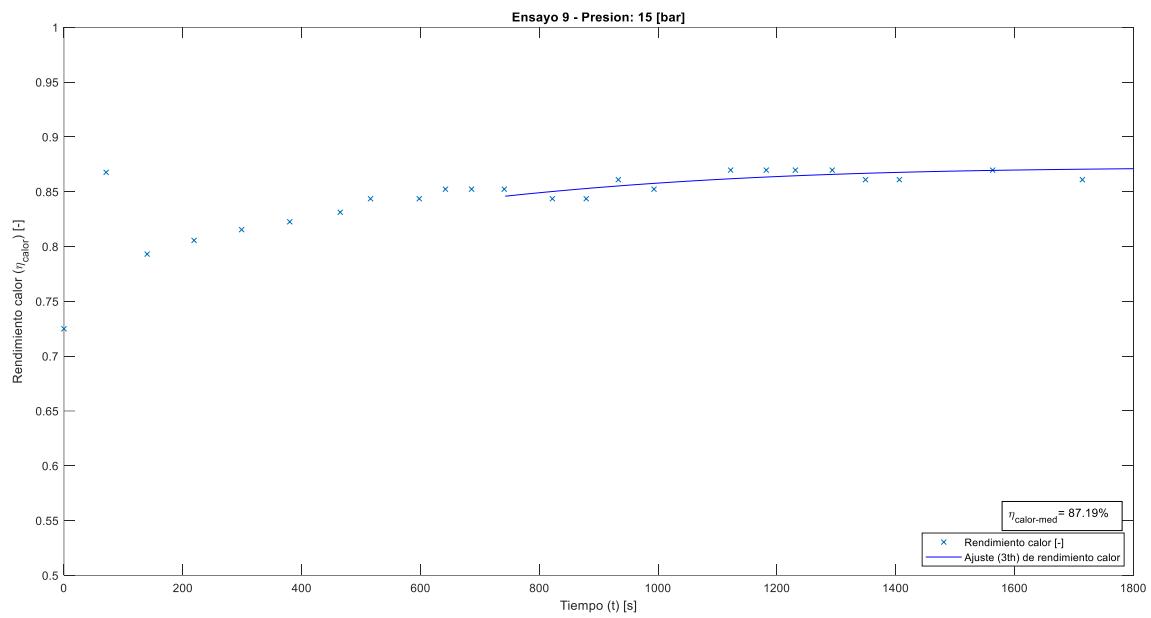


Figura 144. Gráfica de rendimiento calorífico en función del tiempo. Ensayo a  $P_{trab} = 15$  [bar] y sin tapa de entrada de aire.  $T_{ent,agua\_media}^a = 24.45^\circ\text{C}$ .

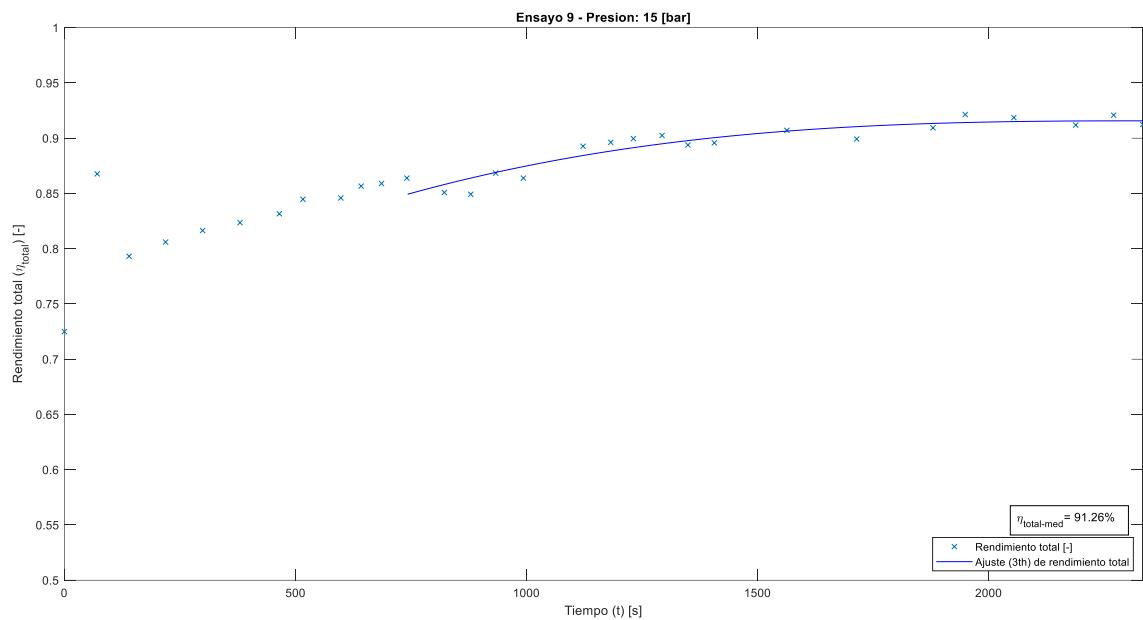


Figura 145. Gráfica de rendimiento total en función del tiempo. Ensayo a  $P_{trab} = 15$  [bar] y sin tapa de entrada de aire.  $T_{ent,agua\_media}^a = 24.45^\circ\text{C}$ .

