



industriales  
etsii

Escuela Técnica  
Superior  
de Ingeniería  
Industrial

# UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial

## Estudio sobre el impacto en la demanda energética de una piscina climatizada con cloración salina

TRABAJO FIN DE MÁSTER

MÁSTER UNIVERSITARIO EN ENERGÍAS RENOVABLES

**Autora:** María Pilar Meseguer Sánchez

**Director:** José Pablo Delgado Marín



Universidad  
Politécnica  
de Cartagena

Cartagena, 9 de diciembre de 2020

# TRABAJO FIN DE MÁSTER

## MÁSTER UNIVERSITARIO EN ENERGÍAS RENOVABLES

Estudio sobre el impacto en la demanda energética de  
una piscina climatizada con cloración salina

Autora: María Pilar Meseguer Sánchez

Director: José Pablo Delgado Marín

## TABLA DE CONTENIDOS

Tabla de contenido.....	3
índice de tablas .....	5
índice de gráficos .....	6
Índice de imágenes .....	7
1. Resumen ejecutivo.....	8
2. Introducción .....	10
3. Legislación aplicable .....	12
4. Punto de partida .....	13
4.1. El problema de las cloraminas.....	13
4.2. Ventajas de la cloración salina .....	16
4.2.1. Cloración salina mediante electrólisis.....	17
4.2.2. Cloración salina mediante hidrólisis .....	18
4.3. Correlación entre CIC y número de bañistas .....	19
4.3.1. Línea de tendencia lineal .....	21
4.3.2. Línea de tendencia polinómica de orden dos .....	22
4.3.3. correlación entre CIC y número de bañistas .....	23
5. Descripción de la instalación .....	24
6. Modelado del sistema en TRNSYS .....	27
6.1. Descripción de los componentes en TRNSYS .....	28
6.1.1. Vaso de la piscina .....	28
6.1.2. Caldera de biomasa .....	32
6.1.3. Instalación solar térmica.....	33
6.2. Modelo 1 – Piscina con desinfección por cloro y renovación por normativa ..	34
6.2.1. Descripción del modelo .....	34
6.2.2. Resultados obtenidos.....	35
6.3. Modelo 2 – Piscina con desinfección por cloro y renovación en función de la generación de cloraminas .....	39
6.3.1. Características del modelo.....	39

6.3.2. Resultados obtenidos.....	41
6.4. Modelo 3 – Piscina con cloración salina por electrólisis .....	51
6.4.1. Características del modelo.....	51
6.4.2. Resultados obtenidos.....	53
6.5. Modelo 4 – Piscina con cloración salina por hidrólisis.....	57
6.5.1. Características del modelo.....	57
6.5.2. Resultados obtenidos.....	57
7. Análisis de resultados y conclusiones.....	61
7.1. Análisis de la demanda del vaso.....	61
7.2. Análisis de la evaporación de agua en los modelos 3 y 4 .....	64
7.3. Análisis de la producción de energía.....	65
8. Bibliografía.....	70

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Resumen de los resultados de los modelos (kWh) .....	9
Tabla 2: Cloro combinado y afluencia de bañistas .....	20
Tabla 3: Aumentos de CIC y afluencia de bañistas .....	20
Tabla 4: Cadencia horaria de bañistas en un día típico .....	30
Tabla 5: Demanda de energía térmica en modelo 1 .....	35
Tabla 6: Producción de energía térmica en modelo 1 .....	36
Tabla 7: Resumen de resultados en modelo 1 .....	37
Tabla 8: Demanda de energía térmica en modelo 2 .....	42
Tabla 9: Producción de energía térmica en modelo 2 .....	43
Tabla 10: Resumen de resultados en el modelo 2 .....	43
Tabla 11: Renovación de agua en los modelos 1 y 2 .....	47
Tabla 12: Resultados d el análisis de sensibilidad de la curva CIC-Bañistas .....	50
Tabla 13: Demanda de energía térmica en el modelo 3 .....	54
Tabla 14: Producción de energía térmica en el modelo 3 .....	55
Tabla 15: Resumen de resultados en el modelo 3 .....	55
Tabla 16: Demanda de energía térmica en el modelo 4 .....	58
Tabla 17: Producción de energía térmica en el modelo 4 .....	59
Tabla 18: Resumen de resultados en el modelo 4 .....	59
Tabla 19: Producción de energía térmica en el modelo 4 .....	60
Tabla 20: Tabla comparativa de la demanda del vaso en los cuatro modelos (kWh) ..	61
Tabla 21: Diferencia entre las demandas .....	63
Tabla 22: Análisis de la evaporación en los modelos 3 y 4. ....	64
Tabla 23: Análisis de la demanda en los modelos 3 y 4 .....	64
Tabla 24: Tabla comparativa de la producción de energía térmica en los 4 modelos	65
Tabla 25: Diferencia entre la generación de energía térmica .....	66
Tabla 26: Diferencia entre la producción de energía térmica en la caldera .....	68

## ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Nube de puntos de incremento de CIC frente al número de bañistas. ....	20
Gráfico 2: Línea de tendencia lineal.....	22
Gráfico 3: Línea de tendencia polinómica de orden 2.....	23
Gráfico 4: Temperaturas en el Modelo 1 .....	36
Gráfico 5: Producción de energía térmica en Modelo 1 .....	37
Gráfico 6: Demanda de energía térmica en el modelo 1 .....	38
Gráfico 7: Volumen de agua de renovación en modelo 1 .....	38
Gráfico 8: Temperaturas en el modelo 2 .....	42
Gráfico 9: Producción de energía térmica en el modelo 2 .....	44
Gráfico 10: Demanda del vaso en el modelo 2 .....	44
Gráfico 11: Volumen de agua de renovación en el modelo 2 .....	45
Gráfico 12: Concentración de cloro combinado en modelo 2 .....	46
Gráfico 13: Comparativa del agua de renovación entre los modelos 1 y 2 .....	48
Gráfico 14: Comparativa de la demanda térmica por renovación en modelos 1 y 2 ...	48
Gráfico 15: Rectas para analizar la sensibilidad del ajuste CIC-Bañistas.....	49
Gráfico 16: Variación de la densidad en función de la concentración de sal .....	52
Gráfico 17: Temperaturas en el modelo 3 .....	54
Gráfico 18: Producción de energía térmica en el modelo 3 .....	56
Gráfico 19: Demanda de energía térmica en el modelo 3 .....	56
Gráfico 20: Temperaturas en el modelo 4. ....	58
Gráfico 21: Demanda de energía térmica en el modelo 4.....	60
Gráfico 22: Demanda de energía térmica en los cuatro modelos .....	62
Gráfico 23: Demanda de energía térmica del vaso mes a mes en los 4 modelos .....	62
Gráfico 24: Producción de energía térmica en los cuatro modelos.....	65
Gráfico 25: Producción mensual de energía térmica en los cuatro modelos. ....	66
Gráfico 26: Energía solar térmica generada cada mes.....	67
Gráfico 27: Energía generada en la cadera mes a mes. ....	68
Gráfico 28: Producción de energía térmica en la caldera.....	69

## ÍNDICE DE IMÁGENES

Imagen 1: Cloro libre y cloro combinado .....	13
Imagen 2: Parámetros indicadores de la calidad del agua según RD 742/2013 .....	14
Imagen 3: Sistema de cloración salina. Fuente: Piscinas Ferromar .....	16
Imagen 4: localización de la piscina cubierta de Archena. ....	24
Imagen 5: Vista interior de la piscina cubierta de Archena.....	24
Imagen 6: Instalación solar térmica en la piscina cubierta de Archena.....	25
Imagen 7: Caldera de pellets LASSIAN.....	26
Imagen 8: Esquema de la instalación térmica de la piscina de Archena. ....	26
Imagen 9: Componente vaso de la piscina en TRNSYS .....	28
Imagen 10: Anexo 1- Tablas Guía Técnica de Agua Caliente Sanitaria Central. ....	29
Imagen 11: Módulo Tred en TRNSYS. ....	29
Imagen 12: Número de bañistas en TRNSYS.....	30
Imagen 13: Módulo Weather Data en TRNSYS .....	31
Imagen 14: Instalación de la caldera de biomasa y los equipos auxiliares .....	32
Imagen 15: Caldera de biomasa en TRNSYS .....	32
Imagen 16: Instalación solar térmica en TRNSYS.....	33
Imagen 17: Información sobre los paneles solares térmicos.....	33
Imagen 18: Detalle de renovaciones por incremento de cloro combinado .....	46
Imagen 19: Variación de la densidad del agua según la salinidad.....	52

## 1. RESUMEN EJECUTIVO

Las piscinas climatizadas, a pesar de su popularidad, son instalaciones muy intensivas energéticamente, ya que el hecho de mantener las condiciones adecuadas de confort definidas en la normativa tanto en el agua del vaso como en el aire interior durante todos los meses del año implica un gran consumo de energía térmica.

Para conseguir una adecuada desinfección residual del agua, suele emplearse el cloro (o sus derivados) como agente desinfectante. Aunque la presencia de cloro residual en la piscina es garantía de que el agua se mantendrá desinfectada a lo largo del tiempo, un nivel excesivo conlleva efectos indeseables sobre la salud de los bañistas, como irritación de piel y ojos y daño en el cabello, pues reacciona con la carga orgánica presente en el agua y se generan las cloraminas<sup>1</sup>, los compuestos responsables de estos efectos indeseables.

Con el objetivo de controlar la presencia de las cloraminas, las instalaciones están obligadas a llevar a cabo una **renovación permanente del volumen de agua del vaso**. Este vaciado continuo del vaso (cuya agua se encuentra a temperatura de baño) y rellenado con agua nueva a temperatura de la red es responsable de una parte importante de la demanda energética de la piscina climatizada.

Por lo tanto, para eliminar el problema de la generación de cloraminas y disminuir así tanto el volumen de agua renovada como el consumo energético asociado a su calentamiento, en los últimos años hemos presenciado una creciente transformación de las piscinas cloradas con productos químicos al uso de sistemas de **cloración salina**, que consiguen la desinfección del agua mediante un proceso de electrólisis y una cierta presencia de sal en el agua.

El objetivo de este Trabajo Fin de Máster es modelar el comportamiento dinámico del vaso de una piscina cubierta que utilice un sistema de cloración salina, para analizar la reducción en la demanda energética causada por esta tecnología. La instalación que se empleará será la piscina municipal de Archena, que cuenta con una instalación solar térmica y una caldera de biomasa para cubrir la demanda energética de la instalación.

En total se analizarán cuatro modelos:

1. Piscina clorada con productos químicos y con una renovación diaria del agua del vaso del 2.5% (según normativa).
2. Piscina clorada con productos químicos y con renovación de agua calculada según el incremento de cloraminas debido a la presencia de bañistas.

3. Piscina con cloración salina, con una concentración de sal de 3g/l.
4. Piscina con cloración salina de baja concentración, con una concentración de sal de 1.5g/l.

Para ello se utilizará el programa de simulación dinámica TRNSYS.

En la tabla 1 se muestra un resumen de la generación de energía térmica de cada uno de los cuatro modelos analizados.

	<b>Modelo 1 Cloración tradicional (normativa)</b>	<b>Modelo 2 Cloración tradicional (CIC)</b>	<b>Modelo 3 Cloración salina por electrólisis</b>	<b>Modelo Cloración salina por hidrólisis</b>
<b>Q solar</b>	166,061	166,412	165,532	165,697
<b>Q caldera</b>	215,968	278,209	122,683	126,126
<b>Q total</b>	<b>382,028</b>	<b>444,621</b>	<b>288,215</b>	<b>291,823</b>

*Tabla 1: Resumen de los resultados de los modelos (kWh)*

Tras analizar los resultados obtenidos, las conclusiones de este Trabajo Fin de Máster se pueden reducir en:

- Según el modelo de aumento de cloro combinado en función de la presencia de bañistas calculado a partir de los datos proporcionados por el Ayuntamiento de Águilas, una renovación diaria de un 2.5% no sería suficiente para mantener las cloraminas por debajo de los límites establecidos por la normativa, debiendo aumentarse la cifra de renovación diaria hasta un 4.3%.
- Al cambiar un sistema de cloración tradicional por uno de cloración salina (ya sea por electrólisis o hidrólisis), la generación de térmica para cubrir las necesidades de la piscina se reduce en un 24-25%.
- En concreto, si analizamos por separado la energía generada en la instalación solar térmica y en la caldera de biomasa, podemos concluir que la reducción de energía térmica se debe única y exclusivamente a la reducción de la energía en la caldera, cuyo consumo se reduce un 42-43%. Esto implica un ahorro directo del 42-43% en la factura anual de combustible.

## 2. INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas, con el desarrollo de la sociedad del bienestar, se ha observado un importante aumento en la práctica deportiva en nuestro país. Como consecuencia, el número de instalaciones deportivas ha aumentado, entre las que destacamos el aumento del número de piscinas climatizadas<sup>2</sup>. De hecho, según el último Censo Nacional de Instalaciones Deportivas realizado en 2005<sup>3</sup>, en España existen 26.938 vasos de piscina destinadas al uso deportivo, siendo éstas mayoritariamente piscinas climatizadas.

Las piscinas climatizadas, a pesar de su popularidad, son muy intensivas en demanda de energía<sup>4</sup>, ya que el hecho de mantener las condiciones adecuadas de confort establecidas en la normativa durante todos los meses del año implica un gran consumo de energía térmica.

En concreto, de acuerdo con el Reglamento de Instalaciones Técnicas de Edificios<sup>5</sup>, la temperatura del agua de la piscina debe mantenerse entre 24 y 30°C, aunque para actividades deportivas de entrenamiento y competición, la temperatura del vaso no debería superar los 25°C, la temperatura del aire de las piscinas cubiertas debe ser de 1 a 2°C mayor que la temperatura del agua y la humedad relativa no debe en ningún momento igualar o superar el 65%.

Por otro lado, además de tener que cumplir con estas estrictas condiciones de temperatura y humedad, es muy importante que las piscinas cumplan los criterios técnico sanitarios establecidos en el Real Decreto 742/2013 de 27 de septiembre<sup>6</sup> orientados a la promoción de la salud y la prevención de enfermedades, donde se definen tanto los indicadores a cumplir como la frecuencia mínima de muestreo.

Así, para conseguir una adecuada desinfección residual del agua, suele emplearse el cloro y sus derivados como agente desinfectante. Aunque la presencia de cloro residual en la piscina es garantía de que el agua se mantendrá desinfectada a lo largo del tiempo, un nivel excesivo conlleva efectos indeseables sobre la salud de los bañistas<sup>7</sup>, como irritación de piel y ojos y daño en el cabello. Además, el uso de compuestos clorados conlleva riesgos más severos para el personal de mantenimiento responsable de su manipulación<sup>8</sup>, como son la inhalación de gases tóxicos e irritaciones al entrar en contacto con piel y ojos<sup>9</sup>.

Estos efectos nocivos para la salud se producen cuando el cloro entra en contacto con los compuestos nitrogenados que permanecen en el agua como consecuencia de la presencia de bañistas (como son el sudor, la saliva o la orina), generándose así las

cloraminas, unos compuestos altamente irritantes y cuya presencia es necesario controlar y mantener por debajo de un estricto nivel.

Con el objetivo de controlar la presencia de cloraminas, las instalaciones están obligadas a llevar a cabo una **renovación permanente del volumen de agua del vaso**. Este vaciado continuo del vaso (cuya agua se encuentra a temperatura de baño) y rellenado con agua nueva a temperatura de la red es responsable de una parte importante de la demanda energética de la piscina climatizada.

Por lo tanto, para eliminar el problema de la generación de cloraminas y disminuir así tanto el volumen de agua renovada como el consumo energético asociado a su calentamiento, se está popularizando el uso de sistemas de **cloración salina**, que consiguen la desinfección del agua mediante un proceso de electrólisis o hidrólisis y una concentración de hasta 5 g/l de sal.

El objetivo de este Trabajo Fin de Máster es modelar el comportamiento dinámico del vaso de una piscina cubierta que utilice un sistema de cloración salina, para analizar la reducción de la demanda energética causada por esta tecnología. Para ello se utilizará el programa de simulación dinámica TRNSYS.

En total se analizarán cuatro modelos:

5. Piscina clorada con productos químicos y con una renovación diaria del agua del vaso del 2.5% (según normativa)
6. Piscina clorada con productos químicos y con renovación de agua calculada según incremento de cloraminas debido a la presencia de bañistas.
7. Piscina con cloración salina, con una concentración de sal de 3g/l.
8. Piscina con cloración salina de baja concentración, con una concentración de sal de 1.5g/l.

Una vez definidos los modelos, se analizarán las demandas de energía de cada uno de ellos y se estudiará el ahorro energético que supone el cambio a un sistema de cloración salina.

### 3. LEGISLACIÓN APLICABLE

En este proyecto se tendrá en cuenta los siguientes Reglamentos, Normas y Ordenanzas de obligado cumplimiento y consulta:

- Documento Básico HE de Ahorro de Energía, Código Técnico de la Edificación<sup>10</sup>.
- Documento Básico HS de Salubridad, Código Técnico de la Edificación<sup>11</sup>.
- Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios.
- Real Decreto 1341/2007, de 11 de octubre<sup>12</sup>
- Real Decreto 742/2013, de 27 de septiembre
- Decreto 58/1992 de la Región de Murcia, de 28 de mayo<sup>13</sup>

## 4. PUNTO DE PARTIDA

### 4.1. EL PROBLEMA DE LAS CLORAMINAS

El tratamiento más habitual en la desinfección del agua de piscinas es la cloración tradicional, especialmente en piscinas públicas con una gran afluencia de bañistas. Este tratamiento consiste en la dosificación de compuestos químicos derivado del cloro, ya sea en forma líquida, granulado o en tabletas, donde el cloro actúa como oxidante de los compuestos orgánicos nitrogenados presentes en el agua del vaso.

El cloro total<sup>14</sup> añadido de este modo a la piscina puede encontrarse en el agua principalmente en dos estados: como **cloro libre** o como **cloro combinado con materia orgánica** (cloro combinado), siendo la suma de ambas concentraciones el **cloro total** (imagen 1).



Imagen 1: Cloro libre y cloro combinado

El **cloro libre** es el responsable de la desinfección del agua, evitando el desarrollo de bacterias, algas y microorganismos al reaccionar con la materia orgánica presente en el agua mediante procesos de oxidación y combinación química. Dicho de otra manera, el cloro libre es el compuesto desinfectante que es necesario mantener en unos niveles adecuados para conservar el agua de la piscina en unas condiciones óptimas.

Sin embargo, el **cloro combinado no tiene ninguna capacidad desinfectante**<sup>15</sup>. Este compuesto aparece como resultado de la mezcla del ácido hipocloroso (compuesto derivado de la reacción del cloro con el agua) con la materia orgánica presente en el agua (sudor, saliva, orina y otros elementos orgánicos presentes en el agua). La única forma de acabar con esta sustancia es añadiendo más cloro o renovando el agua del vaso hasta reducir su concentración.

A diferencia del cloro libre, cuya presencia no supone ninguna molestia para el bañista en sus concentraciones habituales, el cloro combinado, y más concretamente las **cloraminas** (cloro combinado con sustancias nitrogenadas), tienen un gran impacto sobre la salud de los bañistas<sup>16</sup>. De acuerdo con Neumosur (Asociación de Neumología y Cirugía Torácica del Sur de España), las cloraminas pueden llegar a lesionar el epitelio pulmonar y provocar síntomas asmáticos (tos, pitos en el pecho y ahogo) o incluso provocar asma en niños con predisposición<sup>1718</sup>.

El cloro combinado es, por tanto, un indicador de una piscina con elevada carga orgánica. Para reducir su presencia en el agua es muy importante mantener el cloro combinado por debajo del nivel máximo establecido por la normativa (0.6 mg/l). Para minimizar su formación es esencial contar con un diseño hidráulico correcto y con una bomba de circulación adecuada, así como realizar un buen mantenimiento y limpieza del filtro que elimine la suciedad introducida en la piscina.

Sin embargo, hay un factor sobre el que no se puede actuar de manera directa, y es la **higiene de los bañistas**. A pesar de la obligatoriedad del uso de gorros en la piscina y de la ducha antes del baño para evitar el aporte de cremas, etc. los niveles de cloramina son mayores en las piscinas cubiertas, donde el agua se encuentra a una mayor temperatura y donde no se pueden controlar las condiciones higiénicas de los nadadores.

Por este motivo, podemos concluir que la presencia de cloraminas en una piscina cubierta con un funcionamiento hidráulico correcto y con un buen mantenimiento del filtro se debe exclusivamente a la presencia de bañistas, guardando ambas variables una relación que podemos asumir como directa.

El Real Decreto 742/2013, de 27 de septiembre, establece en el Anexo I el valor máximo bajo el cual se debe mantener el cloro combinado para cumplir con las condiciones higiénico sanitarias (imagen 2).

Desinfectante residual:				
Cloro libre residual	0,5 – 2,0 Cl <sub>2</sub>	mg/L	Se controlará cuando se utilice cloro o derivados del cloro como desinfectante.	En caso de ausencia o superación de 5 mg/L se cerrará el vaso hasta normalización del valor; en caso de piscinas cubiertas además se intensificará la renovación del aire.
Cloro combinado residual	≤ 0,6 Cl <sub>2</sub>	mg/L	Se controlará cuando se utilice cloro o derivados del cloro como desinfectante.	En caso de superación de 3 mg/L se cerrará el vaso hasta normalización del valor; en caso de piscinas cubiertas además se intensificará la renovación del aire.

Imagen 2: Parámetros indicadores de la calidad del agua según RD 742/2013

Cuando se supera el valor de 0.6mg/l de cloro combinado, es necesario reducir el valor por medio de renovación de agua del vaso.

Este aporte mínimo de agua nueva diaria de renovación se estableció en un 2.5% en el Decreto nº 58/1992, de 28 de mayo, por el que se aprueba el reglamento sobre condiciones higiénico-sanitarias de las piscinas de uso público de la Región de Murcia. En concreto, en su artículo 16, estipula que *«El aporte de agua nueva será realizado una vez al día como mínimo, y además, siempre que sea necesaria, en una cantidad de al menos un 2.5% de capacidad; cada 40 días, la suma de las aportaciones diarias de agua nueva no podrá ser inferior al volumen de agua del vaso»*

Es decir, el volumen mínimo de renovación diario sería:

$$V_{min} = \frac{100\% \text{ volumen de agua del vaso}}{40 \text{ días}} = 2.5\% \text{ diario}$$

Sin embargo, en la práctica se demostró que una renovación diaria de un 2.5% no era suficiente para reducir el nivel de cloro combinado en piscinas de una afluencia de en torno a 300 bañistas diarios, por lo que esta cifra suele ser incluso más restrictiva en otras legislaciones regionales. Por ejemplo, el Decreto 95/2000 de la Generalidad de Cataluña recomienda una aportación de agua procedente de abastecimiento público no inferior al 5% del volumen del vaso. Además, en la práctica, una renovación del 5% suele ser lo necesario para mantener el cloro combinado por debajo de los valores establecidos en la normativa.

Así, en piscinas semiolímpicas, con 25 metros de longitud, 12.5 metros de anchura y una profundidad media de 2 metros, una renovación diaria del 5% supone que cada día se eliminan 31.25 m<sup>3</sup> de agua y se consume esa misma cantidad de agua de la red, una cifra muy elevada si tenemos en cuenta las deficiencias hídricas que sufre gran parte del territorio nacional y, en particular, la Región de Murcia.

Ante el despilfarro de agua que supone mantener los niveles de cloro combinado por debajo de los límites contemplados en la normativa, en los últimos años se han popularizado los cloradores salinos, que se detallarán en el siguiente apartado.

## 4.2. VENTAJAS DE LA CLORACIÓN SALINA

Desde hace un tiempo, los sistemas de cloración salina<sup>19</sup> se han vuelto muy populares entre aquellos que desean reducir el consumo de agua y de energía de su instalación, a la vez que consiguen un agua de mejor calidad.

La cloración salina funciona gracias a la adición de una pequeña cantidad de sal al agua, en una cantidad muy inferior a la del agua de mar, pero suficiente para aportar el cloro necesario para asegurar una correcta desinfección del agua<sup>20</sup>. Así, los sistemas de cloración salina funcionan en un sistema cerrado de generación de cloro por electrólisis salina, lo que elimina la necesidad de un aporte constante de cloro. En su lugar, se sustituye por la adición de pequeñas cantidades de sal para cubrir las posibles pérdidas que puedan darse en el filtro.