8.7. Ensayo 7: sin tapa de entrada de aire, 15 bares de presión de trabajo y  $T_{ent,agua} = 27.15^\circ\text{C}$

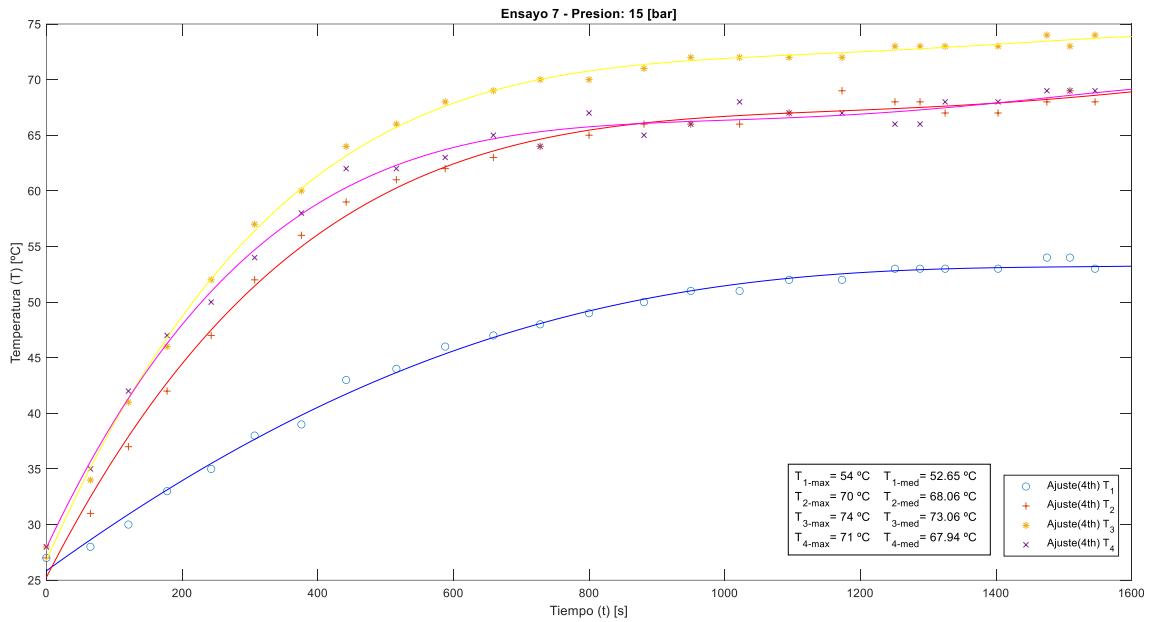


Figura 146. Gráfica de  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_3$  y  $T_4$  en función del tiempo del ensayo a  $P_{trab} = 15$  [bar] y sin tapa de entrada de aire.  $T_{ent,agua,media} = 27.15^\circ\text{C}$

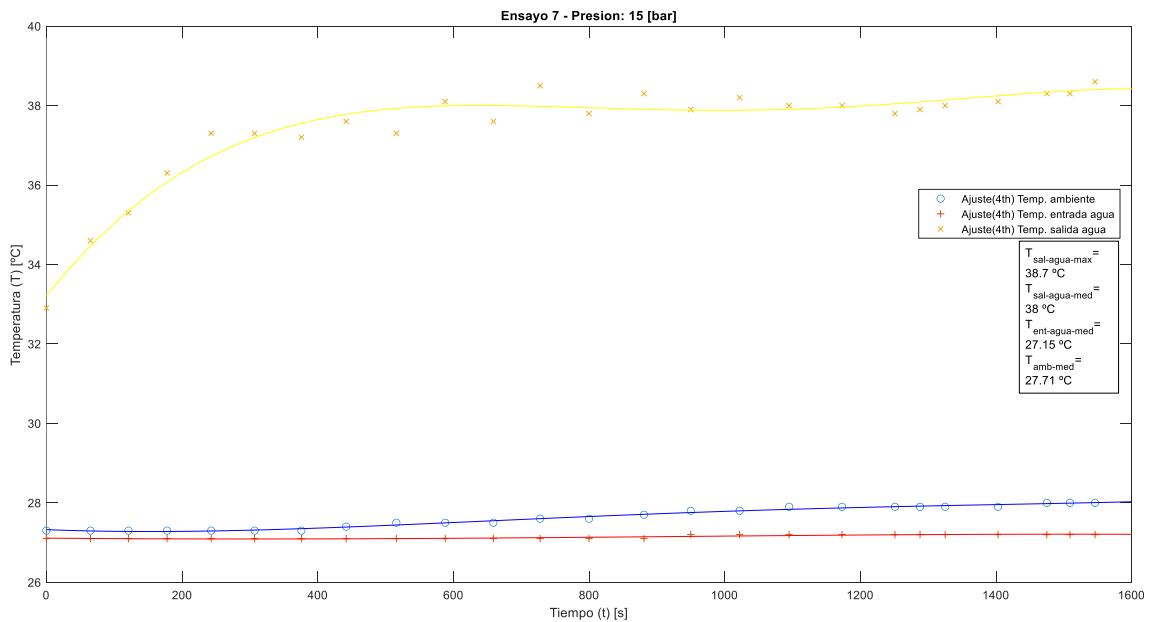


Figura 147. Gráfica de  $T_{\text{sal},\text{agua}}$ ,  $T_{\text{ent},\text{agua}}$ , y  $T_{\text{amb}}$  en función del tiempo. Ensayo a  $P_{trab} = 15$  [bar] y sin tapa de entrada de aire.

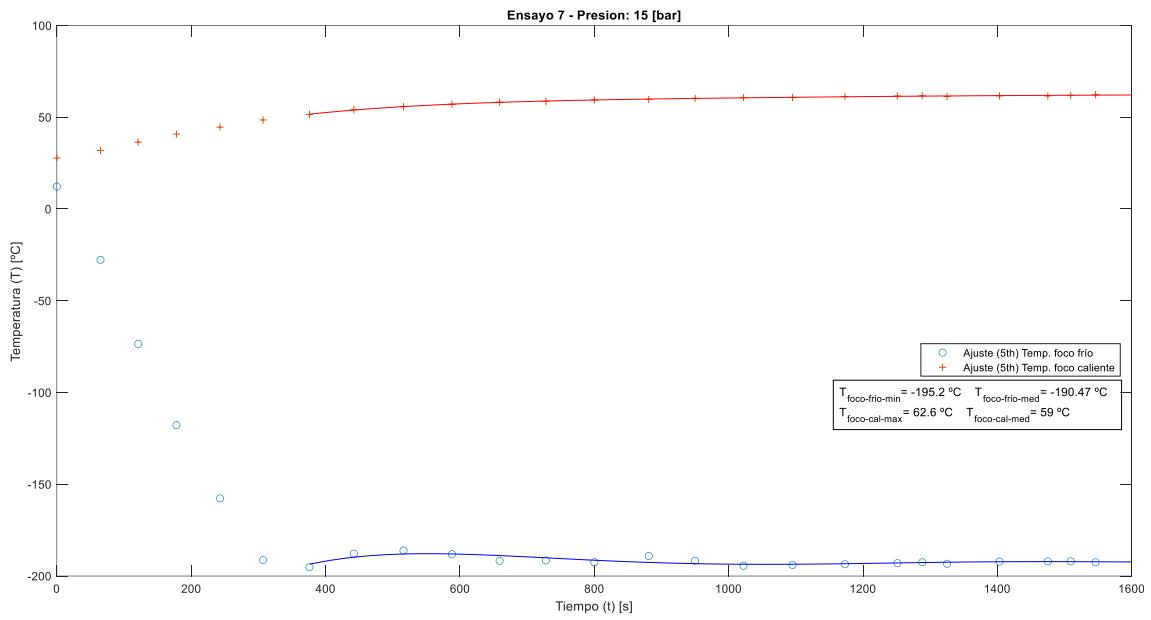


Figura 148. Gráfica de  $T_{ff}$  y  $T_{fc}$  en función del tiempo. Ensayo a  $P_{trab} = 15$  [bar] y sin tapa de entrada de aire.  $T_{ent,agua\_media}^a = 27.15\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