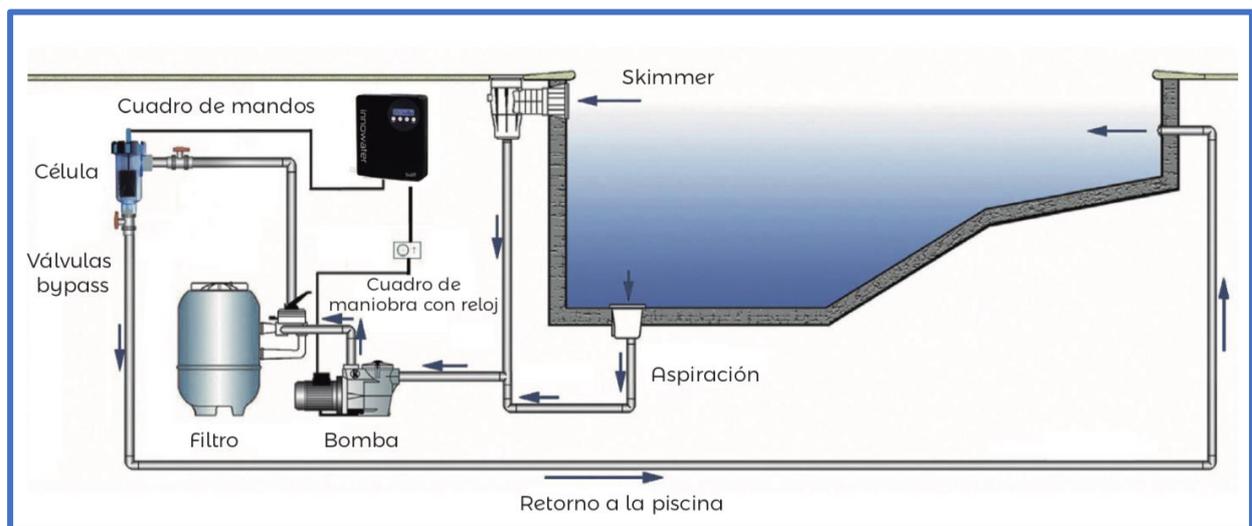


Imagen 3: Sistema de cloración salina. Fuente: Piscinas Ferromar

Las ventajas de los sistemas de cloración salina son varias<sup>21</sup>. A continuación, enumeramos algunas de las principales:

- Se elimina la presencia de las cloraminas, pues éstas son destruidas en la célula del electrolizador, que está en funcionamiento durante varias horas al día.
- Al eliminar las cloraminas, se eliminan también los efectos nocivos descritos en el apartado anterior, haciendo que el baño sea más agradable para todos los bañistas.

- Al no haber cloraminas, no es necesario renovar agua, pues se pueden mantener las condiciones higiénico-sanitarias sin necesidad de realizar ninguna renovación.
- Es un sistema más económico, pues se elimina el coste del cloro, del agua de renovación y de la energía necesaria para su acondicionamiento térmico.
- Se eliminan los riesgos de la manipulación del cloro, cambiando este compuesto altamente tóxico por sal común.

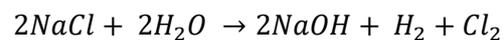
Dentro de los cloradores salinos<sup>22</sup>, podemos diferenciar entre los clásicos mediante electrólisis, y los de baja salinidad, mediante hidrólisis.

#### 4.2.1. CLORACIÓN SALINA MEDIANTE ELECTRÓLISIS

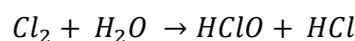
La concentración de sal que se necesita en el agua oscila entre los 2 y los 5 gramos por litro, concentración muy inferior a la del agua del mar, que suele ser superior a 30 gramos por litro.

El funcionamiento de estos sistemas de cloración se basa en el uso de un electrodo formado por placas alimentadas por corriente continua. Al pasar el agua por las membranas, se genera un proceso de electrólisis que separa las moléculas de agua.

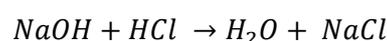
La reacción química del proceso es la siguiente:



Así, durante la electrólisis salina, el agua y la sal forman NaOH (sosa cáustica), gas hidrógeno y gas cloro. A continuación, el cloro se disuelve en el agua y forma, por un lado, ácido hipocloroso y por otro, ácido clorhídrico:



El ácido hipocloroso es un compuesto desinfectante que se encarga de la esterilización del agua. Por último, una vez desinfectada el agua, la sosa y el ácido clorhídrico sufren una reacción de neutralización tras el cual se forma de nuevo la sal en un circuito cerrado, donde las pérdidas sólo se producen en el sistema de filtrado previo a la célula electrolítica, y pueden considerarse casi despreciables:



#### 4.2.2. CLORACIÓN SALINA MEDIANTE HIDRÓLISIS

Los sistemas de cloración de baja salinidad (de entre 1 y 2 gramos de sal por litro de agua) consiguen la desinfección del agua mediante la combinación del proceso de electrólisis descrito en el punto anterior con el proceso de hidrólisis.

Por un lado, la electrólisis aporta el cloro contenido en la sal para conseguir eliminar gran parte de los compuestos orgánicos presentes en el agua. Una vez ejercida la desinfección necesaria del agua, la sal volverá a su forma original y cerrará el ciclo.

Por otro lado, la desinfección conseguida con la electrólisis de la sal se completa con la hidrólisis del agua, proceso con el que se consigue romper la molécula del agua  $H_2O$  en  $H_2$  y  $O_2$ , aunque durante este proceso de hidrólisis se producen también reacciones secundarias que dan como resultado compuestos iónicos con alto poder oxidante y desinfectante, como son el ion de hidroxilo ( $OH^-$ ), el ozono ( $O_3$ ), el oxígeno monoatómico ( $O$ ) o el peróxido de hidrógeno ( $H_2O_2$ ).

Estos sistemas, a pesar de que pueda parecer que tienen un consumo eléctrico muy elevado, suelen tener una potencia del orden de 1.5kW. De acuerdo a los datos proporcionados por el personal de mantenimiento de la piscina de la Universidad de Murcia, la cual cuenta con un sistema de cloración salina por hidrólisis, funciona unas 4,800h/año. Es decir, el consumo eléctrico de estos sistemas es del orden de:

$$E_{e \text{ hidrólisis}} = 1.5kW \cdot 4,800h = 7,200kWh$$

Dado que el consumo de una piscina climatizada es del orden de 300MWh al año, podemos considerar el consumo energético de estos equipos despreciable.

### 4.3. CORRELACIÓN ENTRE CLC Y NÚMERO DE BAÑISTAS

Como se ha comentado previamente, la presencia de cloro combinado (CIC) se debe única y exclusivamente a la presencia de bañistas. Por este motivo, para poder simular el aumento del cloro combinado, es necesario establecer una correlación entre ambas variables.

Para ello, se ha contactado con los responsables de varias piscinas climatizadas de la Región de Murcia para solicitar información acerca de los registros de número de bañistas y de mediciones de cloro combinado, pero en ninguna piscina se registra el número de bañistas de una forma precisa o no disponen del histórico de las mediciones de cloro combinado.

En este contexto, los datos de la piscina de Águilas han sido los más constantes en la medición y en el registro de los valores de cloro combinado y número de bañistas, por lo que se han tomado esos valores como referencia. No obstante, a pesar de que los datos de cloro combinado se miden en la piscina de referencia diariamente a las 9:00h de la mañana y a las 16:00h de la tarde, se ha encontrado alguna laguna en los datos. Para salvaguardar este problema y teniendo en cuenta que la afluencia de bañistas suele estar en torno a 300 diarios, estas lagunas se han estimado como:

- 300 bañistas cuando hace 24h de la última toma de datos
- 180 bañistas cuando hace 17h de la última toma de datos
- 120 bañistas cuando hace 7h de la última toma de datos.

Como ejemplo, se presentan los datos facilitados para una semana de enero de 2018, donde además se ha calculado la diferencia de cloro combinado entre dos datos consecutivos.

	Día	Hora	CIC	Nb total	DifCIC
<b>Enero Semana 2</b>	8	9:00	0,55	327	-0,02
	8	16:00	0,56	125	0,01
	9	9:00	0,58	193	0,02
	9	16:00	0,55	109	-0,03
	10	9:00	0,56	185	0,01
	10	16:00	0,56	126	0
	11	9:00	0,57	178	0,01
	11	16:00	0,57	114	0
	12	9:00	0,59	<b>180</b>	0,02

	Día	Hora	CIC	Nb total	DifCIC
	12	16:00	0		

Tabla 2: Cloro combinado y afluencia de bañistas

Para el estudio que nos ocupa únicamente tendremos en cuenta los **aumentos del cloro combinado**, ya que su reducción se debe exclusivamente a la renovación diaria que se hace en la piscina. Teniendo esto en cuenta y, a modo de ejemplo, la tabla 2 se reduciría a:

	Día	Hora	CIC	Nb total	DifCIC
<b>Enero Semana 2</b>	8	16:00	0,56	125	0,01
	9	9:00	0,58	193	0,02
	10	9:00	0,56	185	0,01
	11	9:00	0,57	178	0,01
	12	9:00	0,59	180	0,02

Tabla 3: Aumentos de CIC y afluencia de bañistas

Tras eliminar todos los datos atípicos, procedemos a procesar los datos de un año completo con ayuda de una hoja de cálculo Excel, y obtenemos el gráfico 1 de dispersión:

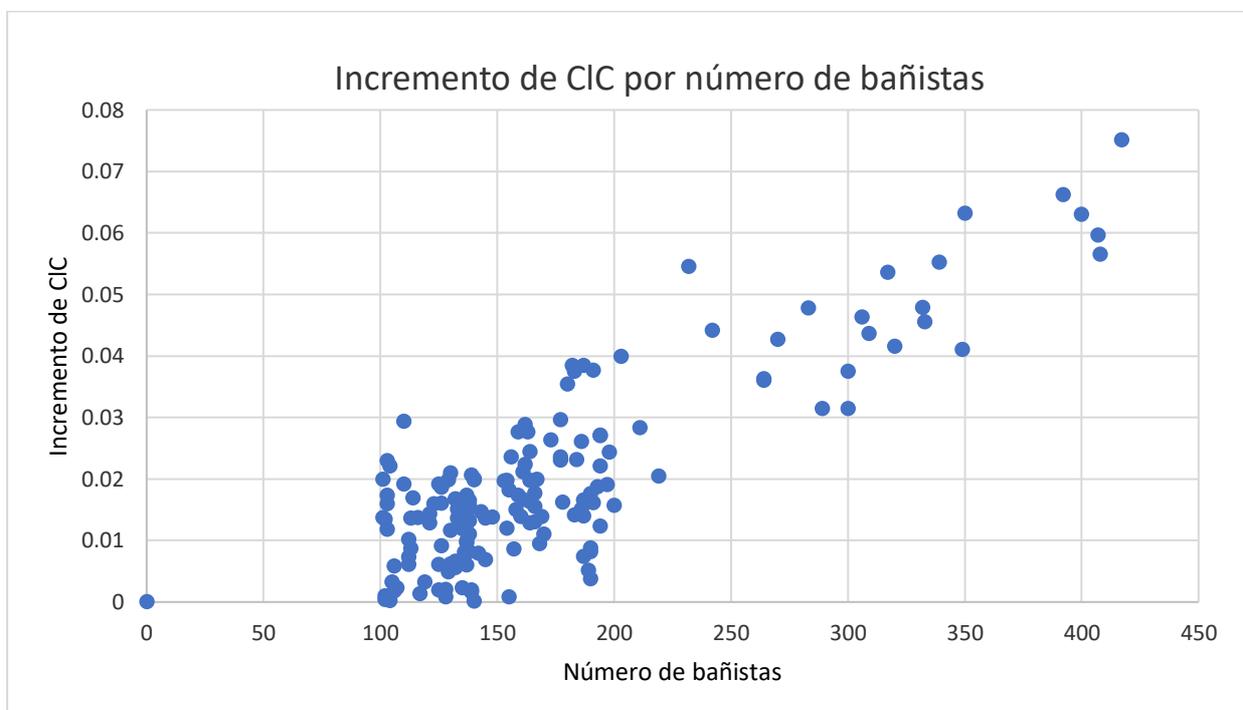


Gráfico 1: Nube de puntos de incremento de CIC frente al número de bañistas.

En este punto, es necesario seleccionar la línea de tendencia que se adecúe mejor a los datos de los que disponemos. La línea de tendencia nos va a permitir relacionar las dos variables a través de una expresión matemática del tipo:

$$y = f(x)$$

Donde:

- $y$ : incremento del cloro combinado en mg/l
- $x$ : número de bañistas

Para obtener la expresión matemática que combine ambas variables, comparamos las líneas de tendencia lineal y polinómica de orden dos junto con su coeficiente de regresión ( $R^2$ ), y seleccionaremos aquella donde el coeficiente  $R^2$  se aproxime más a uno, pues eso nos indicará un mejor ajuste de la curva a los datos.

Además, como el incremento del cloro combinado se debe única y exclusivamente a la presencia de materia orgánica aportada por los bañistas, se ha añadido al conjunto de datos el punto (0,0) y se forzará a las líneas de tendencia a pasar por él.

#### 4.3.1. LÍNEA DE TENDENCIA LINEAL

Empezamos con la aproximación de un modelo lineal, donde el incremento de cloro combinado es directamente proporcional al número de bañistas.

En este caso, buscamos una expresión del tipo:

$$y = ax + b$$

Donde el coeficiente  $a$  es la pendiente de la recta y el coeficiente  $b$  es la intersección con el eje de ordenadas. En nuestro caso, el coeficiente  $b$  va a ser cero al forzar a la recta al pasar por el origen de coordenadas (0,0).

Con ayuda de una hoja de cálculo (gráfico 2), obtenemos el valor del coeficiente  $a$  y su coeficiente de regresión:

$$y = 0,0001239 \cdot x$$

$$R^2 = 0,868$$

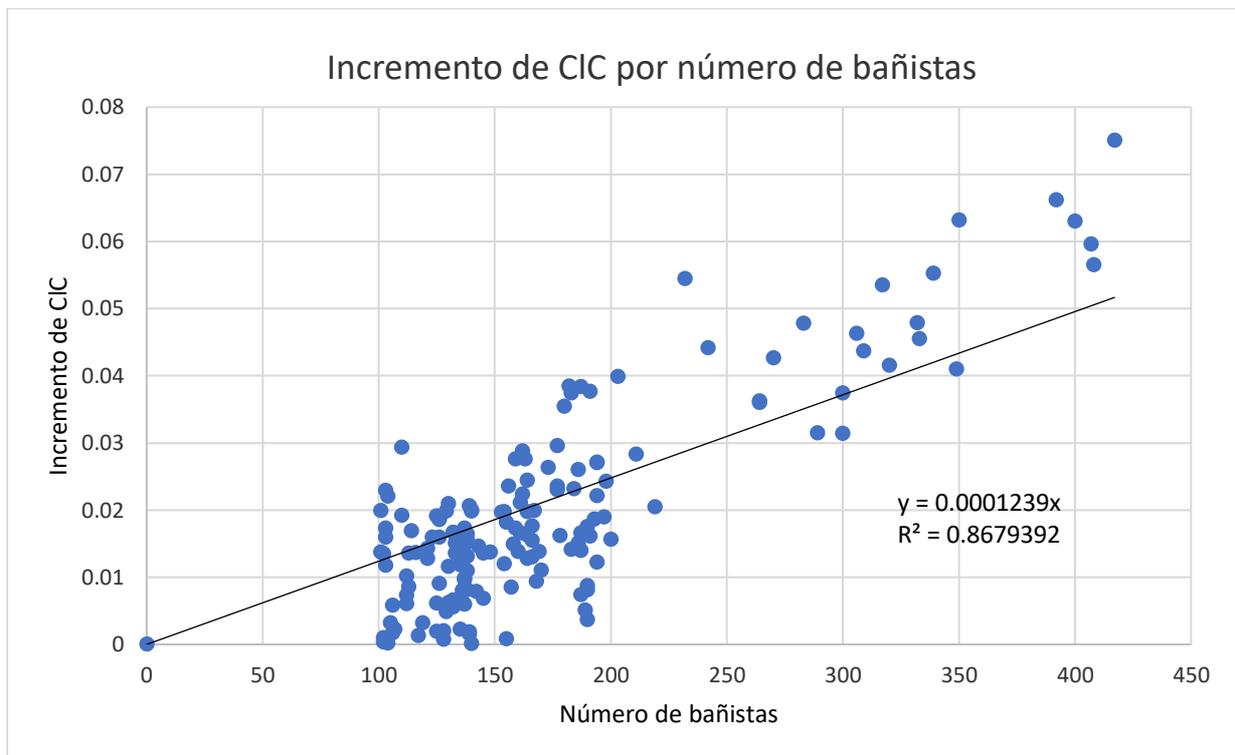


Gráfico 2: Línea de tendencia lineal

#### 4.3.2. LÍNEA DE TENDENCIA POLINÓMICA DE ORDEN DOS

Como se aprecia en el gráfico 2, la línea de tendencia lineal no presenta un ajuste perfecto al conjunto de datos, por lo que se decide comprobar el ajuste de una línea polinómica de orden dos. Este tipo de línea de tendencia se suele usar con datos que fluctúan alrededor de un valor máximo o mínimo (en el caso que nos ocupa, alrededor de su valor mínimo 0).

Así, buscamos una línea de tendencia del tipo:

$$y = ax^2 + bx + c$$

Aquí también se forzará a la curva a pasar por el origen de coordenadas, pues la presencia de cloro combinado se debe única y exclusivamente a la presencia de bañistas.

Con la misma hoja de cálculo se obtienen los valores de los coeficientes  $a$ ,  $b$  y  $c$ , así como el valor de  $R^2$  (gráfico 3)

$$y = 0,0000002x^2 + 0,0000678x$$

$$R^2 = 0,722$$

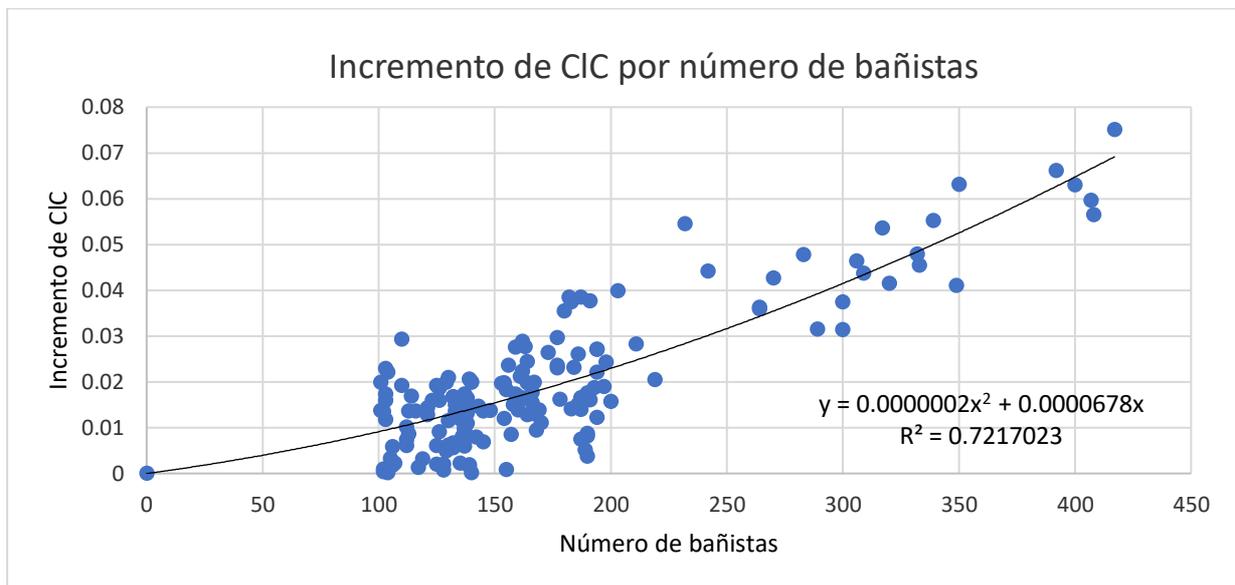


Gráfico 3: Línea de tendencia polinómica de orden 2.

En este caso, aunque visualmente el patrón de datos parezca que se ajuste mejor a la nube de datos, el valor de  $R^2$  es menor, lo que nos indica que el ajuste de la línea polinómica es peor al ajuste del modelo lineal. Además, se observa también que el componente cuadrático de la ecuación es mínimo, por lo que el componente lineal es el que mayor peso tiene.

#### 4.3.3. CORRELACIÓN ENTRE CLC Y NÚMERO DE BAÑISTAS

Como resultado del estudio de la línea de tendencia, se selecciona el modelo lineal para establecer la relación entre la presencia de cloro combinado y el número de bañistas:

$$y = 0,0001239 \cdot x$$

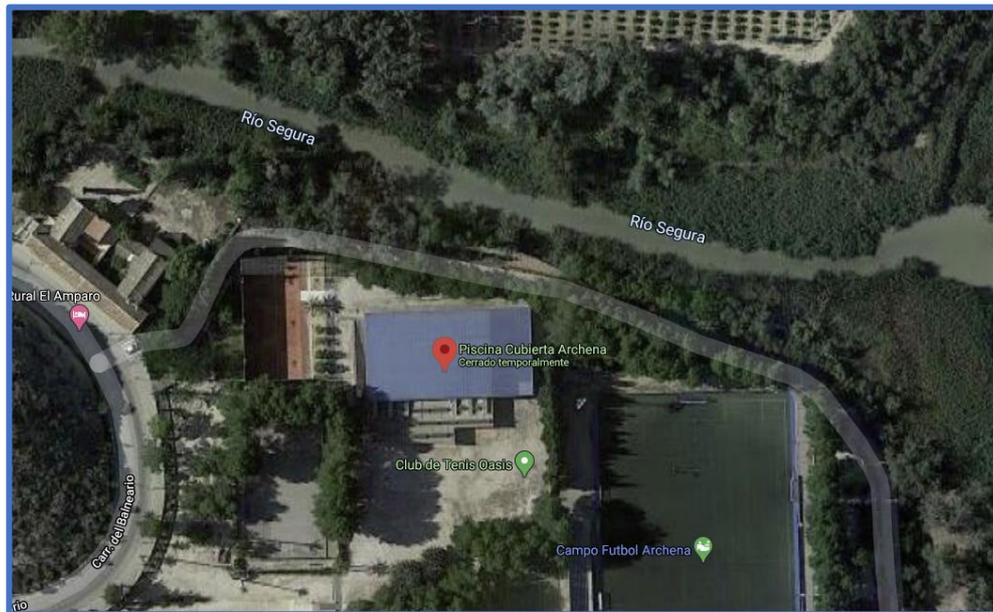
Donde  $x$  es el número de bañistas e  $y$  es el incremento de cloro combinado en mg/l.

Finalmente, aunque esta correlación mida el incremento del cloro combinado generado por el número de bañistas en la piscina de Águilas, los datos son exportables a cualquier piscina clorada de forma tradicional con un sistema hidráulico en buen estado y con un mantenimiento adecuado, al no estar involucrada ninguna variable además de las dos citadas.

Por este motivo, podemos tomar como válida esta correlación no sólo en la piscina de Águilas, sino también en la piscina modelo sobre la que trabajaremos: la piscina de Archena.

## 5. DESCRIPCIÓN DE LA INSTALACIÓN

La piscina sobre la que se trabaja en este Trabajo Fin de Máster se encuentra en la localidad de Archena.



*Imagen 4: localización de la piscina cubierta de Archena.*

Las dimensiones del vaso de la piscina son de 25 metros de largo por 12.5 metros de ancho (dimensiones de una piscina semiolímpica) y de unos dos metros de profundidad de media.



*Imagen 5: Vista interior de la piscina cubierta de Archena.*

Aunque inicialmente la piscina cubría toda su demanda térmica utilizando una caldera de propano, en 2010 se renovó y pasó a emplear un sistema mixto de energías renovables, que combina por un lado una caldera alimentada por biomasa y por otro una instalación solar térmica. Gracias a esta renovación energética, la piscina redujo su coste energético en un 60%.

En concreto, la instalación solar térmica está formada por 82 captadores orientados a sur (imagen 6), con una superficie total de unos 156m<sup>2</sup> y una potencia de 110kW.