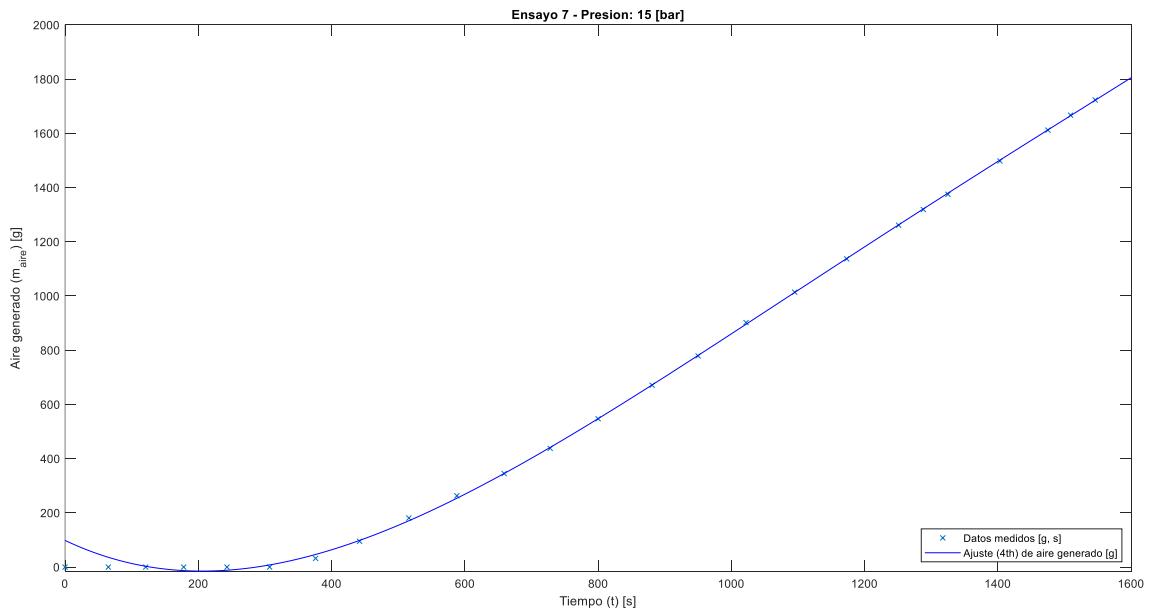


Figura 149. Gráfica de producción de aire líquido en función del tiempo. Ensayo a  $P_{trab} = 15$  [bar] y sin tapa de entrada de aire.  $T_{ent,agua\_media}^a = 27.15\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

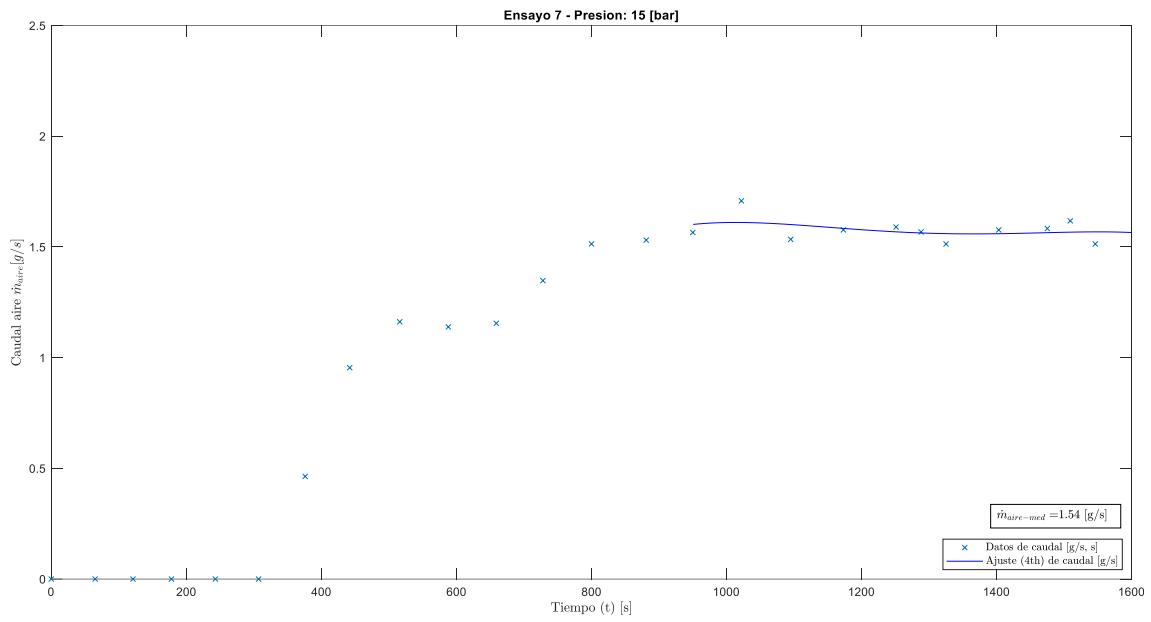


Figura 150. Gráfica de caudal de aire líquido generado en función del tiempo. Ensayo a  $P_{trab} = 15$  [bar] y sin tapa de entrada de aire.  $T_{ent,agua\_media}^a = 27.15^\circ\text{C}$ .