*Imagen 6: Instalación solar térmica en la piscina cubierta de Archena.*

Por otro lado, se instaló una caldera de biomasa LASIAN Bioselect (imagen 7) con una potencia de 250kW y que se alimenta de pellets.

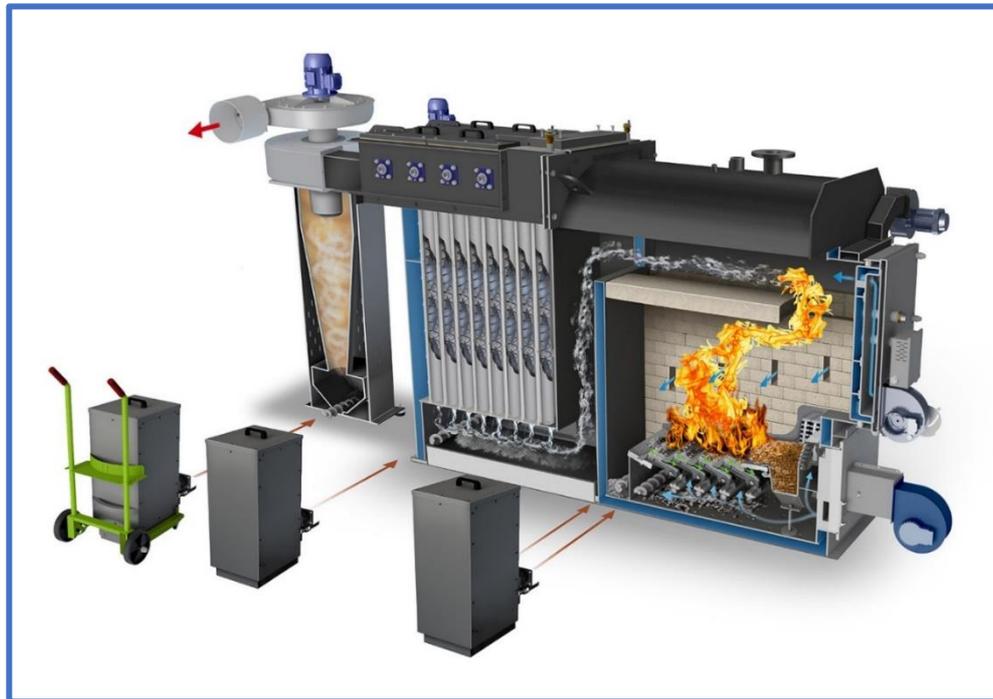


Imagen 7: Caldera de pellets LASSIAN

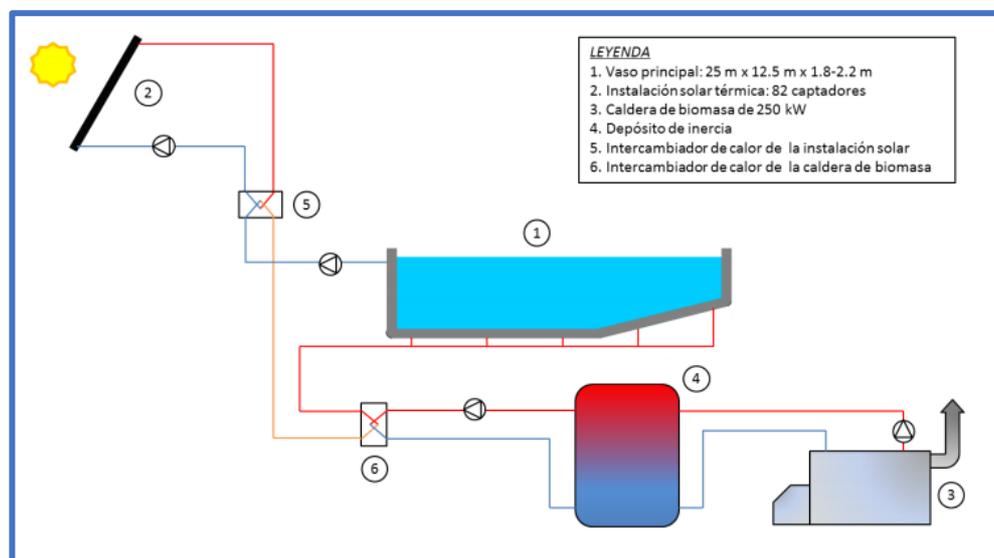


Imagen 8: Esquema de la instalación térmica de la piscina de Archena.

## 6. MODELADO DEL SISTEMA EN TRNSYS

Para demostrar las ventajas que la cloración salina tiene sobre la eficiencia energética de una piscina climatizada, vamos a utilizar el modelo de la piscina cubierta de Archena que el Dr. José Pablo Delgado elaboró como parte de su tesis doctoral *«Análisis energético de una piscina climatizada asistida con energías renovables, mediante su modelado dinámico, para una mejor integración de la energía solar térmica y la biomasa»*.

Este modelo simula el comportamiento energético de la piscina climatizada de Archena, y ha sido validado a través de la sensorización de diferentes variables en la piscina y la comparación los datos reales y los datos obtenidos a través del modelo.

El objetivo de este Trabajo Fin de Máster es comprobar si un sistema de desinfección basado en cloración salina y donde la renovación de agua es despreciable es más eficiente energéticamente que un sistema tradicional que emplee desinfección basada en cloro y que renueve agua bien en base a la generación de cloraminas por la presencia de bañistas o bien a partir de la tasa de renovación diaria establecida por normativa (un 2.5%).

Para ello modelaremos el comportamiento dinámico del vaso de una piscina cubierta que utilice un sistema de cloración salina y analizaremos la reducción en la demanda energética causada por esta tecnología utilizando el programa de simulación dinámica TRNSYS, un software que permite simular el comportamiento de sistemas transitorios.

TRNSYS se compone de dos partes. La primera es un motor (llamado núcleo) que lee y procesa el archivo de entrada, resuelve de forma iterativa el sistema, determina la convergencia y traza las variables del sistema. La segunda parte de TRNSYS es una extensa biblioteca de componentes que permite adaptar el sistema a casos muy concretos. Los modelos están contruidos de tal manera que los usuarios pueden modificar los componentes existentes o escribir los suyos propios, ampliando las capacidades del entorno.

## 6.1. DESCRIPCIÓN DE LOS COMPONENTES EN TRNSYS

A continuación, se definen los componentes que conforman el modelo de la piscina climatizada de Archena desde el que ha partido este Trabajo Fin de Máster y sobre el que se han aplicado las modificaciones necesarias para calcular el impacto que tiene sobre la demanda energética un sistema de cloración salina.

### 6.1.1. VASO DE LA PISCINA

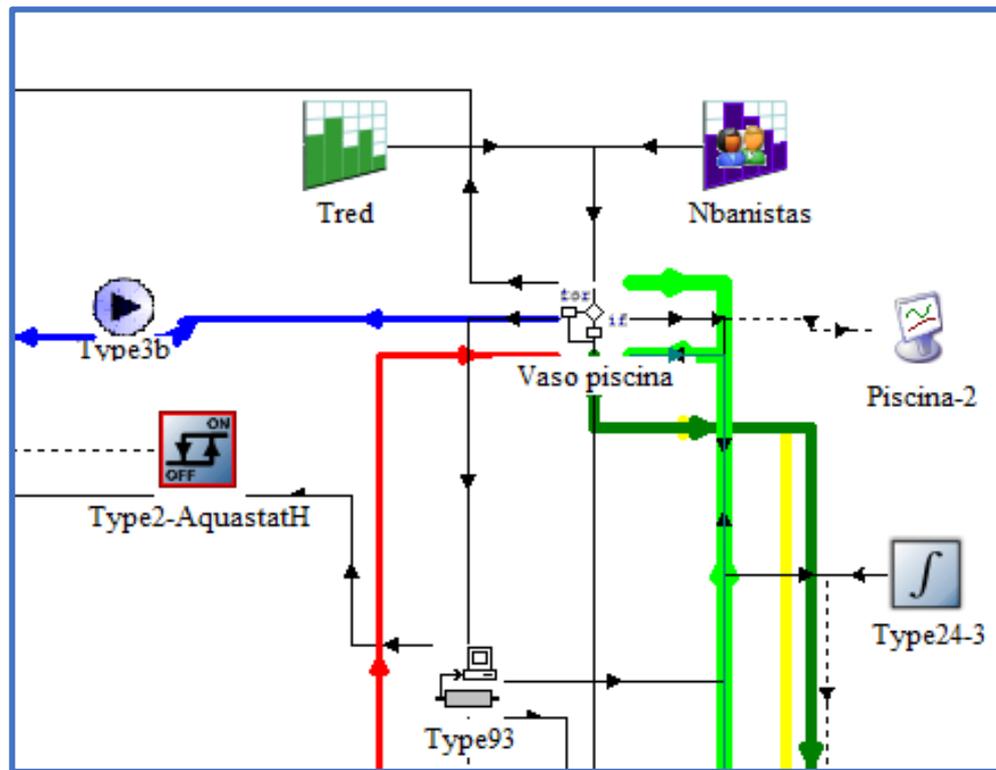


Imagen 9: Componente vaso de la piscina en TRNSYS

El vaso de la piscina se ha modelado a partir de un componente con el software w7. Como entradas se necesitan tanto la temperatura de red (*Tred*) como el número de bañistas (*Nbanistas*)

El módulo *Tred* incluye los datos de la temperatura media del agua de red en la Región de Murcia durante todos los meses del año, extraídos de la Guía Técnica de Agua Caliente Sanitaria Central del IDAE

Temperatura del agua de la red (°C)													Media
Mínimas	5	6	7	9	11	13	15	2	14	11	7	6	10
Máximas	15	15	16	16	17	19	21	21	20	18	17	16	17
Ciudad	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
Lérida	7	9	10	12	15	17	20	19	17	14	10	7	13
Logroño	7	8	10	11	13	16	18	18	16	13	10	8	12
Lugo	7	8	9	10	11	13	15	15	14	12	9	8	11
Madrid	8	8	10	12	14	17	20	19	17	13	10	8	13
Málaga	12	12	13	14	16	18	20	20	19	16	14	12	16
Murcia	11	11	12	13	15	17	19	20	18	16	13	11	15

Imagen 10: Anexo 1- Tablas Guía Técnica de Agua Caliente Sanitaria Central.

Los valores mensuales de temperatura del agua de red hay que introducirlos en TRNSYS por horas. Por ejemplo, la temperatura del agua de red tiene un valor de 11°C desde la hora 0 hasta la hora 744, lo que equivaldría a todo el mes de enero.

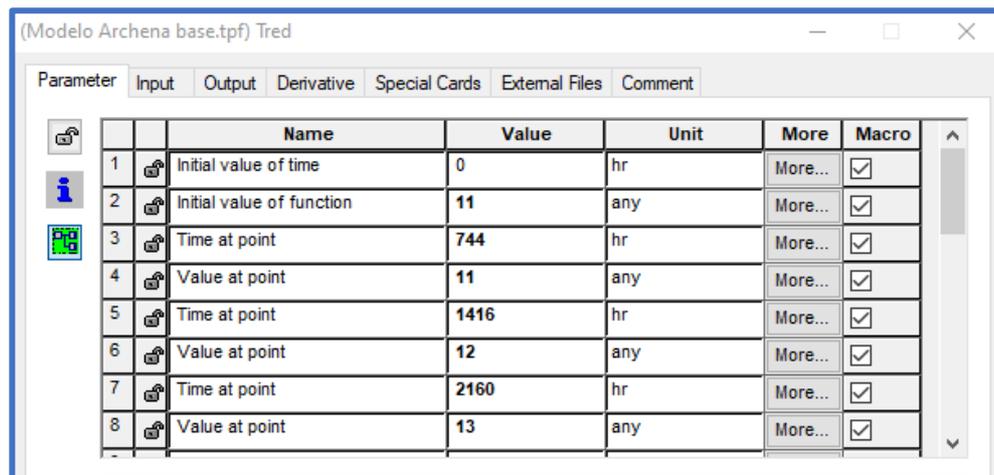


Imagen 11: Módulo Tred en TRNSYS.

Por otro lado, la afluencia de bañistas se ha definido en base a datos estadísticos proporcionados por personal de la piscina de Archena, que suele estar en torno a los 300 bañistas diarios durante los días de lunes a viernes. Como TRNSYS no diferencia los días y calcula la demanda también durante los sábados y los domingos, se han distribuido los 1,500 bañistas semanales entre los 7 días de la semana. Así, el perfil de número de bañistas de un día típico quedaría de la siguiente forma:

Hora	Número de bañistas
8	15
9	15
10	15
11	15
12	15
13	5
14	5
15	5
16	20
17	20
18	20
19	20
20	20
21	20



Tabla 4: Cadencia horaria de bañistas en un día típico

En TRNSYS, estos valores se introducen en el módulo Nbanistas:

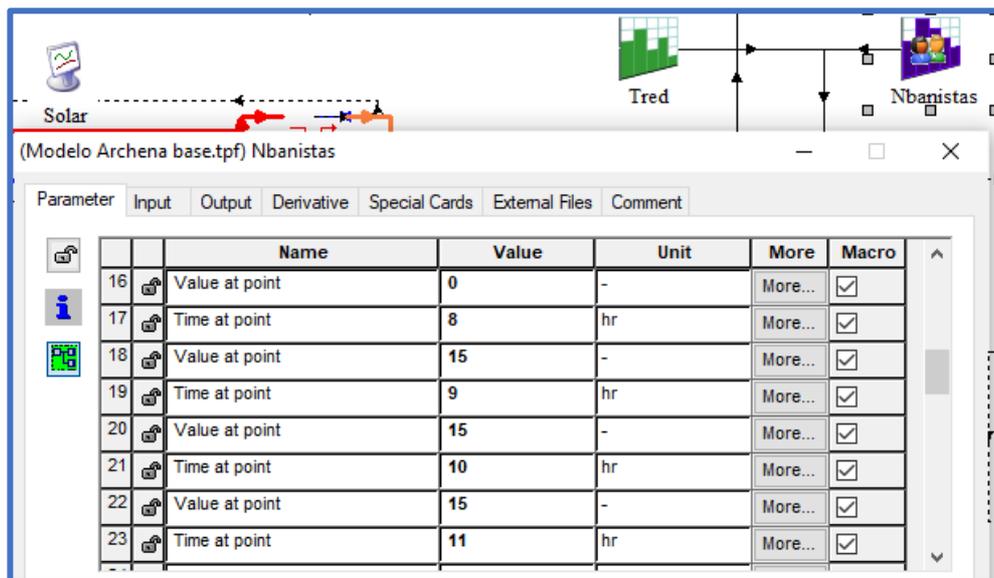


Imagen 12: Número de bañistas en TRNSYS

Otra de las entradas que introduce datos en el vaso de la piscina es el lector de tiempo exterior Weather Data, un módulo de TRNSYS que proporciona información sobre las variables climáticas de la zona seleccionada.

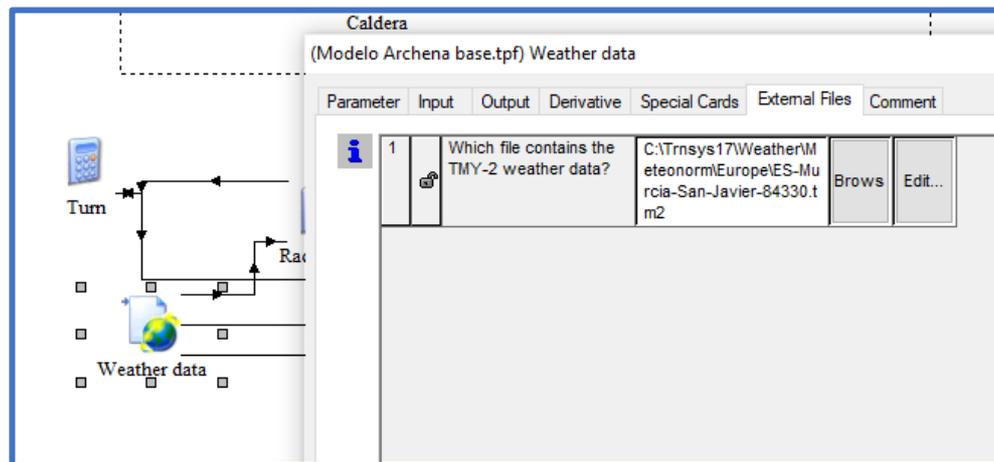


Imagen 13: Módulo Weather Data en TRNSYS

Una vez definidos los componentes externos que vuelcan datos sobre el componente específico del Vaso de la Piscina, se deben definir también los siguientes valores de entrada:

- $T_{interior} = 29 \text{ }^{\circ}\text{C}$ . Temperatura ambiente en el recinto de la piscina.
- $HR = 65\%$ . Humedad relativa máxima en el recinto de la piscina.
- $Altura = 600 \text{ m}$ . Altura del edificio sobre el nivel del mar.
- $Ancho = 12,5 \text{ m}$ . Ancho del vaso de la piscina.
- $Largo = 25 \text{ m}$ . Largo del vaso de la piscina.
- $Profundidad = 2 \text{ m}$ . Profundidad media de la piscina.
- $Tred = input (Tred)$ . Temperatura del agua de red
- $nbanistas = input (nbanistas)$  Cadencia horaria de bañistas.
- $clorocomb = input (clorocomb)$ . Cloro combinado en mg/L
- $Emitancia = 0,87$ . Emitancia superficie agua
- $Upared = 3,3 \text{ W/m}^2\text{K}$ . Transmitancia de las paredes del edificio
- $ratioenov = 2,5$ . Ratio de renovación diaria
- $Tcaldera = 35^{\circ}\text{C}$ . Temperatura de la caldera  $^{\circ}\text{C}$
- $mcaldera = 18.000 \text{ kg/h}$ . Caudal de la caldera.
- $T_{exterior} = input (Weather Data)$ . Temperatura del aire exterior.





## 6.2. MODELO 1 – PISCINA CON DESINFECCIÓN POR CLORO Y RENOVACIÓN SEGÚN NORMATIVA

### 6.2.1. DESCRIPCIÓN DEL MODELO

En este modelo, se ha obtenido la ratio de renovación de los valores mínimos establecidos en la normativa. En concreto, en el Decreto nº 58/1992, de 28 de mayo, en el que se estipula que el agua de renovación será de al menos del 2.5% de la capacidad del vaso.

En este caso, se ha modificado el archivo .w del vaso de la piscina para definir la masa de agua renovada diariamente en TRNSYS como:

```
%renovacion
```

```
mrenov=Volumen*ratiorenov/100/24 %m3
```

```
Prenov=(mrenov)*4.186*(Tpiscina-Tred)/3.6
```

Donde:

- Mrenov: caudal de agua a renovar. Como la renovación es diaria, dividimos por 24 para tener el valor de renovación cada hora.
- Volumen: volumen del vaso de la piscina (ancho\*largo\*profundidad)
- Ratiorenov: renovación diaria mínima de acuerdo a la normativa
- Prenov: potencia necesaria para elevar la temperatura de renovación desde Tred hasta Tpiscina.
- 4,186: calor específico del agua en kJ/kg.
- Tpiscina: temperatura del agua del vaso
- Tred: temperatura del agua de red

### 6.2.2.RESULTADOS OBTENIDOS

En primer lugar, analizamos la demanda del vaso. Vemos que la demanda total anual asciende a 382MWh, donde un 69% se debe a las pérdidas por evaporación, un 24% a las pérdidas por renovación diaria de agua y un 7% a las pérdidas por radiación.

Modelo 1	Demanda (kWh)
Q evap	265,110
Q conv	0
Q rad	26,675
Q cond	0
Q renov	90,244
Q total	382,028

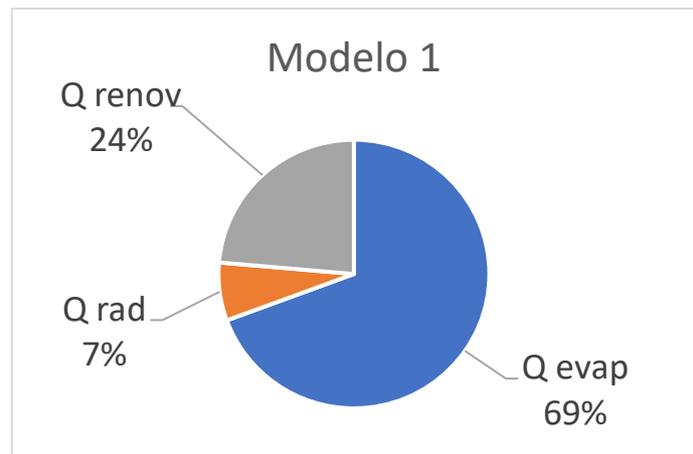


Tabla 5: Demanda de energía térmica en modelo 1

Por un lado, las pérdidas por conducción son las que se producen entre las paredes de la piscina y el terreno. Estas se calculan como:

```

Tint      = in (1) % temperatura ambiente piscina °C
Tpiscina  = in (8) % temperatura agua piscina °C
Upared    = in (13) % transmitancia paredes edificio W/m2K
Tsotano   = (Tint+Tpiscina)/2+273.15
pcond     = Upared*(Tpiscina-Tsotano)/1000*SupParPiscina %kW

```

Como la temperatura del aire interior va a ser siempre superior a la temperatura del agua del vaso, no existen flujos de calor desde el agua de la piscina hacia el aire interior, por lo tanto, las pérdidas por conducción son nulas.

Por otro lado, como se puede observar en la tabla 5 de resultados, las pérdidas por convección también son despreciables, pues la temperatura del sótano (donde está alojada la sala de máquinas y la caldera), va a ser similar o superior a la temperatura de las paredes del vaso, como se observa en el gráfico 4

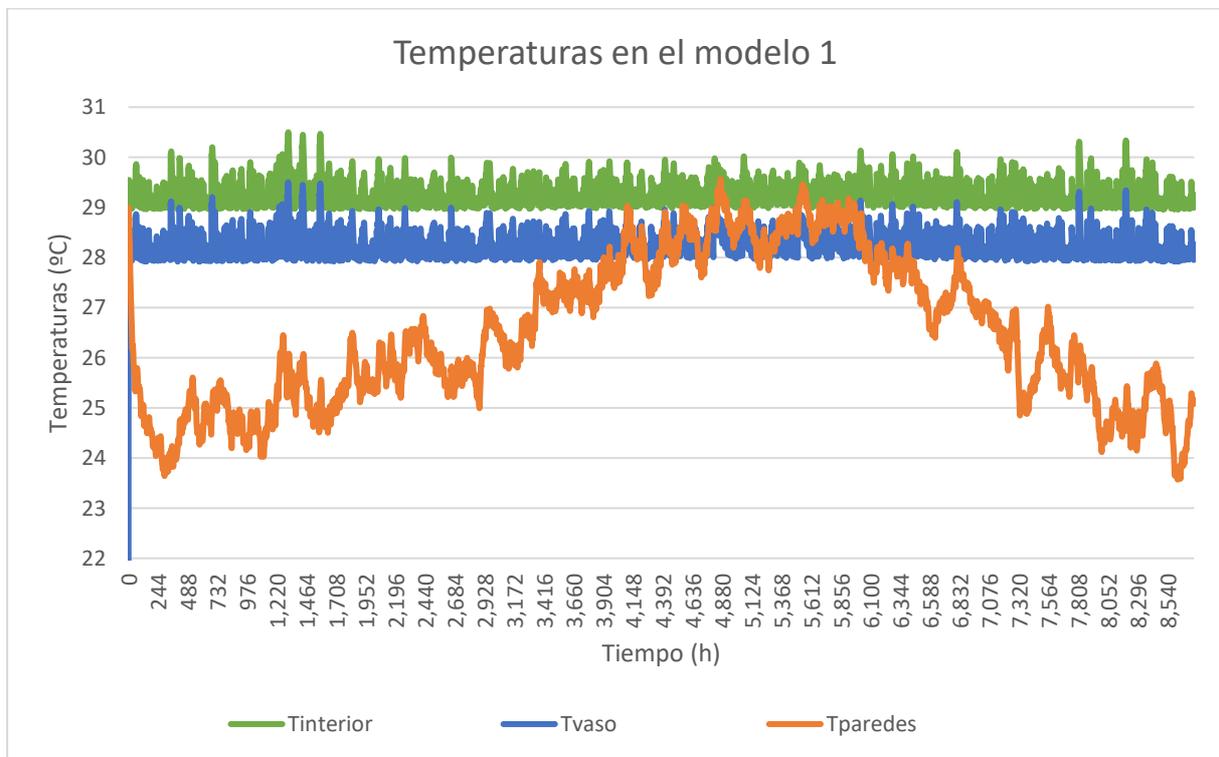


Gráfico 4: Temperaturas en el Modelo 1

A continuación, analizamos la producción de energía térmica en la caldera y en la instalación solar térmica (tabla 6). El valor total de la energía producida asciende a 382MWh, donde la energía producida por la caldera representa el 57% del total y la energía solar térmica el 43% restante.

	Generación (kWh)
<b>Q solar</b>	166,060.74
<b>Q caldera</b>	215,967.70
<b>E total</b>	382,028.44

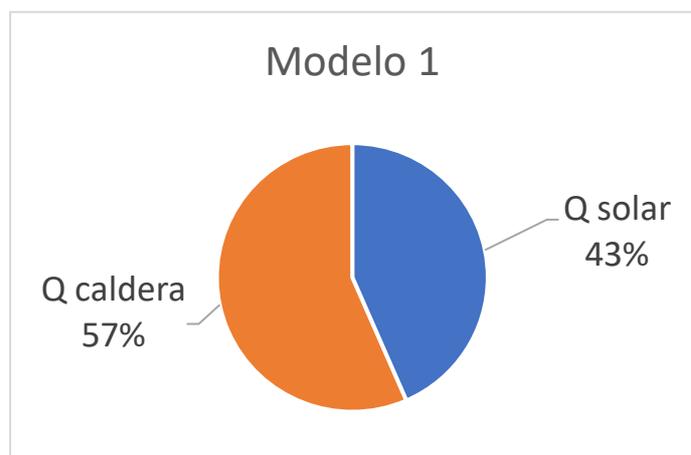


Tabla 6: Producción de energía térmica en modelo 1

A continuación, se muestra un resumen de los valores obtenidos en el modelo 1 (tabla 7), la curva de producción acumulada de energía térmica (gráfico 5), la demanda acumulada del vaso (gráfico 6) y el volumen del agua de renovación de un 2.5% diario según normativa (gráfico 7).

Modelo 1	kWh
Q demanda	382,028
Q evap	265,110
Q rad	26,675
Q renov	90,244
Q generación	382,028
Q solar	166,061
Q caldera	215,968
	m <sup>3</sup>
m renov	5,703

Tabla 7: Resumen de resultados en modelo 1

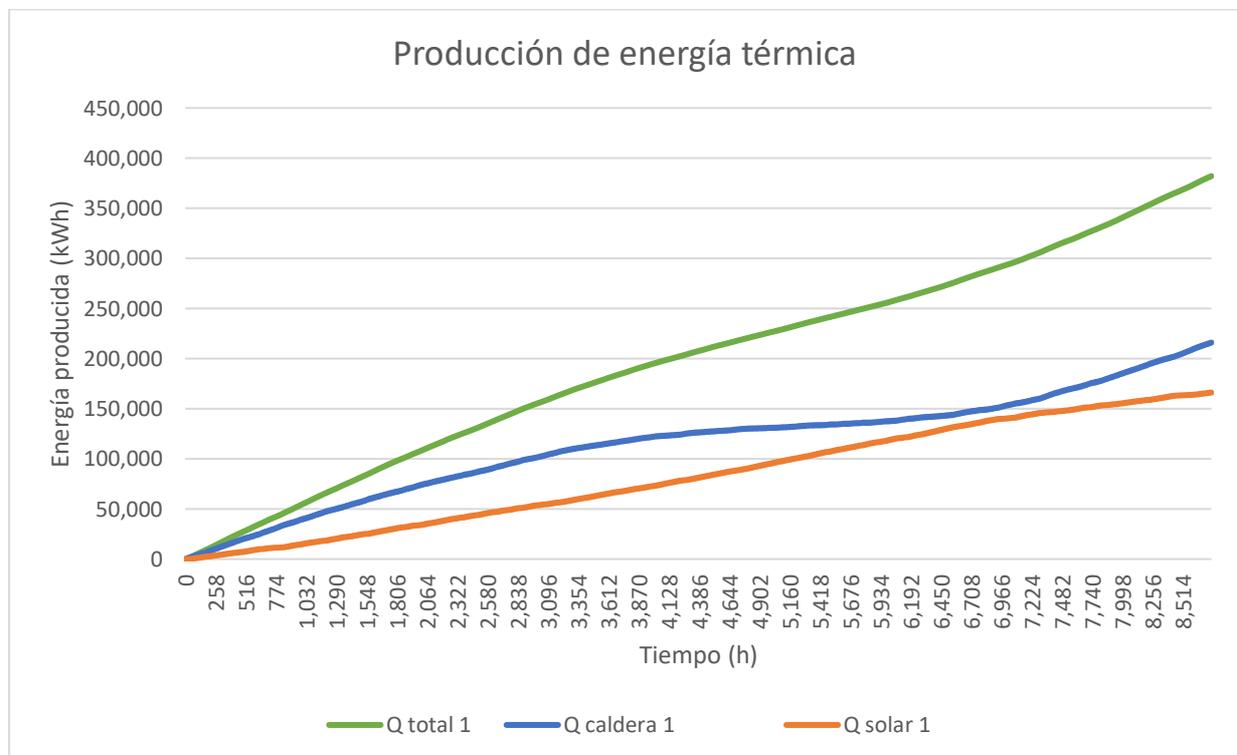


Gráfico 5: Producción de energía térmica en Modelo 1

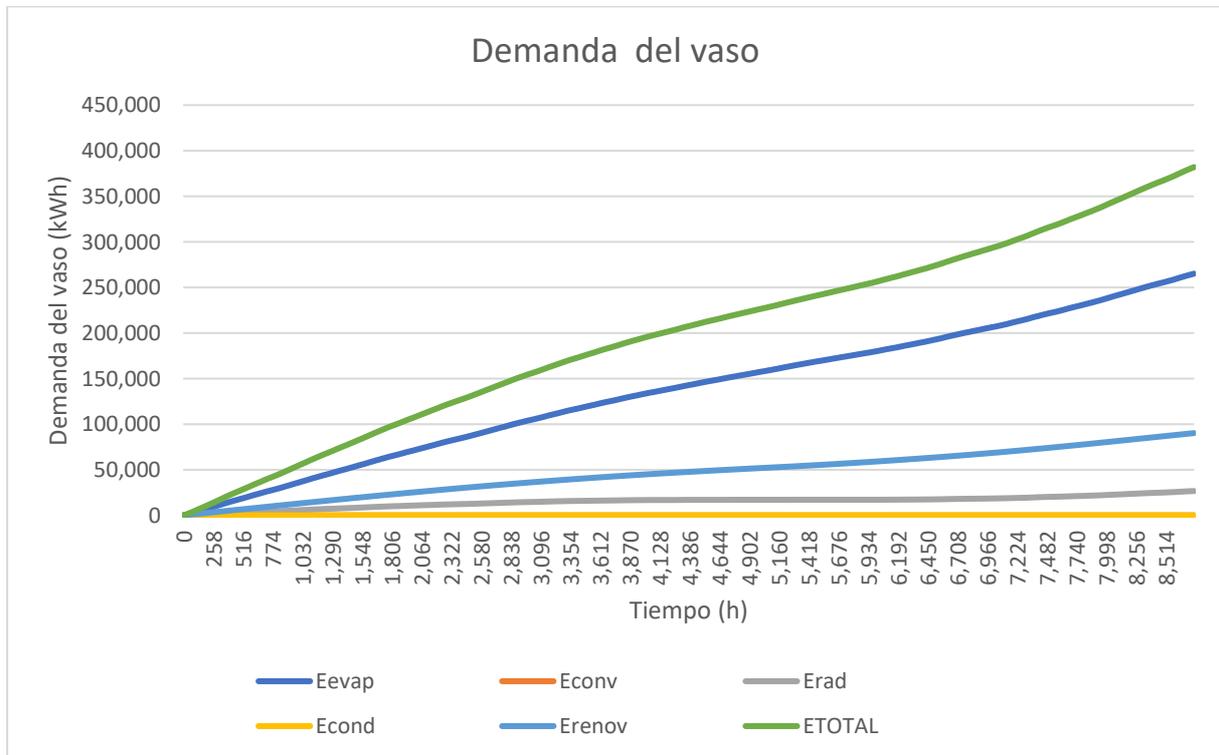


Gráfico 6: Demanda de energía térmica en el modelo 1

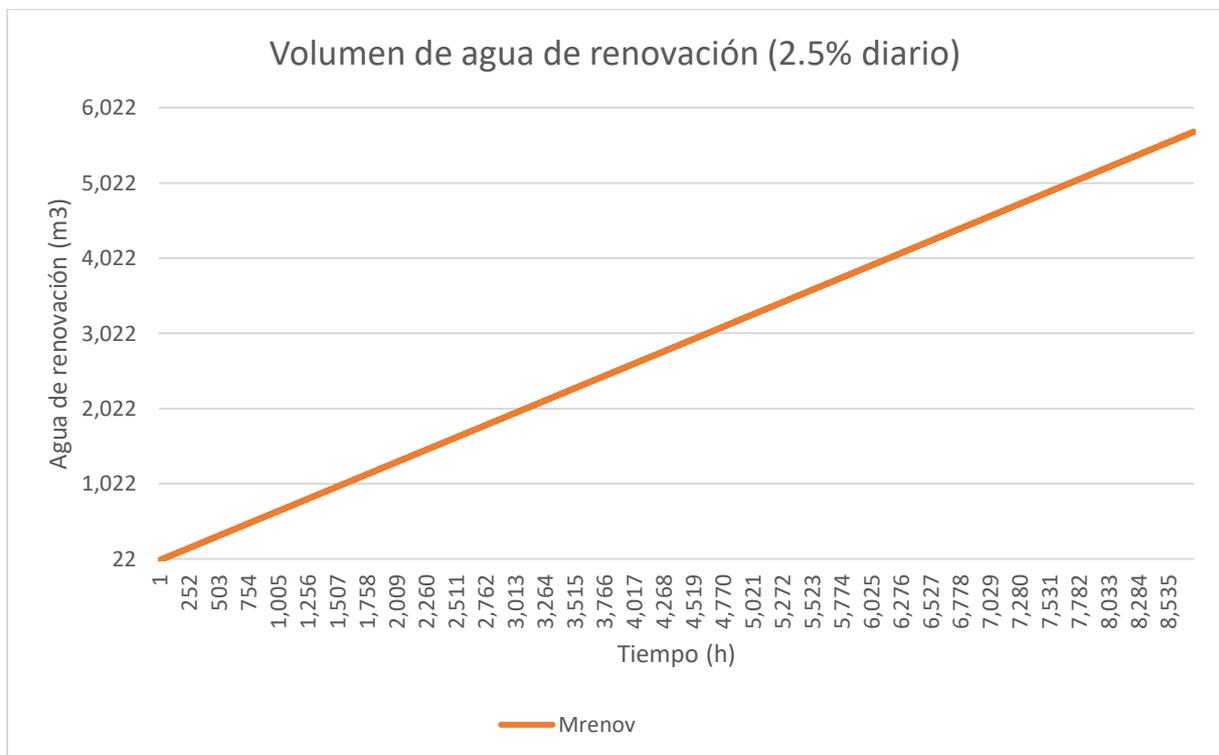


Gráfico 7: Volumen de agua de renovación en modelo 1

## 6.3. MODELO 2 – PISCINA CON DESINFECCIÓN POR CLORO Y RENOVACIÓN EN FUNCIÓN DE LA GENERACIÓN DE CLORAMINAS

### 6.3.1. CARACTERÍSTICAS DEL MODELO

El principal indicador que mide la salubridad del agua de una piscina es el de CIC, que, como se ha comentado en anteriores capítulos, se mide dos veces al día para asegurar que el agua está en perfectas condiciones y es apta para el baño. En muchos casos, la renovación del 2.5% diaria es insuficiente para mantener las condiciones óptimas de salubridad en la piscina y es necesario realizar una renovación diaria mayor.

Por lo tanto, en este capítulo se va a programar, a partir del modelo 1, la curva que relaciona el incremento de cloro combinado con el número de bañistas, obtenida en el capítulo 4.3.

De este modo, podremos estimar cuál es la renovación real que se necesitaría realizar en la piscina para mantener el agua en unas condiciones óptimas de salubridad.

Para ello, programamos en el fichero .w del vaso en TRNSYS un algoritmo que renueve un 0.5% de agua siempre que se supere el valor máximo establecido por la normativa.

```
%cloro combinado  
  
deltaclc=0.0001239*nbanistas  
  
mrenov=0  
  
if (clorocomb>0.6)  
    clorocomb2=(100-ratiorenov)/100*clorocomb  
else  
    clorocomb2 = clorocomb  
end  
  
clorocombf=clorocomb2+deltaclc
```

```
%renovacion  
  
if (clorocombf>0.6)  
  
mrenov=Volumen*ratiorenov/100 %m3  
  
else  
  
mrenov=0  
  
end  
  
Prenov=(mrenov)*4.186*(Tpiscina-Tred)/3.6
```

Donde:

- **Deltaclc:** incremento del cloro combinado producido por el número de **bañistas**.
- **Clorocombprev:** cloro combinado resultante de la iteración anterior.
- **Clorocomb:** cloro combinado tras la renovación de agua
- **Clorocombf:** cloro combinado de la iteración actual

Sin embargo, al ejecutar este modelo se obtenían resultados poco coherentes. El motivo fue que la variación del cloro combinado era una cifra del orden de  $10^{-5}$ , un valor tan pequeño que afectaba a la coherencia de los resultados.

Para reducir este error, se cambiaron las unidades del cloro combinado, pasando de miligramos por litro a microgramos por litro. Así, la programación en TRNSYS queda de la siguiente forma:

```
%cloro combinado  
  
deltaclc=0.0001239*nbanistas  
  
mrenov=0  
  
if (clorocomb>600)  
  
clorocomb2=(100-ratiorenov)/100*clorocomb
```

```
else

clorocomb2 = clorocomb

end

clorocombf=clorocomb2+deltaclc

%renovacion

if (clorocombf>600)

mrenov=Volumen*ratioorenov/100 %m3

else

mrenov=0

end

Prenov=(mrenov)*4.186*(Tpiscina-Tred)/3.6
```

Una vez programado el incremento de cloro combinado en función de la presencia de bañistas, procedemos a analizar los resultados obtenidos.

### 6.3.2.RESULTADOS OBTENIDOS

En primer lugar, la demanda del vaso asciende a 445MWh, donde las necesidades térmicas por la renovación del agua del vaso por renovación representan ahora un 35% de la demanda total. La demanda por radiación y por evaporación se mantiene similar con respecto a las cifras del modelo 1.

Modelo 2	Demanda (kWh)
Q evap	264,149
Q conv	0
Q rad	26,484
Q cond	0
Q renov	153,988
Q total	444,621

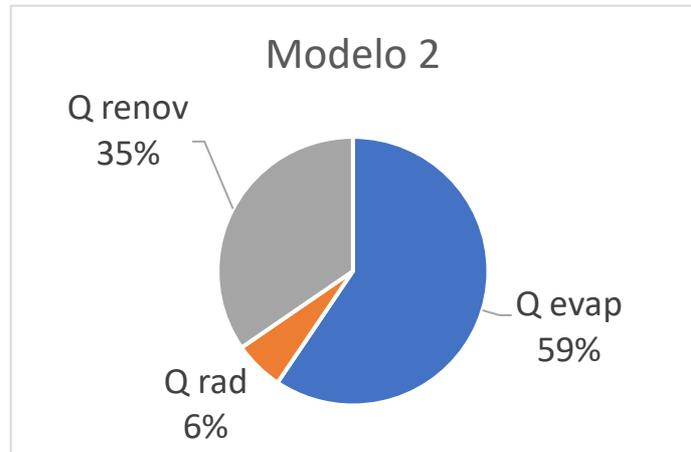


Tabla 8: Demanda de energía térmica en modelo 2

En este caso, las pérdidas por convección y por conducción también son nulas, pues la temperatura del aire interior se mantiene siempre por encima de la temperatura del agua del vaso, y la temperatura del sótano se mantiene también por encima de la temperatura de las paredes de la piscina, como se observa en el gráfico 8.

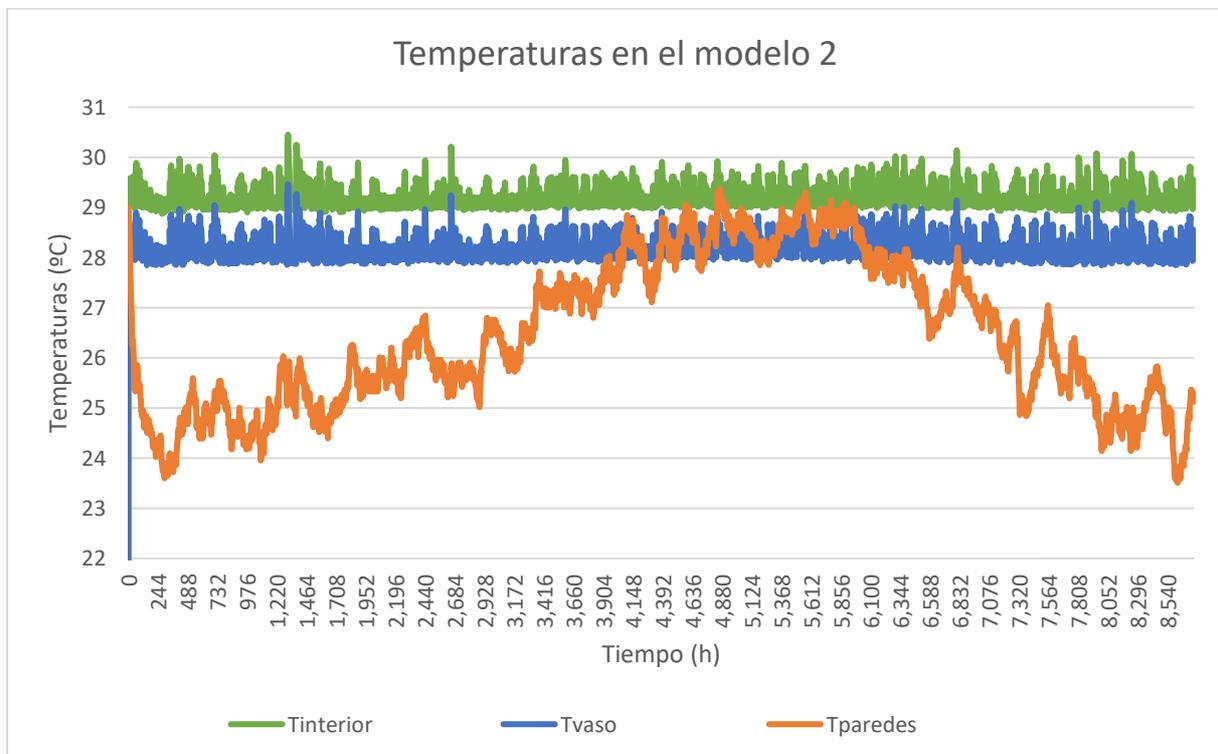


Gráfico 8: Temperaturas en el modelo 2

A continuación, en la tabla 9 se analiza la producción de energía térmica, tanto la procedente de la caldera como la producida en la instalación solar térmica. En este caso, la energía total producida asciende a 445MWh, donde el aporte de energía de la caldera representa un 63% y el de la instalación solar un 37%.

	Generación (kWh)
<b>Q solar</b>	166,412
<b>Q caldera</b>	278,209
<b>Q total</b>	444,621

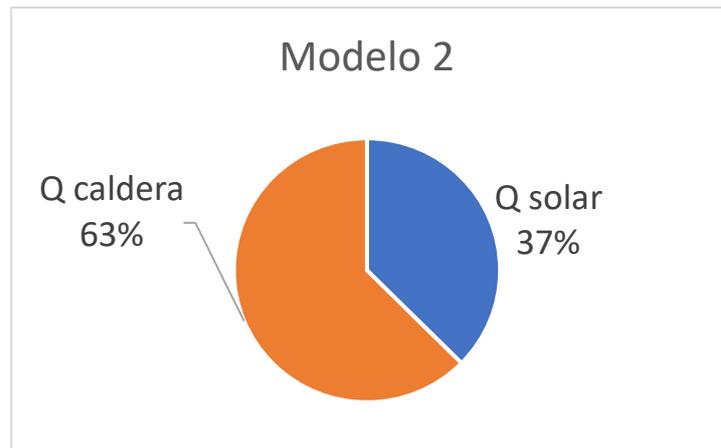


Tabla 9: Producción de energía térmica en modelo 2

A continuación, se muestra un resumen de los valores obtenidos en el modelo 2 (tabla 10), la curva de producción acumulada de energía térmica (gráfico 9), la demanda acumulada del vaso (gráfico 10) y el volumen del agua de renovación según la acumulación de cloro combinado originado por la presencia de bañistas (gráfico 11).