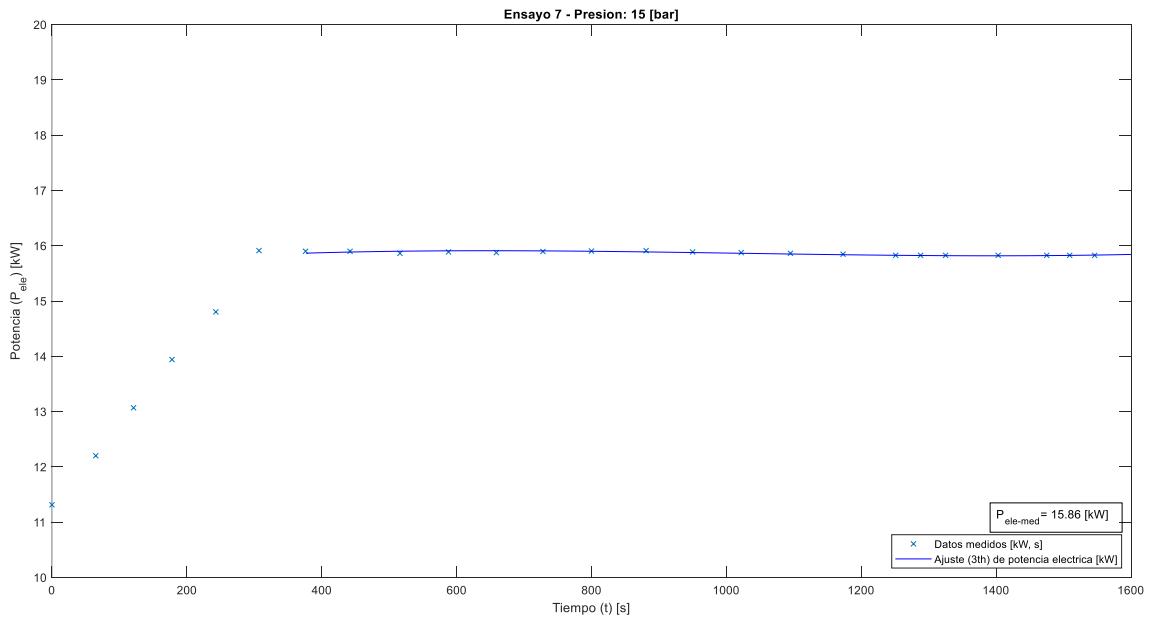


Figura 151. Gráfica de potencia eléctrica consumida en función del tiempo. Ensayo a  $P_{trab} = 15$  [bar] y sin tapa de entrada de aire.  $T_{ent,agua\_media}^a = 27.15^\circ\text{C}$ .