Modelo 2	kWh
<b>Q demanda</b>	444,621
<b>Q evap</b>	264,149
<b>Q rad</b>	26,484
<b>Q renov</b>	153,988
<b>Q generación</b>	444,621
<b>Q solar</b>	166,412
<b>Q caldera</b>	278,209
	<b>m<sup>3</sup></b>
<b>m renov</b>	9,775

Tabla 10: Resumen de resultados en el modelo 2

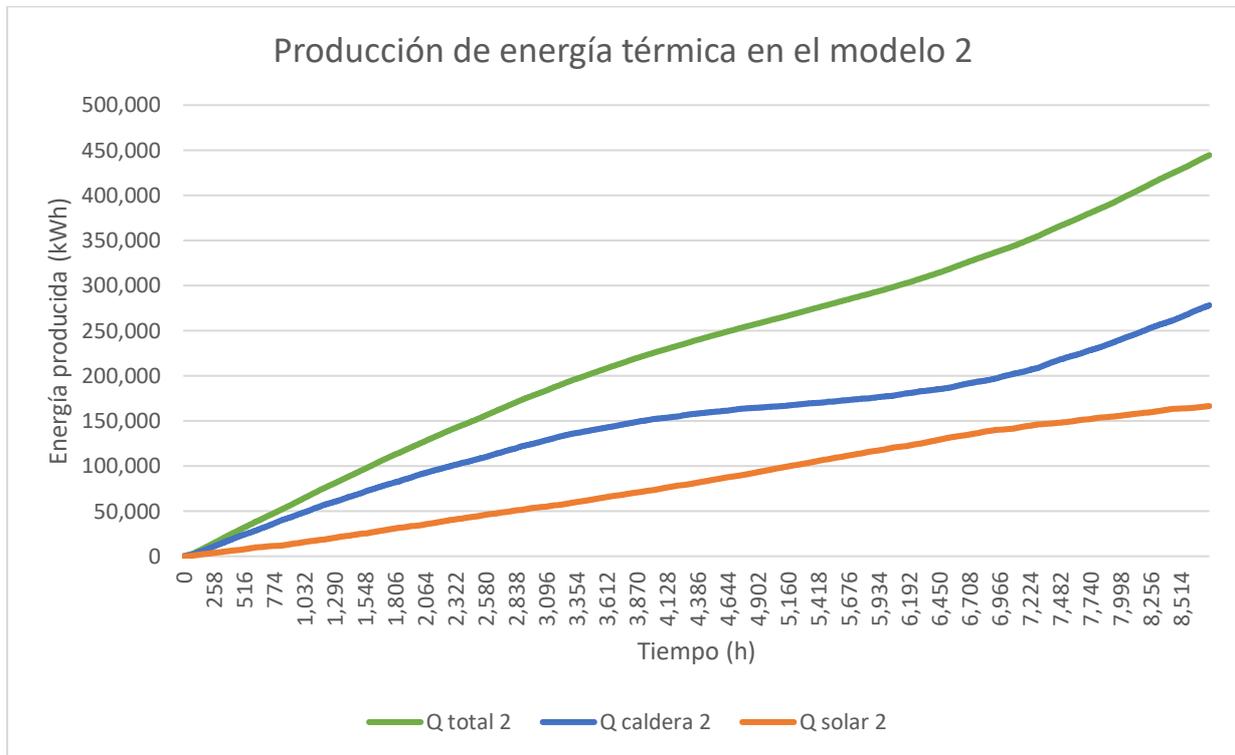


Gráfico 9: Producción de energía térmica en el modelo 2

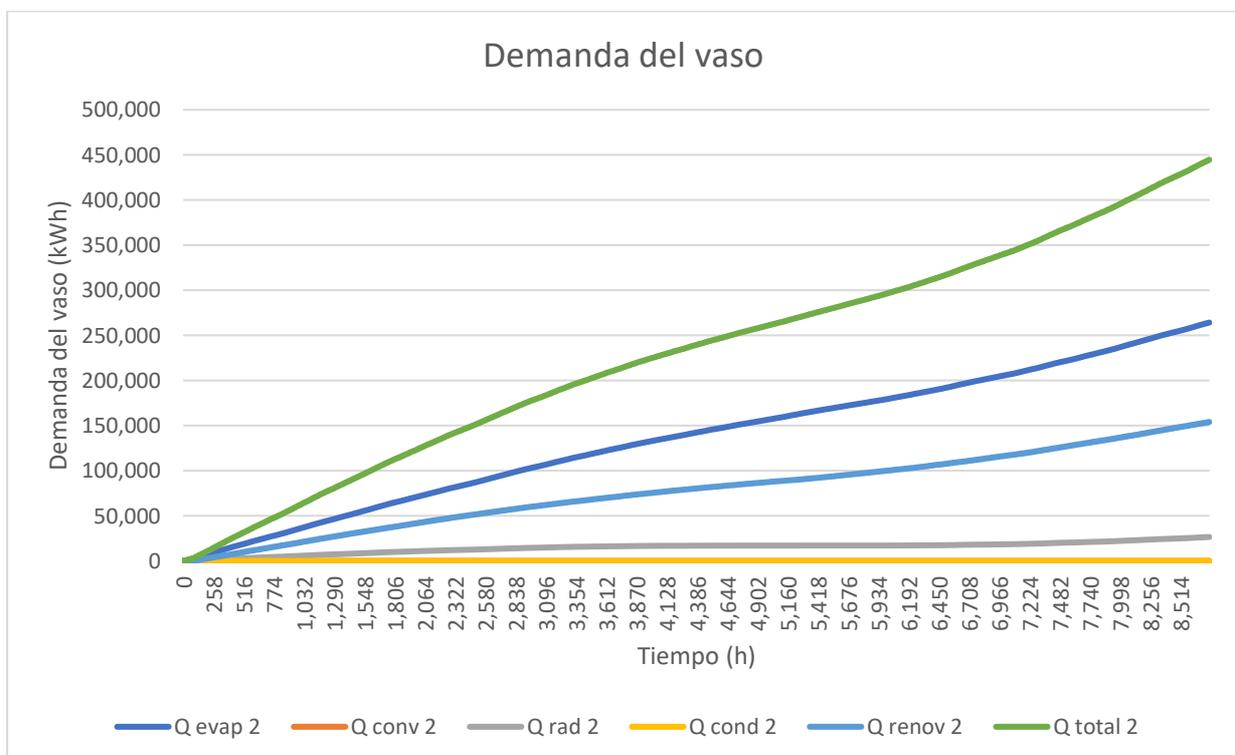


Gráfico 10: Demanda del vaso en el modelo 2

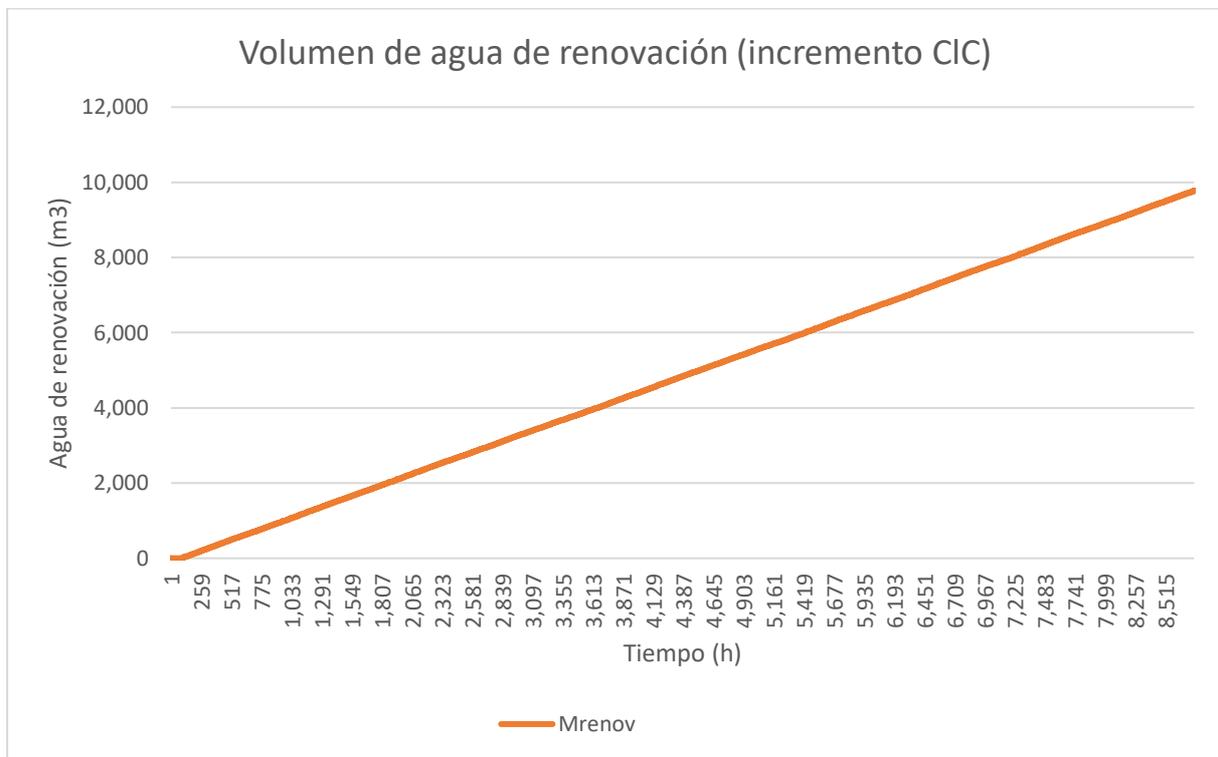


Gráfico 11: Volumen de agua de renovación en el modelo 2

Como se observa en el gráfico 11, el volumen de agua de renovación se ha incrementado considerablemente con respecto al valor obtenido en el modelo 1.

Como el incremento por número de bañistas se calcula cada hora, a simple vista la curva de concentración de cloro combinado se mantiene estable en torno a los 600µg/l (gráfico 12).

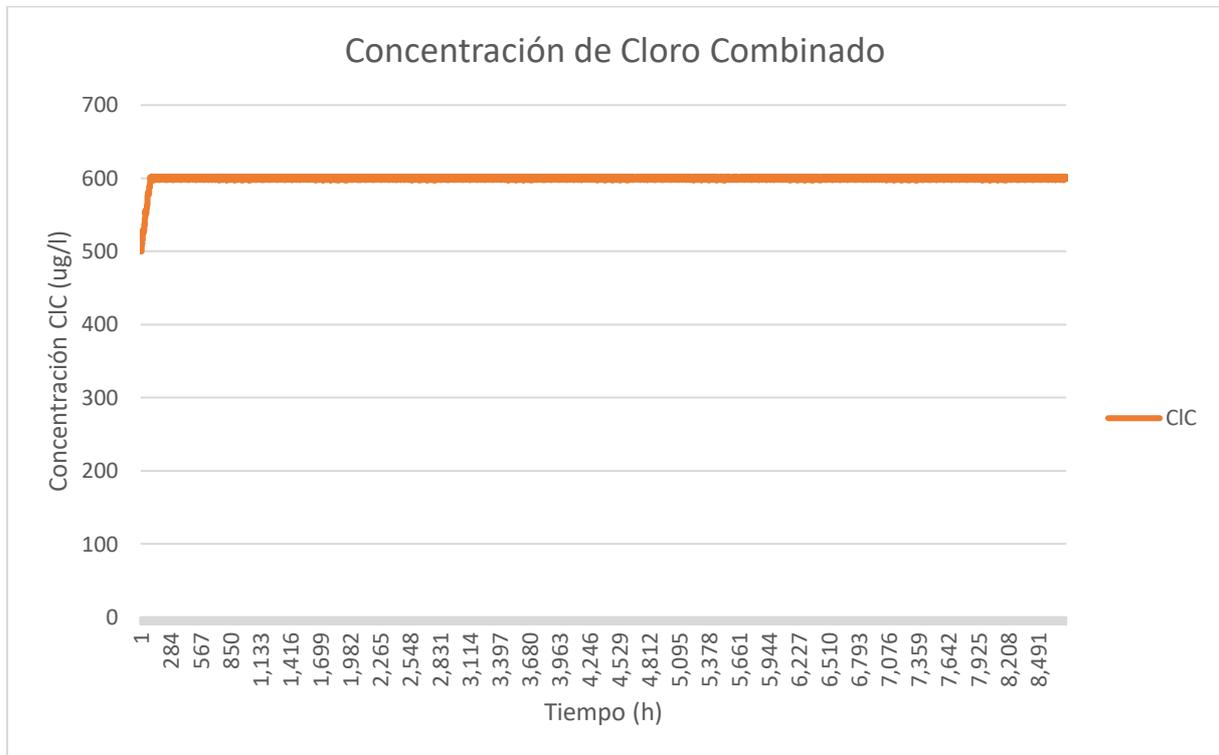


Gráfico 12: Concentración de cloro combinado en modelo 2

No obstante, si se analiza el detalle de la curva en TRNSYS, podemos comprobar cómo cada vez que se supera el valor de  $600\mu\text{g/l}$  se realiza una renovación del 0.5% del volumen del vaso (imagen 18).

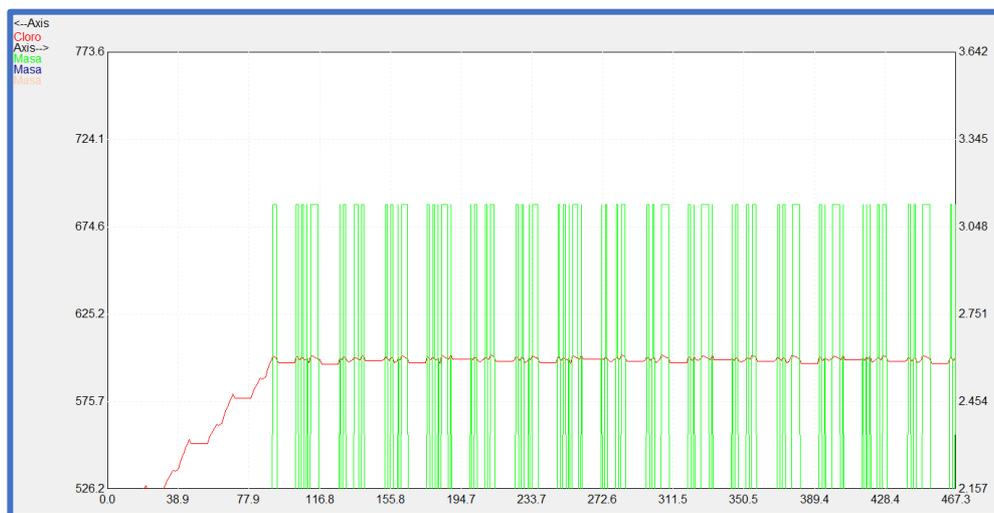


Imagen 18: Detalle de renovaciones por incremento de cloro combinado

Si comparamos el volumen de agua de renovación de los modelos 1 y 2, comprobamos que, si tomamos la correlación entre aumento de cloro combinado y número de bañistas como válida, una renovación diaria del 2.5% no sería suficiente para mantener las condiciones higiénico-sanitarias de una piscina con una afluencia de unos 1,500 bañistas semanales.

	m renov (m3)	% renov. día	Q renov (kWh)	Diferencia
<b>Modelo 1</b>	5,703	2.5%	90,244	
<b>Modelo 2</b>	9,775	4.3%	153,988	<b>+71%</b>

*Tabla 11: Renovación de agua en los modelos 1 y 2*

Con el modelo 2 se ha podido comprobar el impacto que tienen los bañistas sobre la demanda energética de la piscina. A pesar de que la calidad de los datos registrados por el personal de la piscina de Águilas no sea la adecuada para obtener una correlación definitiva, si tomamos la curva obtenida en el punto 4.2. como válida, sería necesario aumentar la tasa de renovación diaria desde el 2.5% establecido en la normativa hasta una tasa del 4.3% para mantener las condiciones higiénico-sanitarias en el agua del vaso. En este supuesto, tanto el agua diaria de renovación como el calor necesario para elevar la temperatura del agua desde el valor de red hasta la temperatura de consigna han de ser incrementados en un 71%.

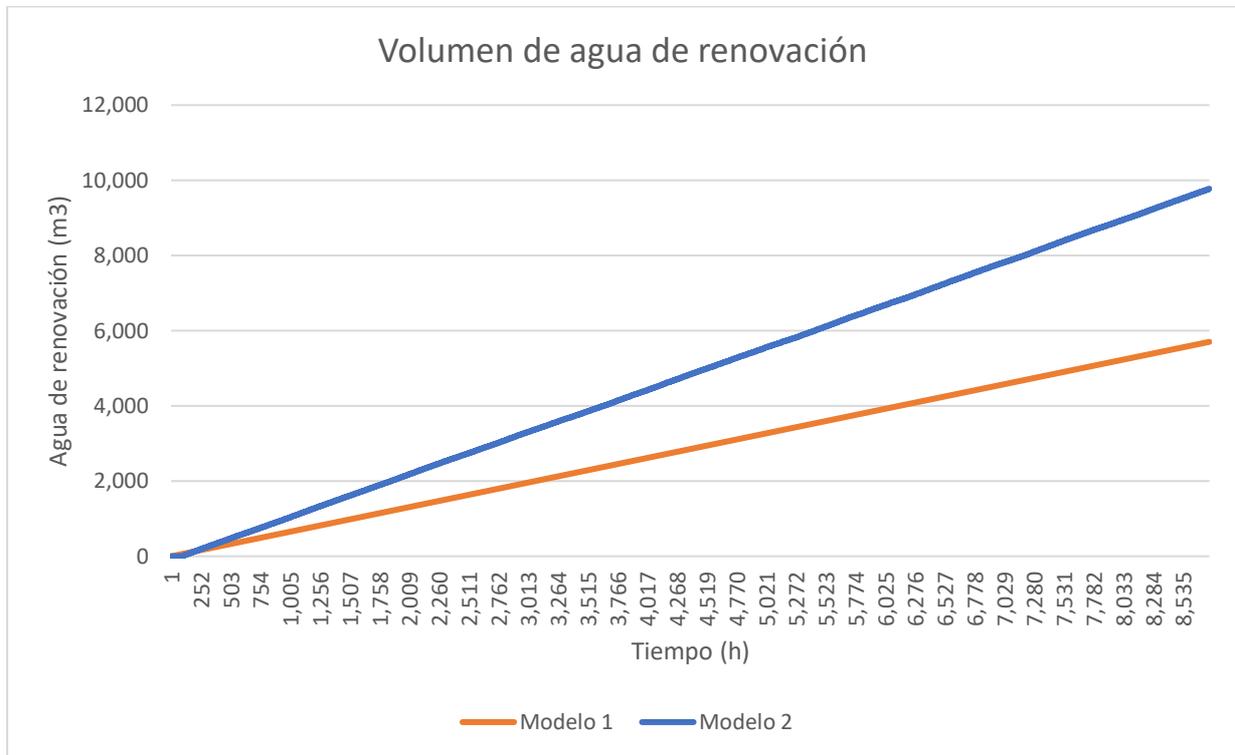


Gráfico 13: Comparativa del agua de renovación entre los modelos 1 y 2

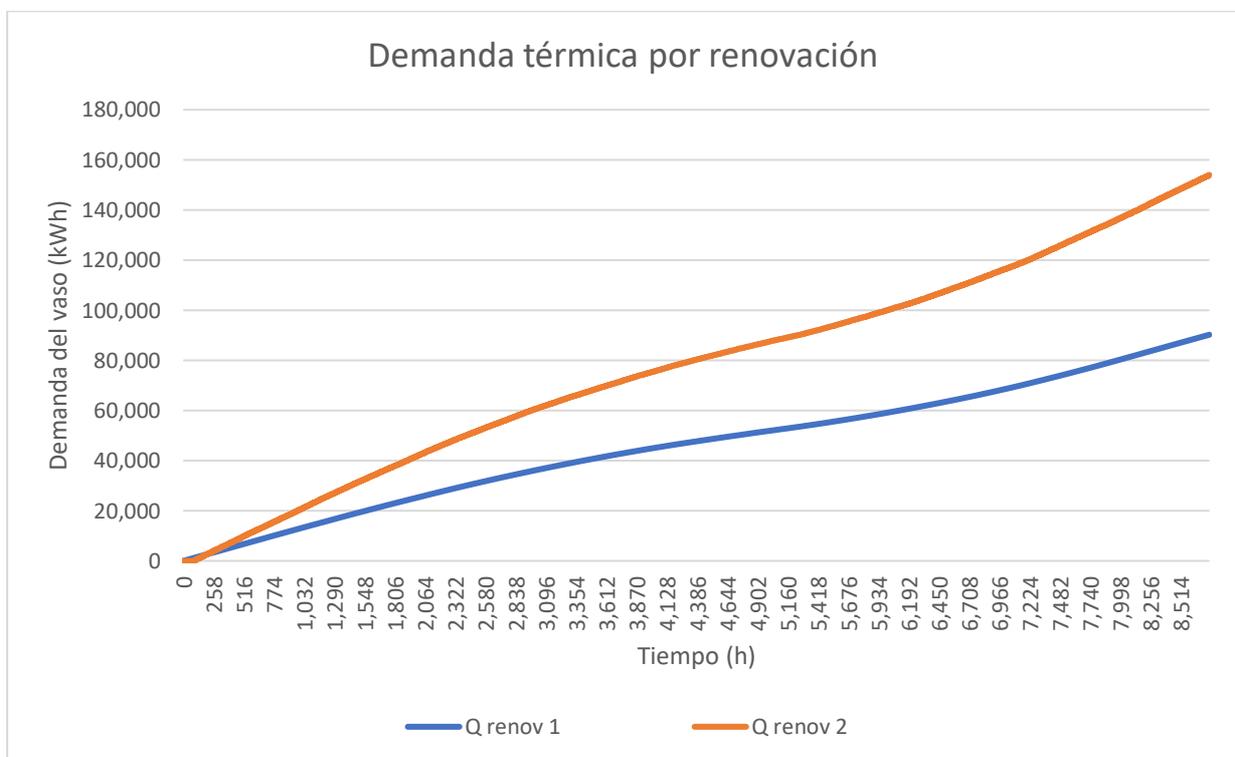


Gráfico 14: Comparativa de la demanda térmica por renovación en los modelos 1 y 2

Por último, dado que los datos desde los que partíamos para obtener la correlación entre el CIC y número de bañistas no eran de muy buena calidad, se ha realizado un estudio de sensibilidad para ver cómo una posible variación en los datos de origen proporcionados por el Ayuntamiento de Águilas hubiese afectado a los resultados finales obtenidos para el modelo 2.

Para ello, se ha modificado la pendiente de la recta que relaciona el incremento del cloro combinado con el número de bañistas en un  $\pm 5\%$ , un  $\pm 10\%$  y un  $\pm 15\%$ .

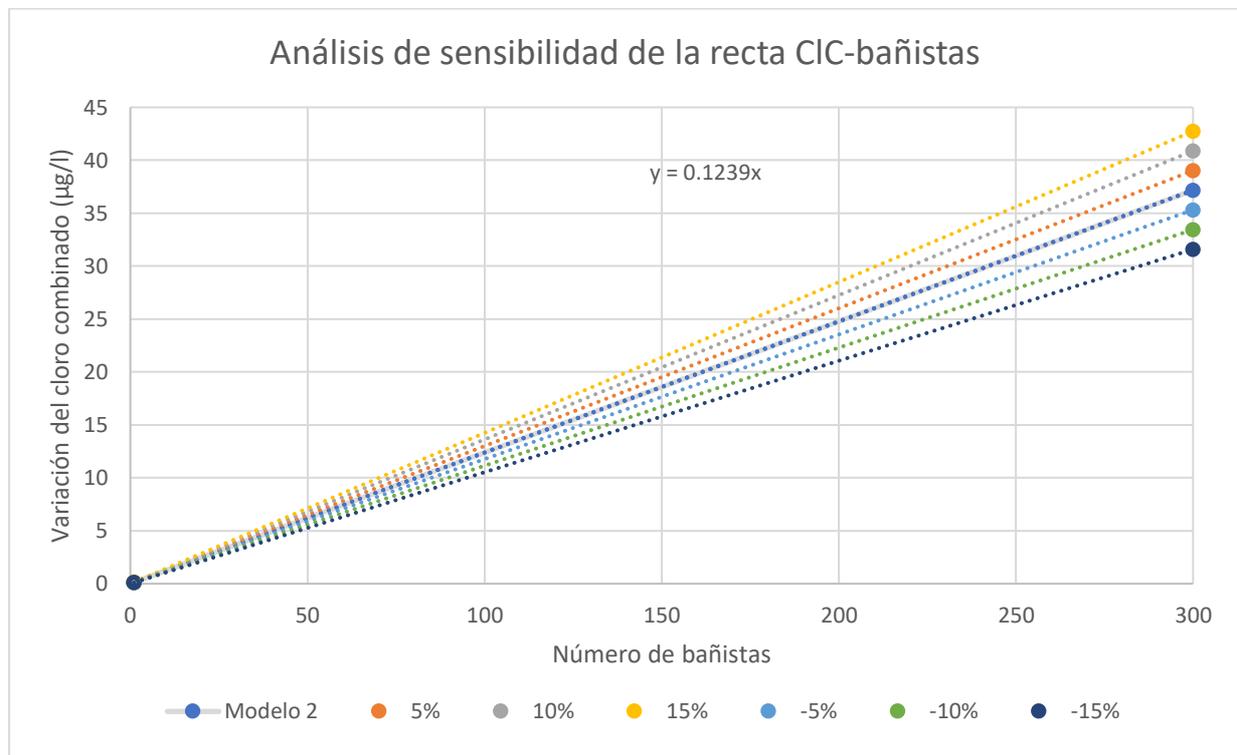


Gráfico 15: Rectas para analizar la sensibilidad del ajuste CIC-Bañistas

Para cada una de las rectas mostradas en el gráfico 15 se ha analizado su masa de agua de renovación, el calor necesario para elevar la temperatura de esa masa de agua hasta la temperatura de consigna, la producción de energía térmica en la caldera y la producción de energía térmica total.

Los resultados de este análisis se muestran en la tabla 12.

	<b>Modelo 2</b>	<b>+5%</b>	<b>+10%</b>	<b>+15%</b>	<b>-5%</b>	<b>-10%</b>	<b>-15%</b>
<b>Pendiente</b>	0.1239	0.1301	0.1363	0.1425	0.1177	0.1115	0.1053
<b>Mrenov (m<sup>3</sup>)</b>	9,775	10,288	10,747	11,309	9,247	8,738	8,291
<b>Diferencia</b>		5.2%	9.9%	15.7%	-5.4%	-10.6%	-15.2%
<b>Q renov (kWh)</b>	153,988	162,061	169,298	178,159	145,668	13,7644	13,0604
<b>Diferencia</b>	0	5.2%	9.9%	15.7%	-5.4%	-10.6%	-15.2%
<b>Q caldera (kWh)</b>	278,209	279,413	315,128	337,561	254,751	241,332	231,941
<b>Diferencia</b>	0	0.4%	13.3%	21.3%	-8.4%	-13.3%	-16.6%
<b>Qgen total (kWh)</b>	444,621	445,342	473,887	491,790	425,488	414,852	407,453
<b>Diferencia</b>	0	0.2%	6.6%	10.6%	-4.3%	-6.7%	-8.4%

*Tabla 12: Resultados obtenidos en el análisis de sensibilidad de la curva CIC-Bañistas*

De los resultados mostrados en la tabla 12 se deduce que la masa de agua renovada depende directamente del incremento en el número de bañistas, así como el calor necesario para elevar su temperatura hasta el valor de consigna.

La variación de la pendiente también se ve reflejada en el consumo de la caldera, llegando a incrementarse hasta un 21% en el caso en el caso de la curva cuya pendiente se ha incrementado un 15%.

No obstante, analizando el valor de energía total generada, la diferencia se reduce hasta un 10%.