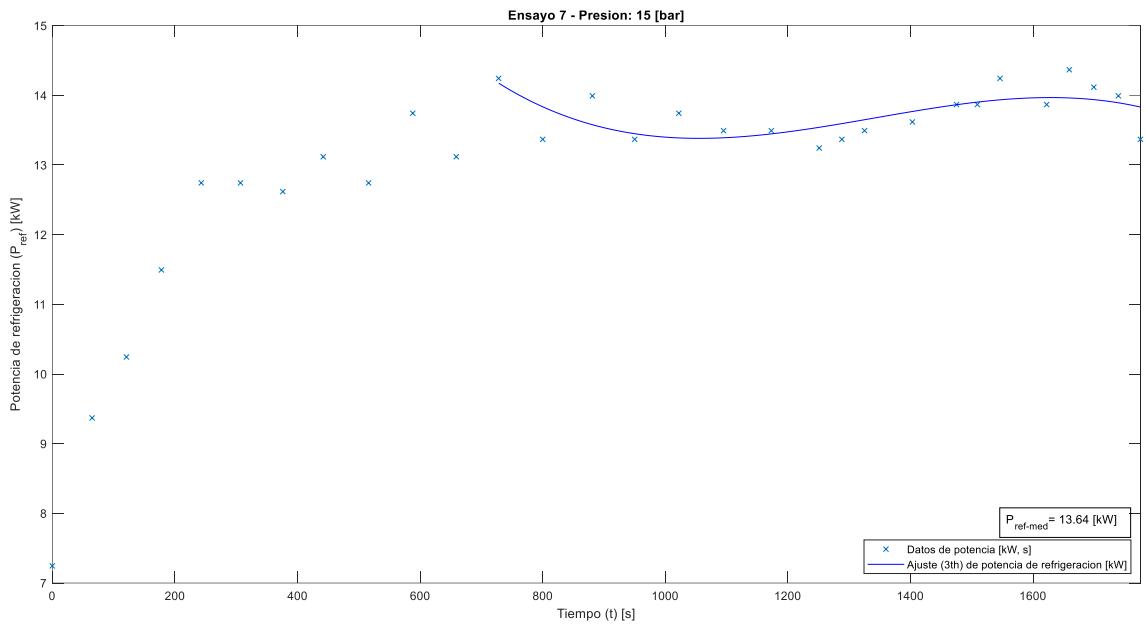


Figura 152. Gráfica de potencia de refrigeración en función del tiempo. Ensayo a  $P_{trab} = 15$  [bar] y sin tapa de entrada de aire.  $T_{ent,agua\_media}^a = 27.15^\circ\text{C}$ .

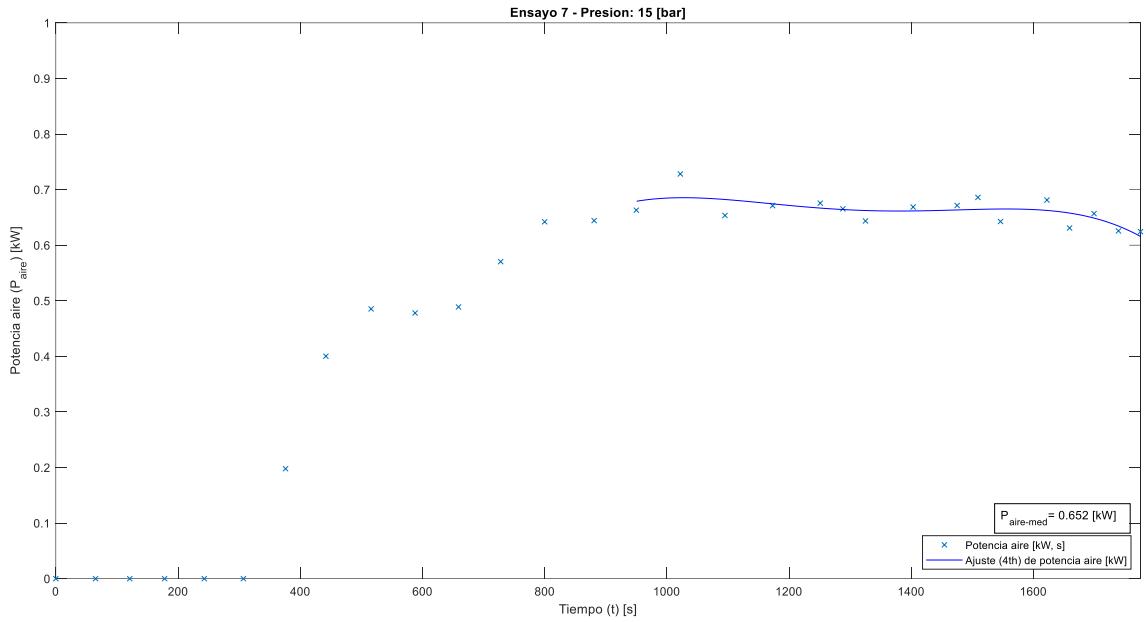


Figura 153. Gráfica de potencia extraída al aire en función del tiempo. Ensayo a  $P_{trab} = 15$  [bar] y sin tapa de entrada de aire.  $T_{ent,agua\_media}^a = 27.15^\circ\text{C}$ .