Para mejorar el ajuste de la curva sería necesario hacer un estudio detallado de las mediciones de cloro combinado y del número de usuarios que se registran en una piscina con unos datos de mejor calidad.

## 6.4. MODELO 3 – PISCINA CON CLORACIÓN SALINA POR ELECTRÓLISIS

### 6.4.1. CARACTERÍSTICAS DEL MODELO

Una vez analizado el comportamiento de una piscina tradicional, vamos a comparar los resultados de los modelos 1 y 2 con los obtenidos en el caso de una piscina con cloración salina por electrólisis.

Como se ha comentado en el apartado 4.2, la cloración salina tiene la ventaja sobre las piscinas con cloración tradicional de que no produce cloraminas, ya que éstas son desintegradas en las membranas de la electrólisis.

Al no haber presencia de cloraminas, podemos considerar que el aporte de agua de renovación es nulo, pues no es necesaria la adición de un porcentaje de agua de aporte que garantice las condiciones higiénico-sanitarias del agua del vaso. Además, el cloro contenido en la sal y liberado en el proceso de electrólisis, una vez ha cumplido su función desinfectante, se vuelve a convertir en sal.

Por lo tanto, igualamos en TRNSYS el volumen de agua de renovación a cero.

```
%renovacion  
mrenov=0 %m3
```

Por otro lado, aunque los sistemas de cloración salina por electrólisis puedan trabajar con concentraciones de sal de entre 3 y 5 gramos por litro, lo habitual es que en las piscinas se trabaje con una concentración de 3 g/l. La salinidad tiene un efecto sobre la densidad del agua, por lo que, al modificar la salinidad del agua, es necesario modificar también la densidad del agua.

En la bibliografía encontramos curvas que relacionan la salinidad del agua con su densidad<sup>23</sup>. Por ejemplo, la imagen 21 muestra la variación de la densidad de agua pura a 4°C.

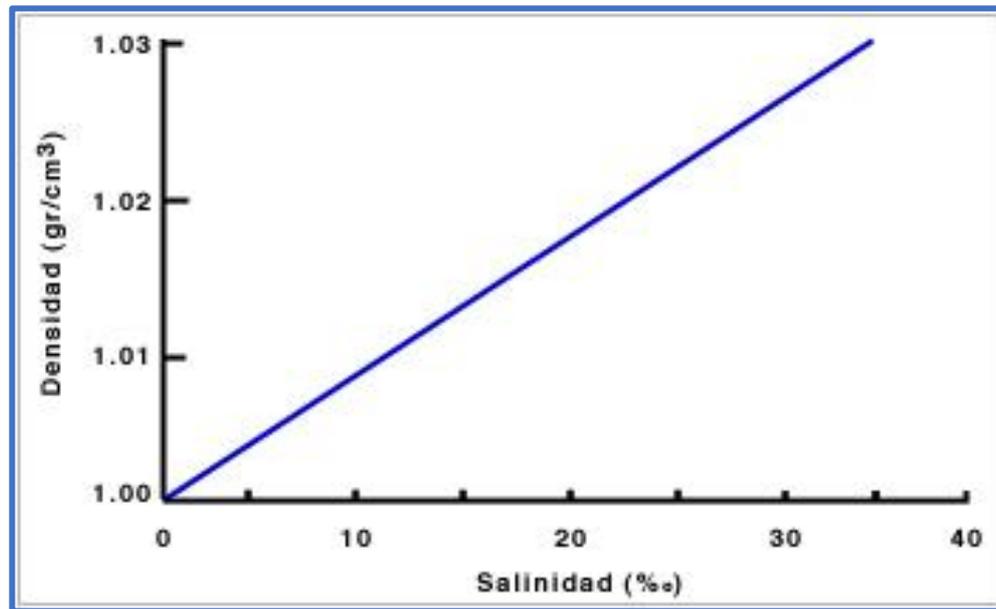


Imagen 19: variación de la densidad del agua según la salinidad

En la imagen 19 se muestra el efecto que la salinidad tiene sobre la densidad del agua. A partir de estos valores, obtenemos la función que relaciona la salinidad con la densidad (gráfico 16):

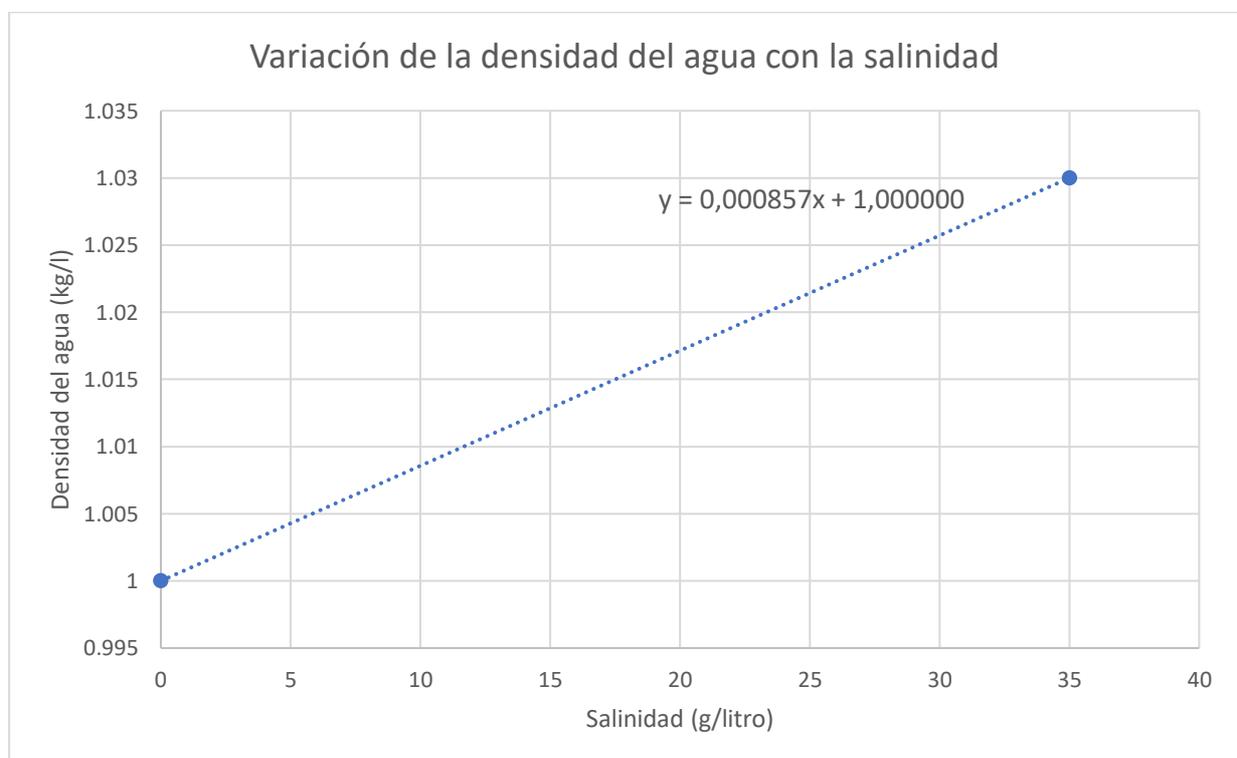


Gráfico 16: Variación de la densidad en función de la concentración de sal

De este modo, en el gráfico 16 se ha establecido una correlación entre la densidad del agua a 4°C y su contenido en sal:

$$y = 0,000857x + 1,000000$$

Donde  $y$  es la densidad del agua en kg/m<sup>3</sup> y  $x$  es la concentración de sal en g/l, y siendo 1 el valor de la densidad del agua con una concentración de sal nula a la temperatura dada de 4°C.

Aunque para hacer un mejor ajuste de la densidad deberíamos conocer los valores de la curva de salinidad para la temperatura del agua del vaso, podemos asumir que el incremento en la densidad es proporcional al de la curva obtenida en el gráfico 16, quedando la expresión que relaciona ambas variables del siguiente modo:

$$y = 0,000857x + \rho_{agua}(T_{piscina})$$

Donde  $\rho_{agua}(T_{piscina})$  es la densidad del agua a la temperatura del agua de la piscina.

A continuación, programamos en TRNSYS esta variación en la densidad del agua:

```
%densidades
```

```
vespagua= 287.055*Tagua/(Pabsoluta-Psatagua)*1000 % l/kg
```

```
roagua = (1/vespagua*1000)+3*0.000857 %g/l= kg/m3
```

#### 6.4.2.RESULTADOS OBTENIDOS

Comenzamos analizando la demanda del vaso (tabla 13) y observamos cómo la demanda total se ha reducido hasta los 288MWh, de los cuales las pérdidas por evaporación suponen el 91% de la demanda y el 9% restante se emplea para compensar las pérdidas por radiación.

Modelo 3	Demanda (kWh)
Q evap	261,177
Q conv	0
Q rad	27,038
Q cond	0
Q renov	0
Q total	288,215

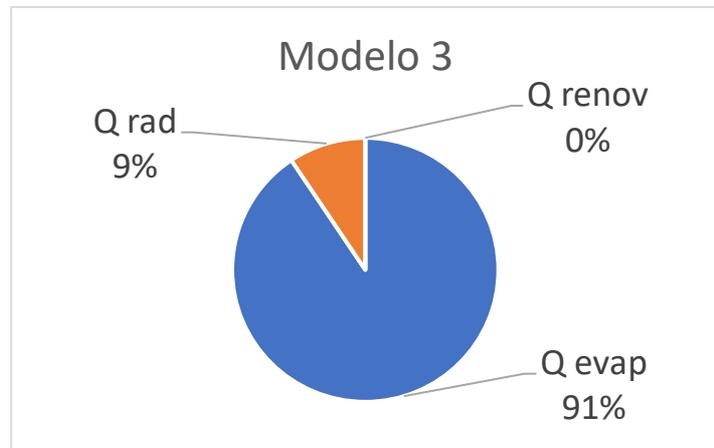


Tabla 13: Demanda de energía térmica en el modelo 3

En este caso, además de ser nulas las pérdidas por renovación de agua, también lo son las pérdidas por convección y por conducción, ya que la temperatura del aire interior está en todo momento por encima de la temperatura del agua del vaso, y la temperatura del sótano se mantiene también por encima de la temperatura de las paredes de la piscina, como se observa en el gráfico 17.

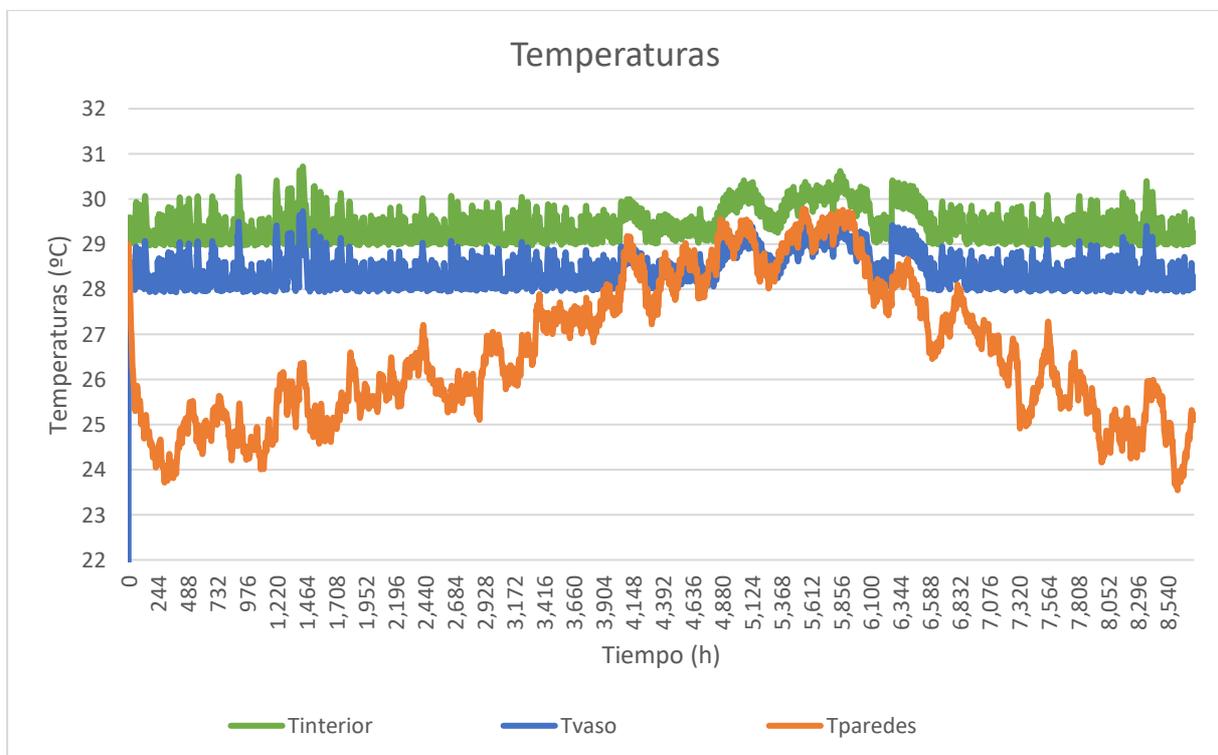


Gráfico 17: Temperaturas en el modelo 3

A continuación, analizamos la energía térmica generada en la caldera y la procedente de la instalación solar térmica (tabla 14). En este modelo, la energía total producida suma 288MWh, donde el aporte de la caldera se ha reducido a un 43% y la instalación solar térmica es capaz de cubrir el 57% de la demanda de la instalación.

	<b>Generación (kWh)</b>
<b>Q solar</b>	165,532
<b>Q caldera</b>	122,683
<b>Q total</b>	288,215

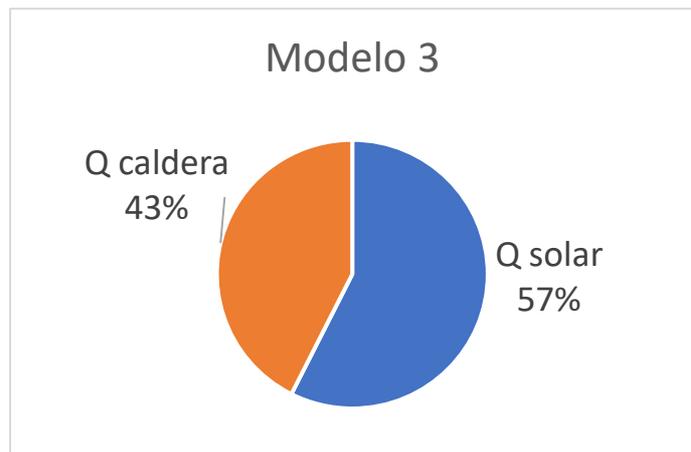


Tabla 14: Producción de energía térmica en el modelo 3

A continuación, se muestra un resumen de los valores obtenidos en el modelo 3 (tabla 15), así como la curva de producción acumulada de energía térmica (gráfico 18) y la demanda acumulada del vaso (gráfico 19).

<b>Modelo 3</b>	<b>kWh</b>
<b>Q demanda</b>	288,215
<b>Q evap</b>	261,177
<b>Q rad</b>	27,038
<b>Q renov</b>	0
<b>Q generación</b>	288,215
<b>Q solar</b>	165,532
<b>Q caldera</b>	122,683
	<b>m<sup>3</sup></b>
<b>m renov</b>	0

Tabla 15: Resumen de resultados en el modelo 3

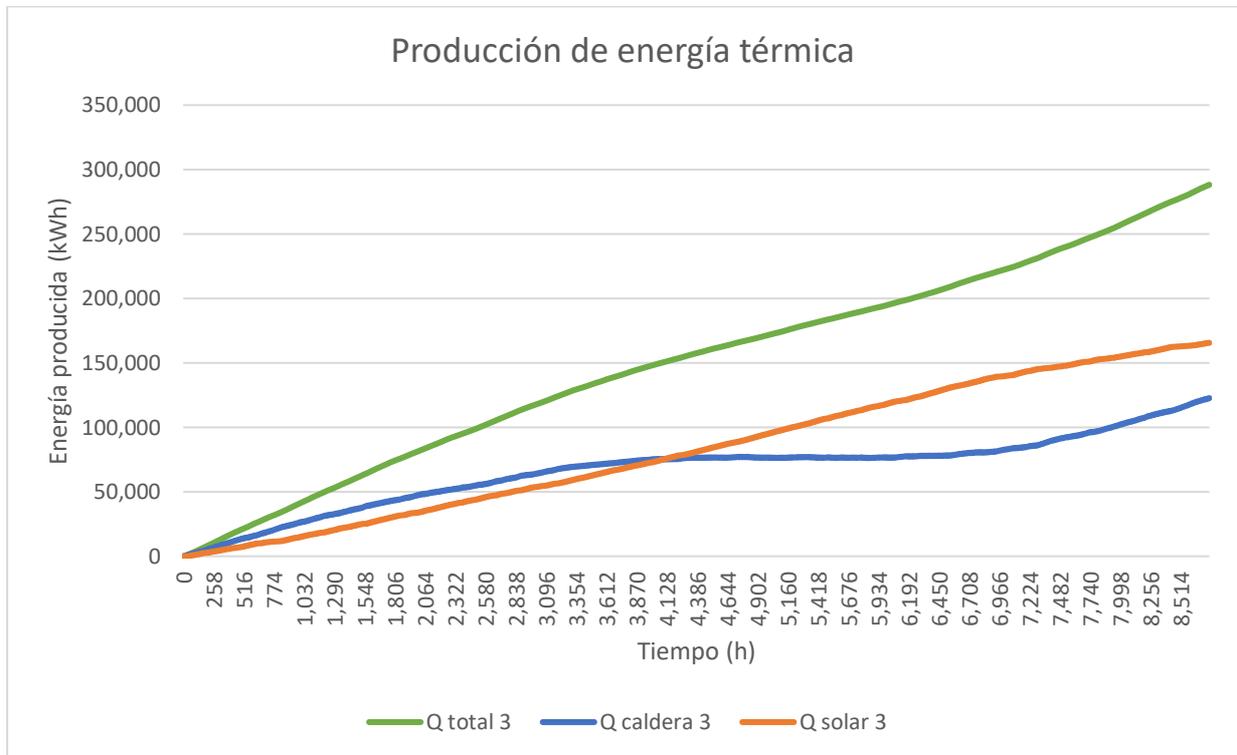


Gráfico 18: Producción de energía térmica en el modelo 3

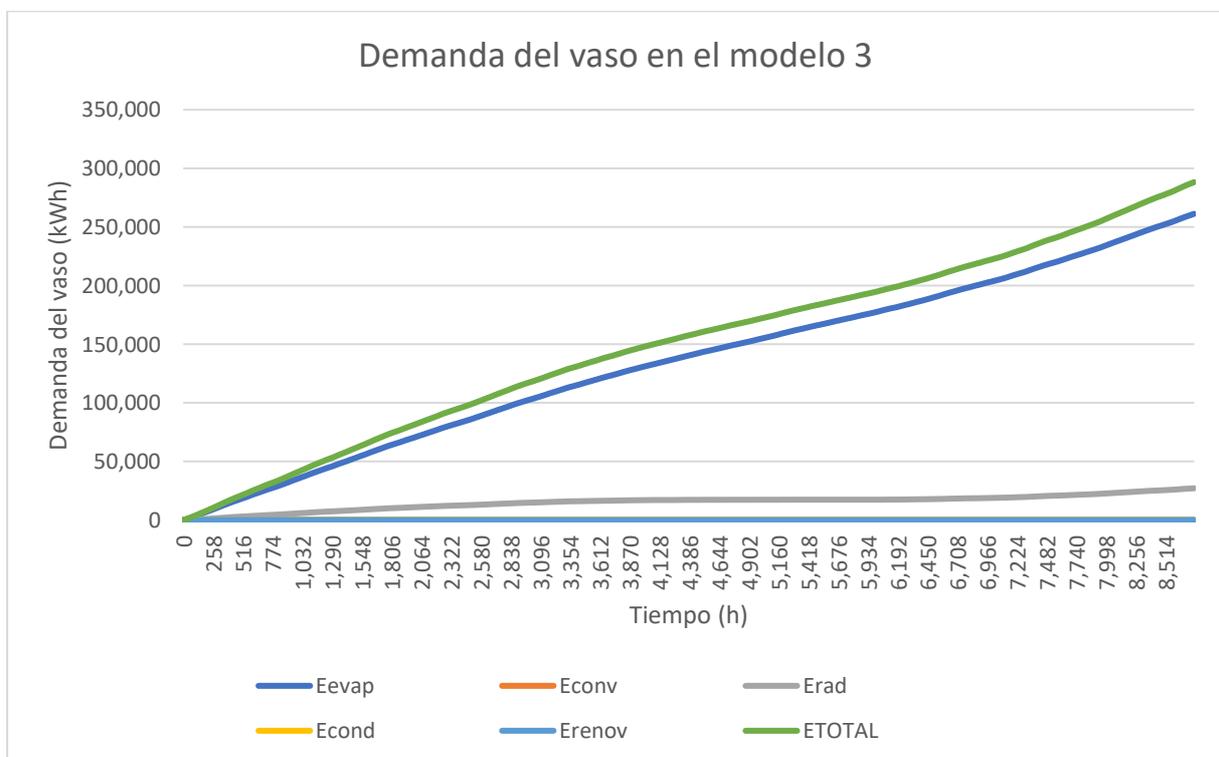


Gráfico 19: Demanda de energía térmica en el modelo 3

## 6.5. MODELO 4 – PISCINA CON CLORACIÓN SALINA POR HIDRÓLISIS

### 6.5.1. CARACTERÍSTICAS DEL MODELO

La única diferencia entre el modelo 3 y el modelo 4 es el cambio en la densidad del agua, pues aunque la hidrólisis tenga un consumo energético ligeramente superior al de la electrólisis, en ambos casos se trata de un consumo despreciable (del orden de 7MWh).

Los equipos de cloración salina por hidrólisis consiguen disociar además de la sal la molécula del agua, lo que les permite trabajar con unas cantidades de sal en el agua mucho menores, del orden de 1.5g/l.

Para calcular este modelo únicamente hay que modificar el renglón de la densidad del agua para ajustar la salinidad.

```
%densidades
```

```
vespagua= 287.055*Tagua/ (Pabsoluta-Psatagua) *1000 % l/kg
```

```
roagua = (1/vespagua*1000) +1.5*0.000857 %g/l= kg/m3
```

Al igual que en el modelo 3, también igualamos a cero el caudal de renovación.

```
%renovacion
```

```
mrenov=0
```

Una vez realizados los cambios en TRNSYS, procedemos a analizar los resultados obtenidos.

### 6.5.2. RESULTADOS OBTENIDOS

Comenzamos analizando la demanda de energía térmica del vaso (tabla 16). La demanda total suma 292MWh, un valor ligeramente superior al obtenido en el modelo 3. De la demanda total, un 91% se emplea en compensar las pérdidas por evaporación, mientras que el 9% restante es necesario para cubrir las pérdidas por radiación.

Modelo 4	Demanda (kWh)
Q evap	264,782
Q conv	0
Q rad	27,041
Q cond	0
Q renov	0
Q total	291,823

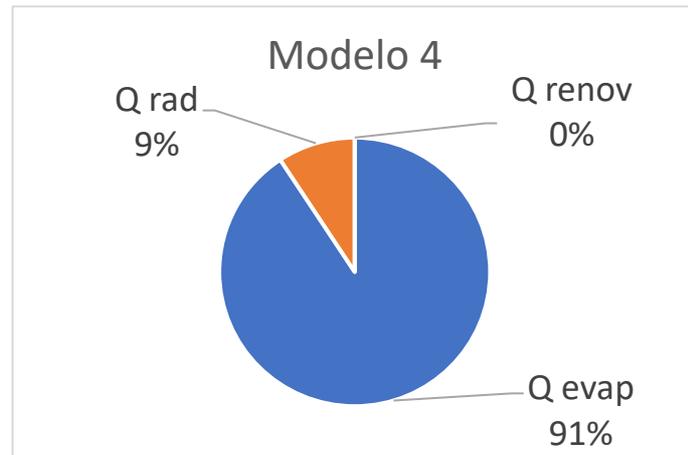


Tabla 16: Demanda de energía térmica en el modelo 4

En este caso, además de ser nulas las pérdidas por renovación de agua, también lo son las pérdidas por convección y por conducción, ya que la temperatura del aire interior está en todo momento por encima de la temperatura del agua del vaso, y la temperatura del sótano se mantiene también por encima de la temperatura de las paredes de la piscina, como se observa en el gráfico 20.