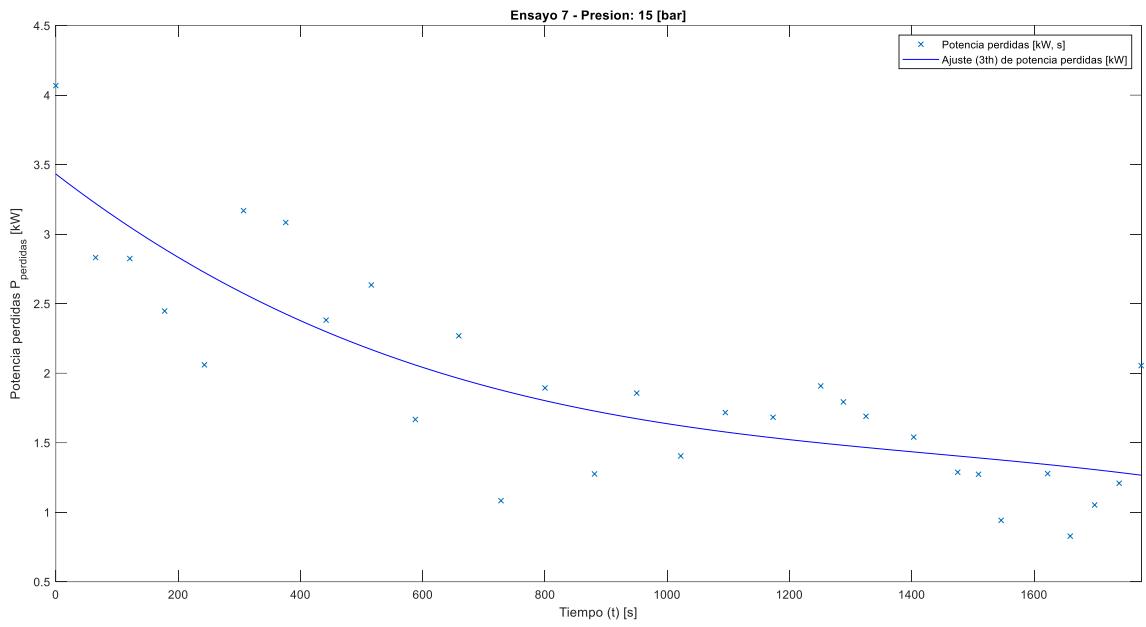


Figura 154. Gráfica de potencia de pérdidas en función del tiempo. Ensayo a  $P_{\text{trab}} = 15$  [bar] y sin tapa de entrada de aire.  $T_{\text{ent,agua media}}^{\text{a}} = 27.15^{\circ}\text{C}$ .

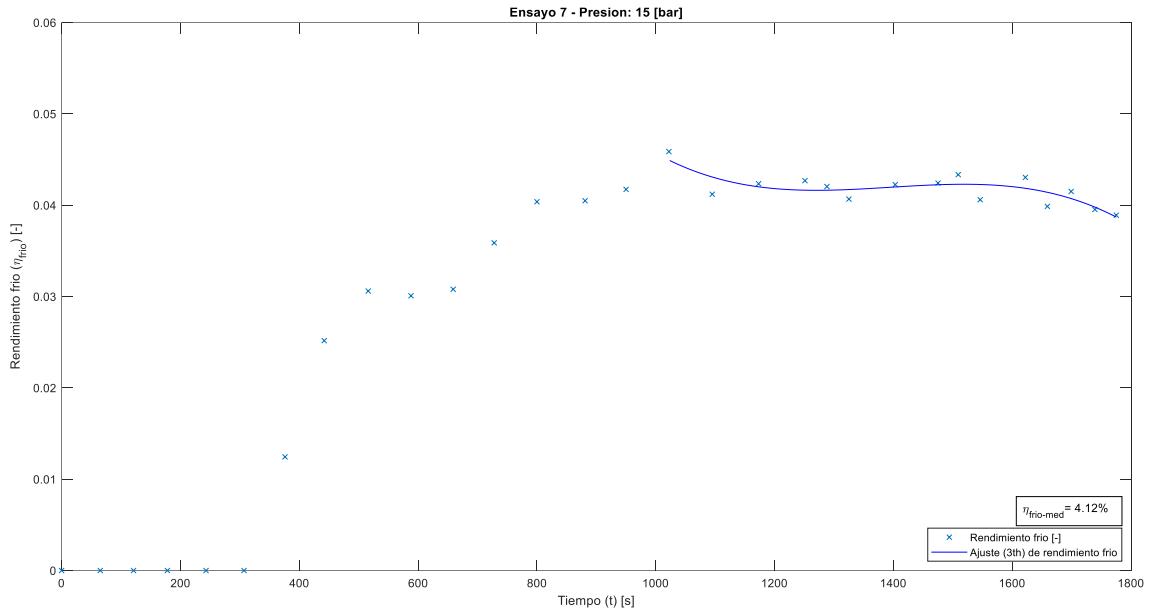


Figura 155. Gráfica de rendimiento frío en función del tiempo. Ensayo a  $P_{\text{trab}} = 15$  [bar] y sin tapa de entrada de aire.  $T_{\text{ent,agua media}}^{\text{a}} = 27.15^{\circ}\text{C}$ .

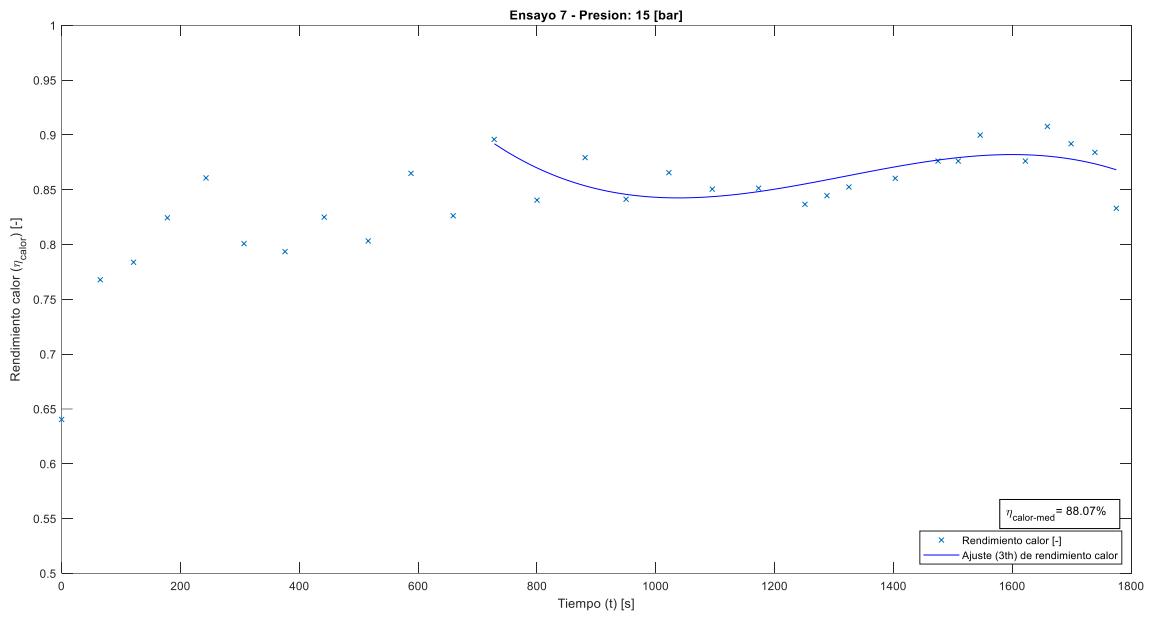


Figura 156. Gráfica de rendimiento calorífico en función del tiempo. Ensayo a  $P_{trab} = 15$  [bar] y sin tapa de entrada de aire.  $T_{ent,agua media}^a = 27.15^\circ C$ .

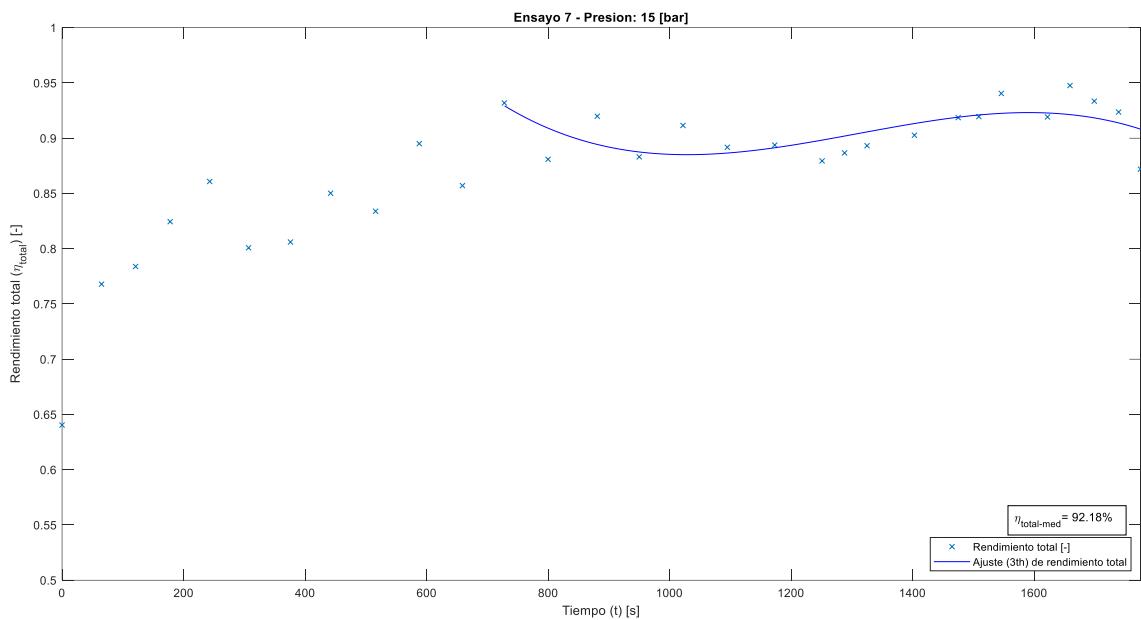


Figura 157. Gráfica de rendimiento total en función del tiempo. Ensayo a  $P_{trab} = 15$  [bar] y sin tapa de entrada de aire.  $T_{ent,agua media}^a = 27.15^\circ C$ .