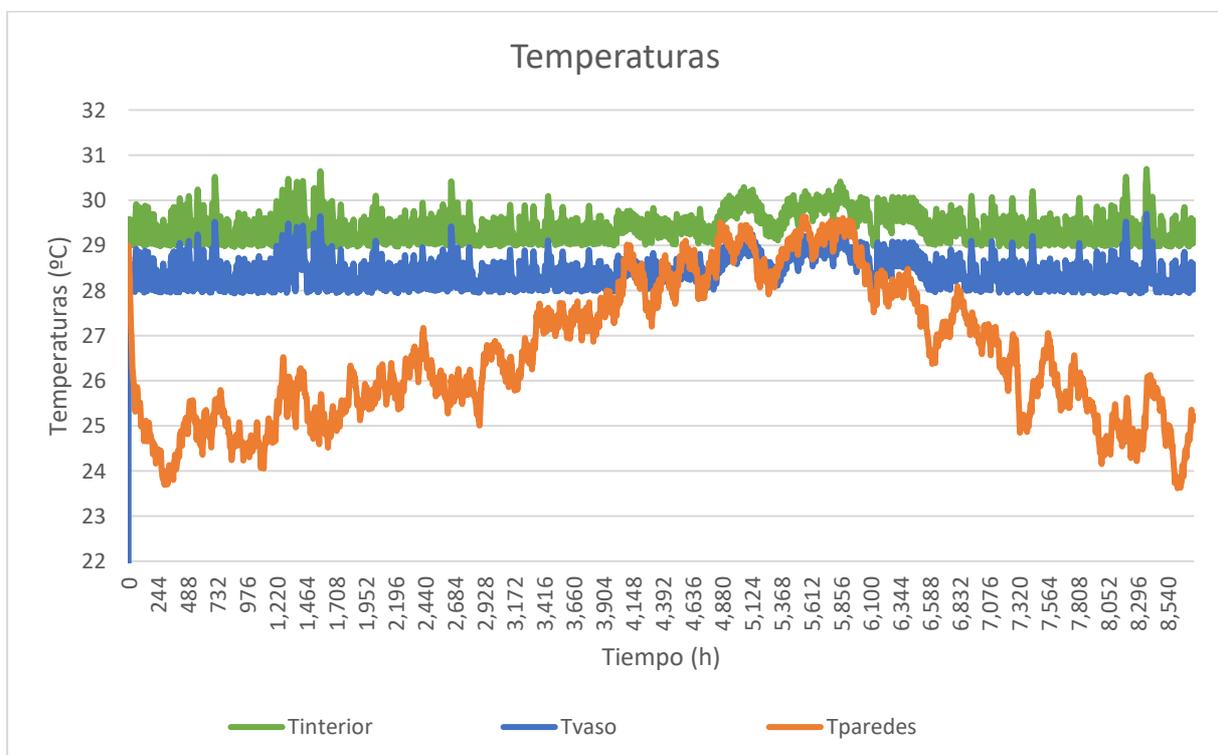


Gráfico 20: Temperaturas en el modelo 4.

Una vez analizada la demanda, procedemos a analizar la generación de energía térmica (tabla 17), tanto la procedente de la caldera como la procedente de la instalación solar térmica. En el modelo 4, la energía total producida suma 291MWh, donde el aporte de la caldera se ha reducido a un 43% y la instalación solar térmica es capaz de cubrir el 57% de la demanda de la instalación.

	Generación (kWh)
<b>Q solar</b>	165,697
<b>Q caldera</b>	126,126
<b>Q total</b>	291,823

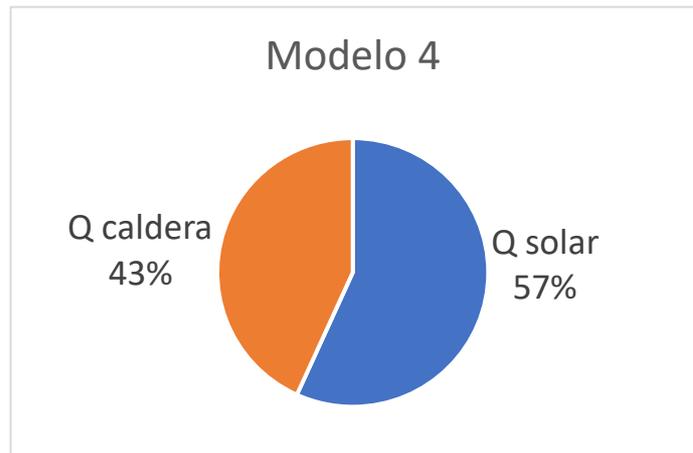


Tabla 17: Producción de energía térmica en el modelo 4

A continuación, en la tabla 18 mostramos un resumen de los valores obtenidos en el modelo 4, así como la curva de producción acumulada de energía térmica y la demanda acumulada del vaso:

Modelo 4	kWh
<b>Q demanda</b>	291,823
<b>Q evap</b>	264,782
<b>Q rad</b>	27,041
<b>Q renov</b>	0
<b>Q generación</b>	291,823
<b>Q solar</b>	165,697
<b>Q caldera</b>	126,126
	<b>m<sup>3</sup></b>
<b>m renov</b>	0

Tabla 18: Resumen de resultados en el modelo 4

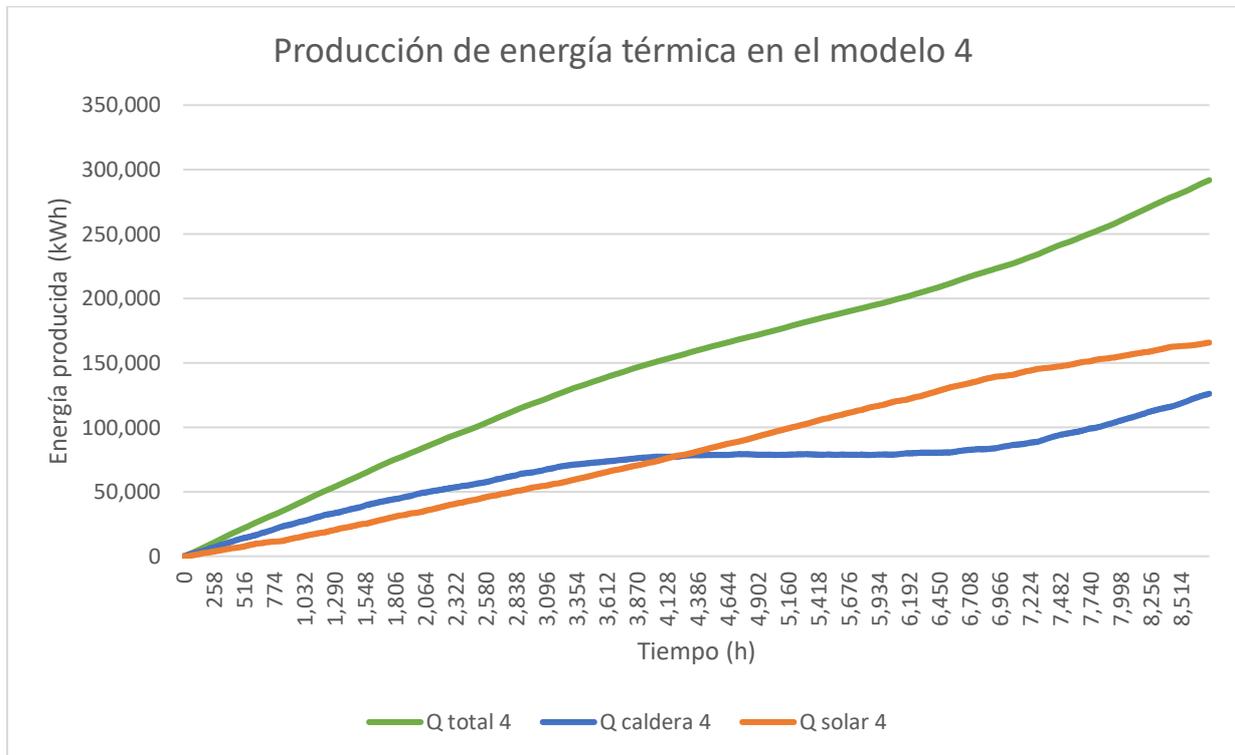


Tabla 19: Producción de energía térmica en el modelo 4

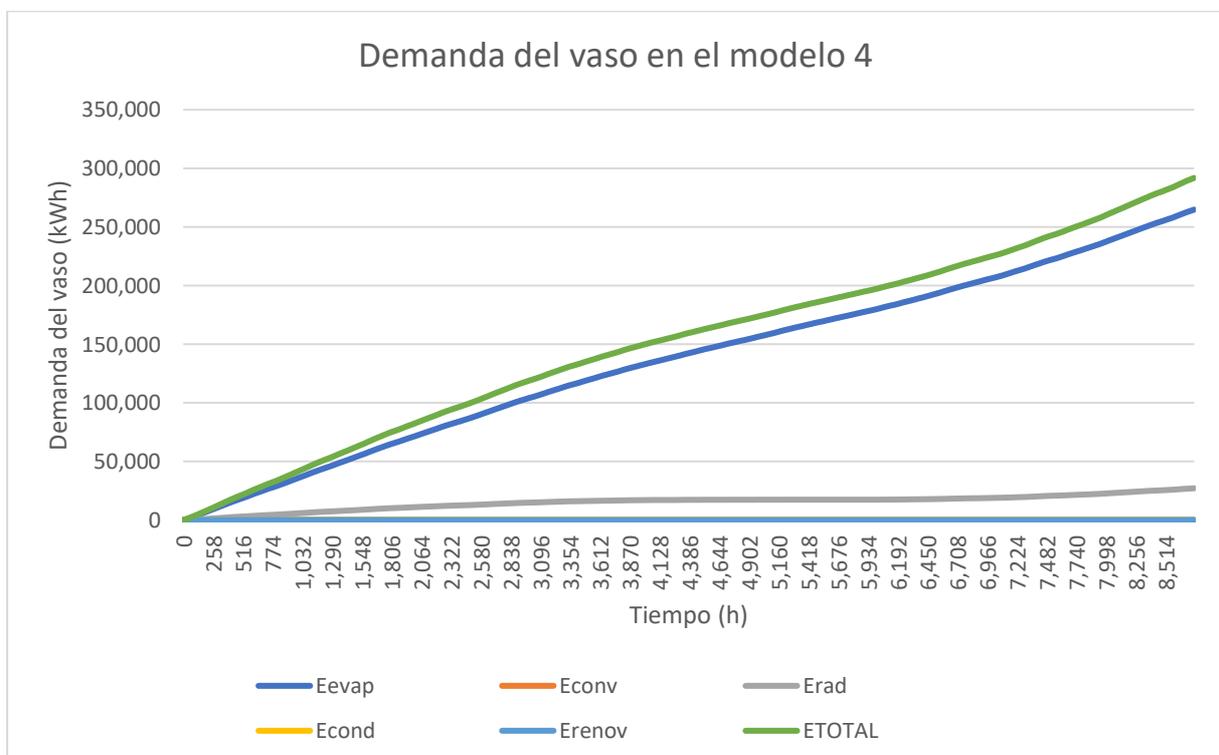


Gráfico 21: Demanda de energía térmica en el modelo 4

## 7. ANÁLISIS DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES

### 7.1. ANÁLISIS DE LA DEMANDA DEL VASO

A continuación, en la tabla 20 se presenta un resumen con los datos obtenidos en cada uno de los cuatro modelos analizados.

	<b>Modelo 1 Cloración tradicional (normativa)</b>	<b>Modelo 2 Cloración tradicional (CIC)</b>	<b>Modelo 3 Cloración salina por electrólisis</b>	<b>Modelo Cloración salina por hidrólisis</b>
<b>Q evap</b>	265,110	264,149	261,177	264,782
<b>Q conv</b>	0	0	0	0
<b>Q rad</b>	26,675	26,484	27,038	27,041
<b>Q cond</b>	0	0	0	0
<b>Q renov</b>	90,244	153,988	0	0
<b>Q total</b>	<b>382,028</b>	<b>444,621</b>	<b>288,215</b>	<b>291,823</b>

*Tabla 20: Tabla comparativa de la demanda del vaso en los cuatro modelos (kWh)*

La demanda para compensar las pérdidas por evaporación y por radiación se mantiene prácticamente constante durante los cuatro modelos, por lo que la diferencia entre la demanda de los modelos tiene su origen en la energía térmica para calentar el agua de renovación hasta la temperatura de consigna.

Como se comentó en el punto 6.3 de la memoria, el modelo 2 no refleja a priori un escenario real, pues se ha demostrado que la curva que relaciona número de bañistas y cloro combinado es muy sensible ante la variación de los datos de entrada, y éstos no han sido datos precisos ni contrastados.

En el gráfico 22 se compara la energía demandada en los modelos 1, 3 y 4. También se ha incluido la energía del modelo 2 para tenerlo como referencia, pero se ha cambiado el formato de la línea y se ha marcado como discontinua. También observamos que la diferencia en la demanda de los modelos 3 y 4 es mínima.

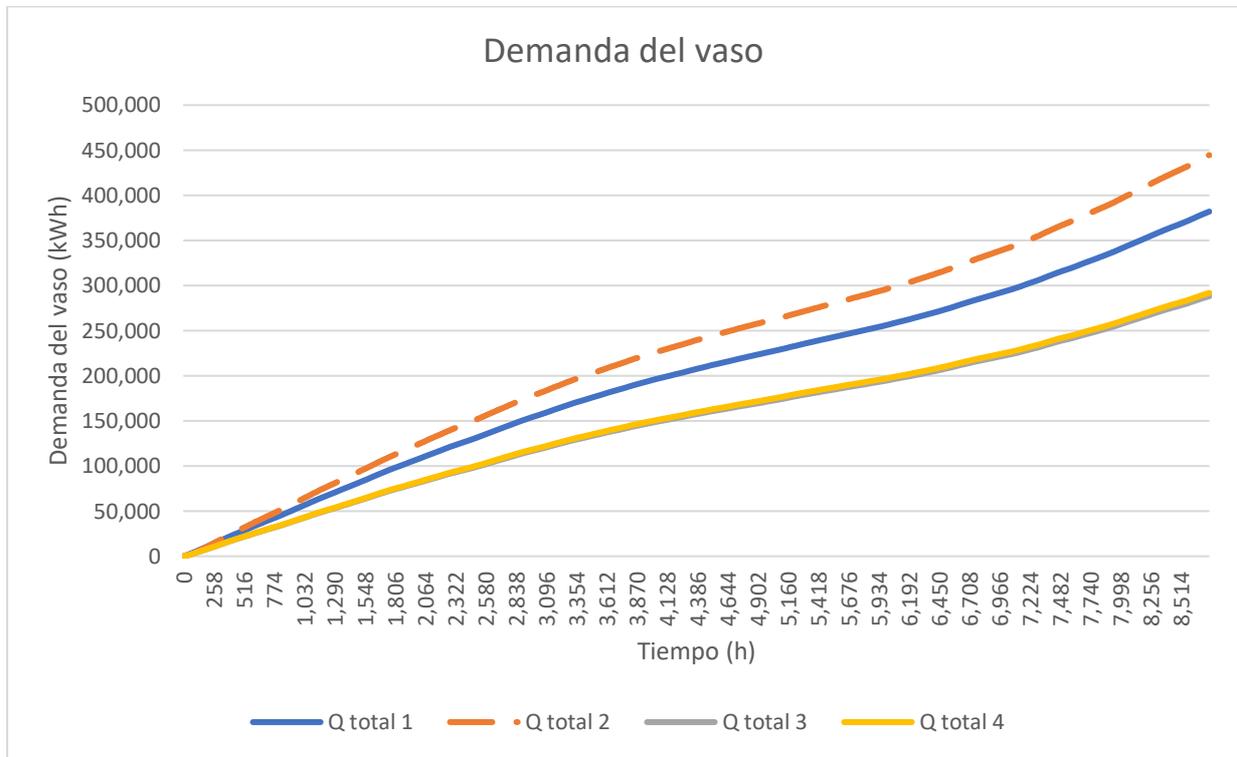


Gráfico 22: Demanda de energía térmica en los cuatro modelos

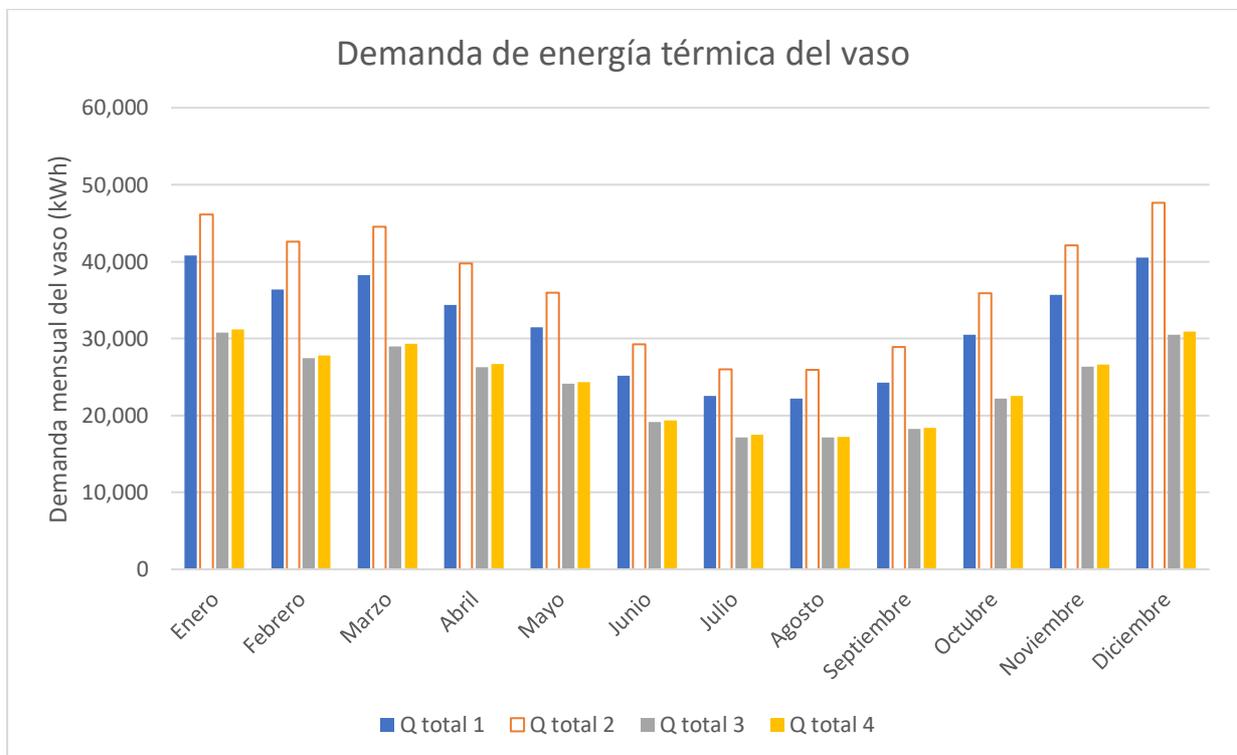


Gráfico 23: Demanda de energía térmica del vaso mes a mes en los cuatro modelos

Como conclusión, si tomamos el modelo 1 como referencia, se llega a las siguientes conclusiones:

- Al cambiar un sistema de cloración tradicional por uno de cloración salina (ya sea por electrólisis o hidrólisis), la demanda de energía térmica se reduce en un 24-25%.
- A priori, no existe diferencia en términos energéticos entre un sistema con cloración salina por electrólisis y uno por hidrólisis.
- En el modelo 2, donde la renovación se ha calculado a partir del incremento de cloro combinado, la demanda se ha incrementado un 16%.

	<b>Q total</b>	<b>Diferencia</b>
<b>Modelo 1</b>	382,028	
<b>Modelo 2</b>	444,621	+16%
<b>Modelo 3</b>	288,215	-25%
<b>Modelo 4</b>	291,823	-24%

*Tabla 21: Diferencia entre las demandas*

## 7.2. ANÁLISIS DE LA EVAPORACIÓN DE AGUA EN LOS MODELOS 3 Y 4

Analizando los resultados de los modelos 3 y 4 se ha observado que, a pesar de que la demanda de energía sea similar en ambos modelos, existe una pequeña diferencia en la energía destinada a cubrir pérdidas por evaporación.

	<b>Q evap (kWh)</b>	<b>Diferencia (kWh)</b>	<b>Diferencia (%)</b>
<b>Modelo 3 - 3g/l</b>	261,177	- 3,605	- 1.4%
<b>Modelo 4 - 1.5g/l</b>	264,782		

Tabla 22: Análisis de la evaporación en los modelos 3 y 4.

Como se observa en la tabla 22, a mayor salinidad, se produce menos evaporación de agua, por lo que la demanda de energía para compensar las pérdidas por evaporación es un 1.4% menor en el modelo 3.

Por otro lado, la demanda de energía térmica es un 1.3% inferior en el modelo que simula un sistema de cloración salina por electrólisis (tabla 23).

	<b>Q total (kWh)</b>	<b>Diferencia (%)</b>
<b>Modelo 3 - 3g/l</b>	261,177	- 1.3%
<b>Modelo 4 - 1.5g/l</b>	264,782	

Tabla 23: Análisis de la demanda en los modelos 3 y 4

A la vista de estos resultados, podemos concluir que no existe una diferencia significativa en el uso de un sistema de cloración salina por electrólisis o un sistema de cloración salina por hidrólisis.

### 7.3. ANÁLISIS DE LA PRODUCCIÓN DE ENERGÍA

En la tabla 24 se muestran los datos de producción de energía para cada uno de los cuatro modelos analizados.

	<b>Modelo 1 Cloración tradicional (normativa)</b>	<b>Modelo 2 Cloración tradicional (CIC)</b>	<b>Modelo 3 Cloración salina por electrólisis</b>	<b>Modelo Cloración salina por hidrólisis</b>
<b>Q solar</b>	166,061	166,412	165,532	165,697
<b>Q caldera</b>	215,968	278,209	122,683	126,126
<b>Q total</b>	382,028	444,621	288,215	291,823

Tabla 24: Tabla comparativa de la producción de energía térmica en los cuatro modelos (kWh)

Dado que en el modelo 2 no está científicamente contrastado con unos datos en origen adecuados, en el gráfico 24 se compara la producción de energía térmica de los modelos 3 y 4 con el modelo 1. El modelo 2 se ha dejado en el análisis para mostrarlo como referencia, pero la curva se ha marcado con trazos discontinuos.

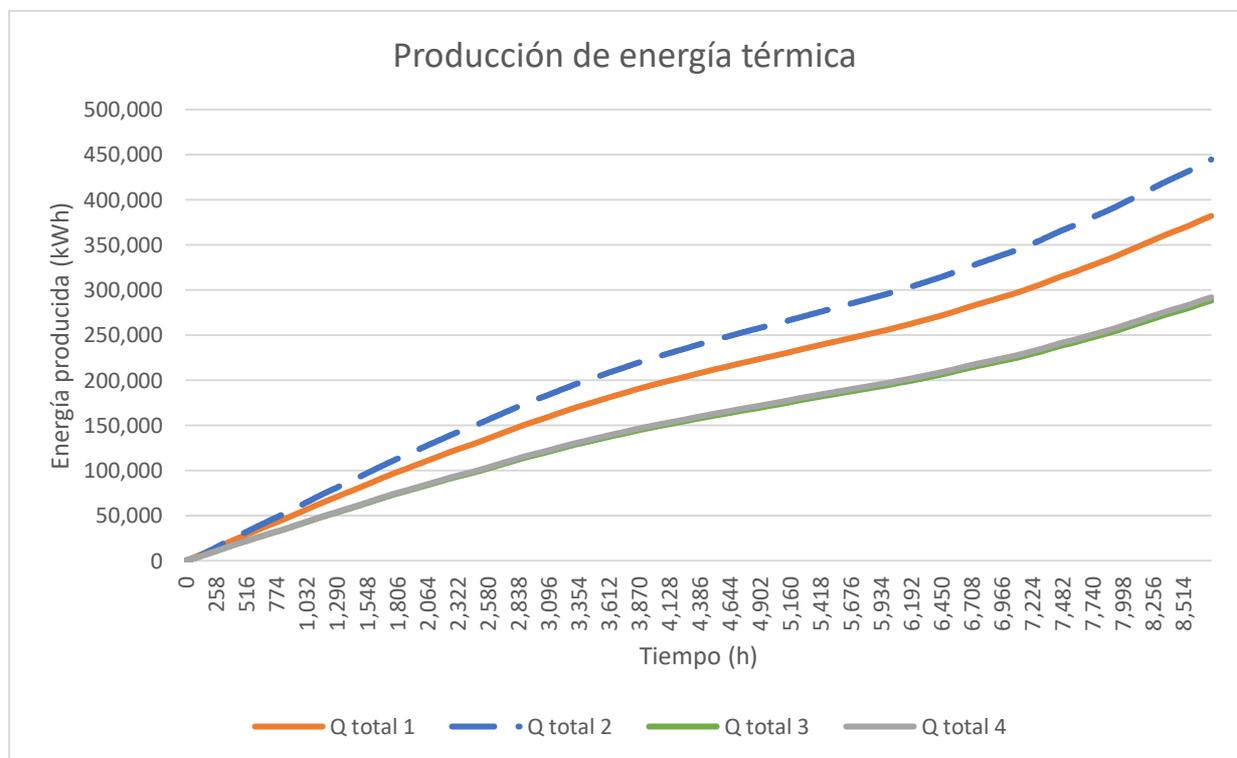


Gráfico 24: Producción de energía térmica en los cuatro modelos.

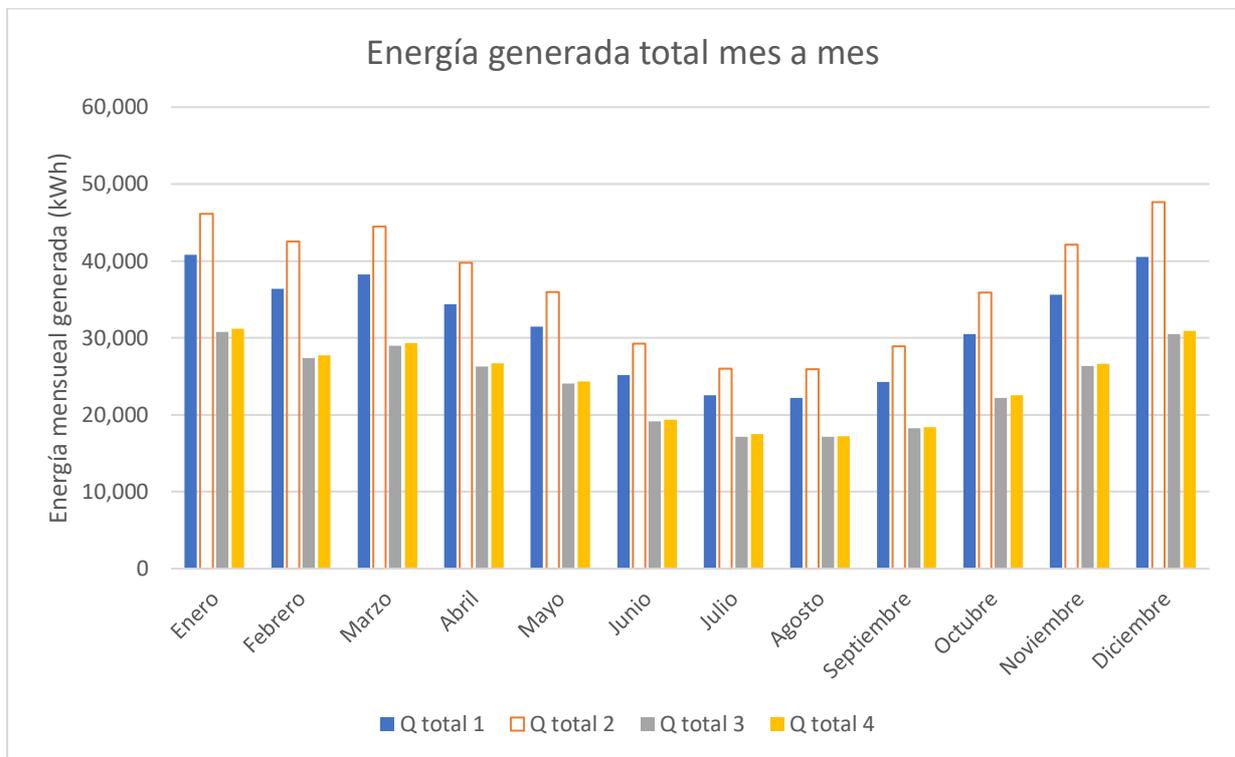


Gráfico 25: Producción mensual de energía térmica en los cuatro modelos.

Si de nuevo tomamos el modelo 1 como referencia, llegamos a las siguientes conclusiones:

- Al cambiar un sistema de cloración tradicional por uno de cloración salinas (ya sea por electrólisis o hidrólisis), la generación de térmica para cubrir las necesidades de la piscina se reduce en un 24-25%.
- La reducción en la demanda se ve directamente relacionada con la disminución de la energía generada, sumando las contribuciones de la caldera de biomasa y de la instalación solar térmica.

	Q total	Diferencia
<b>Modelo 1</b>	382,028.44	-
<b>Modelo 2</b>	444,621.05	+16%
<b>Modelo 3</b>	288,214.66	-25%
<b>Modelo 4</b>	291,822.62	-24%

Tabla 25: Diferencia entre la generación de energía térmica (kWh)

Si analizamos el desglose de la energía producida, comprobamos cómo la energía solar térmica generada se mantiene constante a lo largo de los cuatro modelos (gráfico 26).

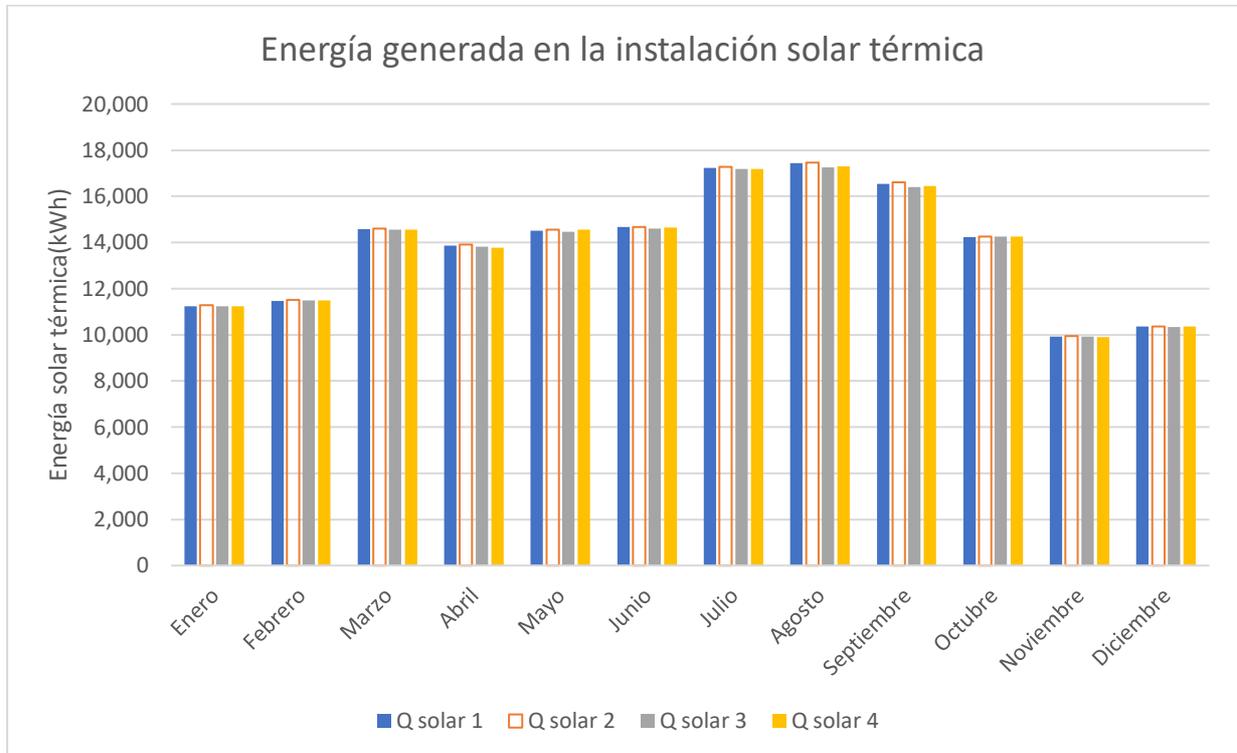


Gráfico 26: Energía solar térmica generada cada mes.

De estos datos podemos llegar a las siguientes conclusiones:

- La producción de energía solar térmica es la misma en los cuatro modelos.
- La diferencia en la generación de energía térmica se centra por lo tanto única y exclusivamente en caldera, la cual reduce su consumo un 42-43% con respecto al modelo 1. Esto implica un ahorro directo de un 42-43% en la factura anual de combustible.
- En el modelo 2, la caldera aumenta su consumo un 29% con respecto al modelo 1, aunque este resultado no es concluyente.

	Q caldera	Diferencia
<b>Modelo 1</b>	215,967.70	-
<b>Modelo 2</b>	278,208.81	29%
<b>Modelo 3</b>	122,683.09	-43%
<b>Modelo 4</b>	126,125.91	-42%

Tabla 26: Diferencia entre la producción de energía térmica en la caldera (kWh)

Efectivamente, si analizamos la energía producida por la caldera mes a mes observamos un descenso significativo en sus cifras.

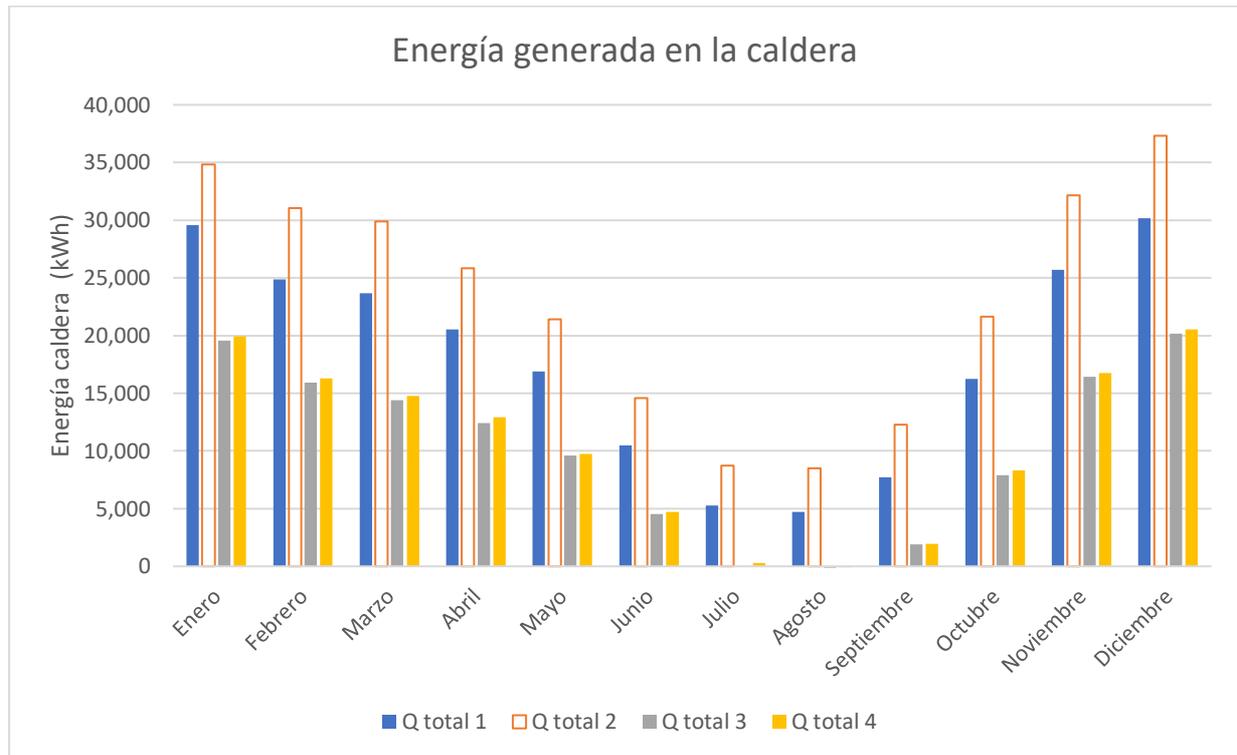


Gráfico 27: Energía generada en la caldera mes a mes.

Analizando los consumos mensuales en el gráfico 27, comprobamos cómo durante los meses de invierno el consumo se reduce hasta casi la mitad, y en verano hay dos meses completos en los que la instalación solar térmica aporta todo el calor que necesita la instalación.

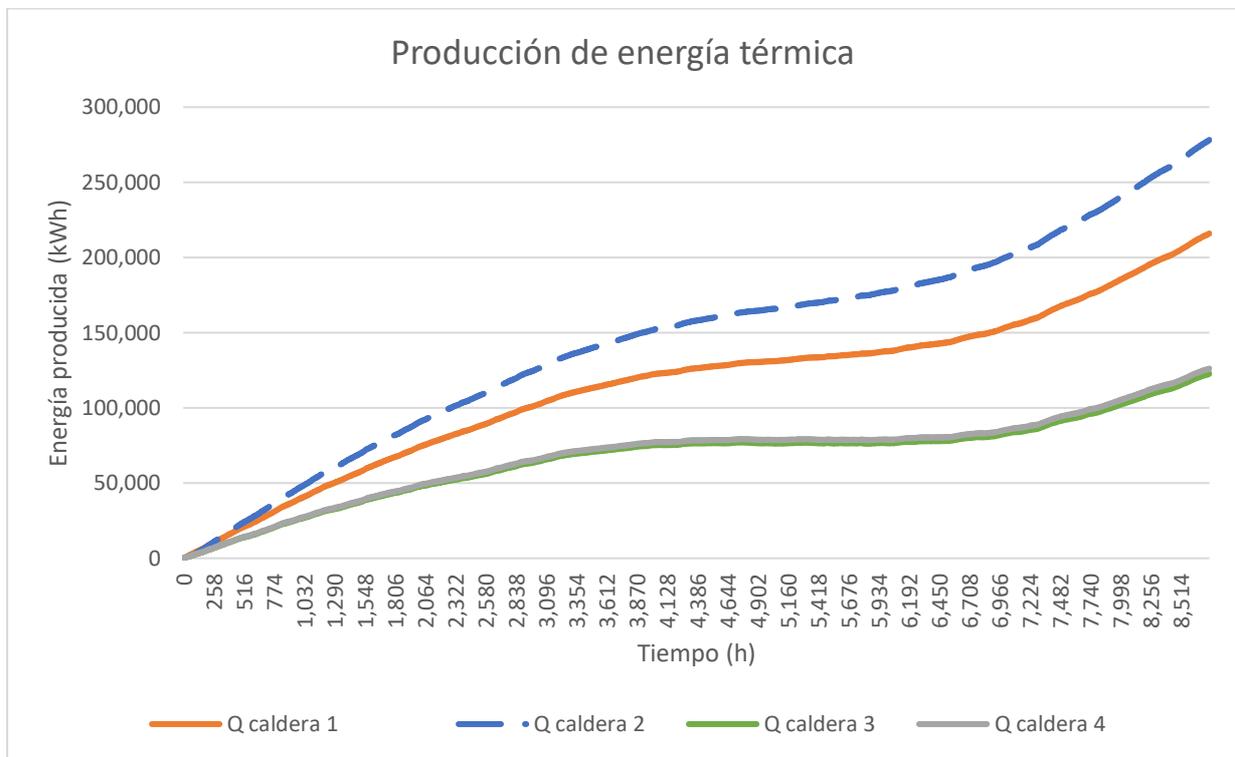


Gráfico 28: Producción de energía térmica en la caldera

Como conclusión de este Trabajo Fin de Máster podemos extraer que el uso de métodos de cloración salina no sólo proporciona un baño más agradable a los usuarios de las piscinas, sino que se produce un ahorro significativo por las siguientes razones:

1. Se elimina el coste anual del cloro y sus derivados como tratamiento desinfectante, el cual se sustituye por una pequeña cantidad de sal que se deberá aportar ocasionalmente para cubrir las posibles pérdidas en el filtro.
2. Se reduce la demanda de energía térmica en un 24-25%, pues no es necesario renovar agua para mantener las condiciones higiénico-sanitarias establecidas en la normativa.
3. En piscinas con una instalación mixta de energía solar térmica y caldera (bien sea de biomasa o de cualquier otro combustible), la reducción del 24-25% la demanda de energía se traduce en un ahorro directo en el consumo de la caldera de un 42-43%.

## 8. BIBLIOGRAFÍA

---

- <sup>1</sup> HIDRITEC (2011). Reducción de cloraminas en piscinas.
- <sup>2</sup> DELGADO, J.P., GARCÍA, J.R. (2018) Dynamic Simulation Model and Empirical Validation for Estimating Energy Demand in Indoor Swimming Pools
- <sup>3</sup> CONSEJO SUPERIOR DE DEPORTES (2005). Censo Nacional de Instalaciones Deportivas. <https://www.csd.gob.es/es/csd/instalaciones/censo-nacional-de-instalaciones-deportivas>
- <sup>4</sup> CREA y AYUNTAMIENTO DE JEREZ (2011). Auditoría energética de piscina cubierta. Plan de optimización energética municipal.
- <sup>5</sup> IDAE (2007). Reglamento de Instalaciones térmicas en los edificios. [https://www.idae.es/uploads/documentos/documentos\\_10540\\_Comentarios\\_RITE\\_GT7\\_07\\_200d691.pdf](https://www.idae.es/uploads/documentos/documentos_10540_Comentarios_RITE_GT7_07_200d691.pdf)
- <sup>6</sup> MINISTERIO DE SANIDAD, SERVICIOS SOCIALES E IGUALDAD (2013). Real Decreto 742/2013, de 27 de septiembre, por el que se establecen los criterios técnico-sanitarios de las piscinas. <https://www.boe.es/buscar/pdf/2013/BOE-A-2013-10580-consolidado.pdf>
- <sup>7</sup> RECIO, F. (2015). Cloraminas, el ‘veneno’ que se oculta en las piscinas. <https://www.elmundo.es/andalucia/2015/08/06/55c3318046163f88248b4579.html>
- <sup>8</sup> WOOD, B.R., COLOMBO, J.L., BENSON, B.E. (1987). Chlorine inhalation toxicity from vapours generated by swimming pool chlorinator tablets. [https://www.researchgate.net/publication/19338582\\_Chlorine\\_inhalation\\_toxicity\\_from\\_vapors\\_generated\\_by\\_swimming\\_pool\\_chlorinator\\_tablets](https://www.researchgate.net/publication/19338582_Chlorine_inhalation_toxicity_from_vapors_generated_by_swimming_pool_chlorinator_tablets)
- <sup>9</sup> LLANA, S., ZARZOSO, M. y PÉREZ, P. (2009). Riesgos para la salud de la natación en piscinas cloradas (I). [https://archivosdemedicinadeldeporte.com/articulos/upload/revision\\_riesgos\\_130\\_130.pdf](https://archivosdemedicinadeldeporte.com/articulos/upload/revision_riesgos_130_130.pdf)
- <sup>10</sup> DIRECCIÓN GENERAL DE ARQUITECTURA, VIVIENDA Y SUELO (2019). Documento Básico HE de Ahorro de Energía. <https://www.codigotecnico.org/pdf/Documentos/HE/DBHE.pdf>
- LIANA, S., ZARZOSO, M. and PEREZ-SORIANO, P. (2009). Health risks of swimming in chlorinated swimming pools (I) [https://www.researchgate.net/publication/294814977\\_Health\\_risks\\_of\\_swimming\\_in\\_chlorinated\\_swimming\\_pools\\_i](https://www.researchgate.net/publication/294814977_Health_risks_of_swimming_in_chlorinated_swimming_pools_i)
- Belloch, Salvador (2009). Health risks of swimming in chlorinated swimming pools (II) [https://www.researchgate.net/publication/288205844\\_Health\\_risks\\_of\\_swimming\\_in\\_chlorinated\\_swimming\\_pools\\_ii](https://www.researchgate.net/publication/288205844_Health_risks_of_swimming_in_chlorinated_swimming_pools_ii)
- DECKER, W and KOCH, H. (1978). Chlorine Poisoning at the Swimming Pool: An Overlooked Hazard [https://www.researchgate.net/publication/22398185\\_Chlorine\\_Poisoning\\_at\\_the\\_Swimming\\_Pool\\_An\\_Overlooked\\_Hazard](https://www.researchgate.net/publication/22398185_Chlorine_Poisoning_at_the_Swimming_Pool_An_Overlooked_Hazard)

- 
- <sup>11</sup> DIRECCIÓN GENERAL DE ARQUITECTURA, VIVIENDA Y SUELO (2019). Documento Básico HS de Salubridad.  
<https://www.codigotecnico.org/pdf/Documentos/HS/DccHS.pdf>
- <sup>12</sup> MINISTERIO DE LA PRESIDENCIA (2007). Real Decreto 1341/2007, de 11 de octubre, sobre la gestión de la calidad de las aguas de baño.  
<https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=BOE-A-2007-18581>
- <sup>13</sup> CONSEJERÍA DE SANIDAD DE LA REGIÓN DE MURCIA (1992). Decreto Núm. 58/1992, de 28 de mayo, por el que se aprueba el reglamento sobre condiciones higiénico-sanitarias de las piscinas de uso público, de la Región de Murcia.  
<https://www.murciasalud.es/legislacion.php?id=13966&idsec=79>
- <sup>14</sup> GRUPO LARA (2018). La diferencia entre el cloro libre y el cloro total.  
<https://piscinas-lara.com/la-diferencia-entre-el-cloro-libre-y-el-cloro-total/>
- <sup>15</sup> CSR LABORATORIO. ¿Qué es el cloro combinado de una piscina?  
[http://www.csrservicios.es/joomla/index.php?option=com\\_content&view=article&id=138:que-es-el-cloro-combinado-de-una-piscina&catid=97:aguas-de-piscina](http://www.csrservicios.es/joomla/index.php?option=com_content&view=article&id=138:que-es-el-cloro-combinado-de-una-piscina&catid=97:aguas-de-piscina)
- <sup>16</sup> AIKING, H., ACKERT, M., SCHOLTEN, R., FEENSTRA, J., VALKENBURG, H. (1994). Swimming pool chlorination: A health hazard? Toxicology Letters.  
[https://www.researchgate.net/publication/222136311\\_Swimming\\_pool\\_chlorination\\_A\\_health\\_hazard/citation/download](https://www.researchgate.net/publication/222136311_Swimming_pool_chlorination_A_health_hazard/citation/download)
- <sup>17</sup> COTTER, A and RYAN, A (2009). The pool chlorine hypothesis and asthma among boys.  
[https://www.researchgate.net/publication/26259937\\_The\\_pool\\_chlorine\\_hypothesis\\_and\\_asthma\\_among\\_boys](https://www.researchgate.net/publication/26259937_The_pool_chlorine_hypothesis_and_asthma_among_boys)
- SOUTH, M. and ISAACS, D. (2010). Chlorinated swimming pools bad for asthma.  
[https://www.researchgate.net/publication/295681174\\_Chlorinated\\_swimming\\_pools\\_bad\\_for\\_asthma](https://www.researchgate.net/publication/295681174_Chlorinated_swimming_pools_bad_for_asthma)
- <sup>18</sup> NEUMOSUR (2013). Nota de prensa: NEUMOSUR advierte que nadar en piscinas con exceso de cloro puede aumentar las posibilidades de que un menor desarrolle síntomas asmáticos.  
<https://www.neumosur.net/files/prensa/notasprensa/2013071701.pdf>
- <sup>19</sup> HAAG, W. (2020). The chemistry of saline water chlorination.  
[https://www.researchgate.net/publication/35127909\\_The\\_chemistry\\_of\\_saline\\_water\\_chlorination](https://www.researchgate.net/publication/35127909_The_chemistry_of_saline_water_chlorination)
- <sup>20</sup> PISCINAS BRAVI (2015). Cloración salina: toda la verdad.
- <sup>21</sup> PROINCO. 8 ventajas de la Cloración Salina.  
<https://blog.proinco.es/ventajas-cloracion-salina-piscinas/>
- <sup>22</sup> AFESE. La Electrólisis Salina como sistema de tratamiento y conservación de las aguas de piscina y spas.

---

<sup>23</sup> UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CHILE. Propiedades del agua de mar.