

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

ESCOLA TÈCNICA SUPERIOR D'ENGINYERIA
AGRONÒMICA I DEL MEDI NATURAL



Optimización del funcionamiento de grupos de bombeo en una piscina municipal

**TRABAJO FIN DE GRADO EN INGENIERÍA
AGROALIMENTARIA Y DEL MEDIO RURAL**

ALUMNO: D. CARLOS SÁNCHEZ CERVERÓ

TUTOR: D. JOSÉ JAVIER BENEDITO FORT

COTUTORA: DÑA. GABRIELA CLEMENTE POLO

VALENCIA, Convocatoria 6ª Junio 2.017

CURSO 2016-2017

RESUMEN

Las piscinas cubiertas son la infraestructura deportiva que más energía y recursos consume en su gestión y explotación. Una de las competencias de la ingeniería es conseguir eficiencia energética y mejorar los procesos. Esto ha cobrado una especial relevancia desde que el coste de la energía se ha incrementado de manera exponencial. Por ello se considera oportuno estudiar y mejorar el proceso de bombeo del agua en piscinas municipales con el fin de asegurar el cumplimiento de la normativa vigente y la calidad del agua de las mismas, así como reducir los costes de explotación y el impacto medioambiental derivado de su gestión.

Se va a estudiar la Piscina Municipal de Nazaret, sita en la Calle Macarena s/n de Valencia. Se ha localizado una vía de mejora en el tratamiento de los grupos de bombeo que alimentan el circuito hidráulico de una piscina, destinado a la filtración del agua del vaso, la dosificación de desinfectante y corrector del pH, el calentamiento y otros tratamientos necesarios para mantener las condiciones de servicio adecuadas. Cabe destacar que los resultados obtenidos en el presente TFG serán de aplicación, con las condiciones y salvedades intrínsecas a cada instalación, a otras piscinas públicas o privadas independientemente del tamaño de las mismas

El presente estudio tiene como objetivo definir 3 propuestas de mejora para el sistema de bombeo de agua de una piscina:

- 1.1 Instalación de variadores de frecuencia
- 1.2 Sustitución de los actuales grupos de bombeo por otros de alta eficiencia
- 1.3 Instalación de un sistema de control

Las tres actuaciones tienen como objetivo cubrir una serie de carencias del sistema original y aproximar la instalación a unas condiciones de funcionamiento óptimas y que a continuación se detallan:

- a. Los variadores de velocidad producen unos arranques y paros progresivos, reduciendo los golpes de ariete y los picos de consumo derivados de los arranques todo/nada. Además permiten modificar las condiciones de funcionamiento de la bomba para adecuarla a las necesidades de la instalación (caudal y presión), redundando en una mayor vida útil de las bombas y en un ahorro muy considerable en el coste eléctrico, de mantenimiento y medioambiental. Así mismo, los equipos seleccionados disponen de sistemas de alarmas que detectan condiciones anómalas de funcionamiento y realizan paros selectivos antes de que sufra el sistema hidráulico.
- b. Los grupos de bombeo existentes fueron instalados en el año 2003. Aunque funcionan adecuadamente existen actualmente en el mercado soluciones de bombeo con mejores rendimientos, construcciones más robustas y menores requisitos de mantenimiento.
- c. La implantación de un sistema de control que regule el funcionamiento de los grupos de bombeo nos permitirá:
 - i. Discriminar entre dos programas horarios con diferentes necesidades (apertura y cierre)

- ii. Asegurar en ambos casos que se cumple con los requerimientos para cada situación que la normativa (horarios apertura) y la experiencia (horario de cierre) definen, actuando sobre las condiciones de funcionamiento de las bombas para asegurar que el caudal y la presión son los adecuados en cada situación.

Una vez definidas las propuestas de actuación, se implantarán y se realizarán las mediciones necesarias para cuantificar los ahorros producidos entre la solución original y la propuesta. Esto permitirá estudiar la viabilidad del proyecto y definir el periodo de retorno de cada inversión.

Palabras Clave: piscina, grupos de bombeo, eficiencia energética, variadores de frecuencia, sistema de control.

BRIEF

The pools covered are the sports facilities that more energy and resources consumed in its management and exploitation. One of the skills of the engineering is energy efficiency and improves process, that has gained special relevance since cost of energy has increased exponentially. We need to study and improve the water pumping in council's pools to ensure the compliance of the regulations existing and the quality of the pool water, as well as reduce the costs and the environmental impact derived of its management.

It's going to study the council's pool of Nazaret, in Macarena St. of Valencia. It has located a way to improves pumping groups that feeds the hydraulic pool system, that's use to filtered pool water, dosage of disinfectant and pH corrector, warming and others necessary treatments. The results obtained at present project shall apply to other public or private pools regardless of the size of them.

This study aims to work in 3 proposals to improvement the water pool pumping system:

- a. Installation of variable frequency drive.
- b. Replacement current pumping groups by others with high-efficiency.
- c. Control system integration.

Those actions are intended to solve shortcomings of the original system and approach it to optimal operating conditions. Are described below:

- a. Variable frequency drive produce progressive starters and stoppages, decreasing water hammers and electric consumption peaks derived of all / nothing starters. Besides variable frequency drives allow to modify the pumps operation conditions to adapt it at installation needs (flow and pressure), increasing service life pumps and decreasing electrical consumption, maintenance cost and environmental savings. Likewise, the selected variable frequency drives have alarm systems that detect abnormal operating conditions and perform selective stoppages until hydraulic system suffers.

- b. Existing pumping groups were installed in 2003. Although it works properly, on market, there are currently solutions of pumping with best yields, hard constructions and less requirements of maintenance.
- c. The introduction of a control system that regulates the operation of pumping groups allow us to:
 - i. Discriminate between two schedules with different needs (opening and closing)
 - ii. Ensure, in both cases, that the requirements for each situation are defined by the regulations (opening hours) and the experience (closing schedule) defined, acting on the operating conditions of the pumps to ensure that the flow and pressure are suitable in every situation.

Defined the action proposals, the necessary measurements will be implemented and carried out to quantify the savings produced between the original solution and the proposal. This will allow studying the viability of the project and defining the return period of each investment.

Keywords: pool, pumping groups, energy efficiency, variable frequency drive, control system.

AGRADECIMIENTOS

A mis tutores, Gabi y Jose, por la comprensión, atención y el exquisito trato recibido para la formalización del presente TFG.

A los integrantes del equipo eléctrico de la FDM (Jose, Dani, Andrés, Enrique y Nacho), por todas las ideas, paciencia y sobre todo, magia que han puesto en este reto.

A mí, por haberme demostrado una vez más, que si se quiere, se puede.

A mi familia (Inés, Inesita y Dani), por el tiempo que se merecen y no he podido prestarles, por el cariño y ánimos que siempre me han dado, por ser lo realmente importante, por serlo todo.

ÍNDICE

1	INTRODUCCIÓN	1
	1.1 ANTECEDENTES	1
	1.2 NORMATIVA DE APLICACIÓN EN PISCINAS	1
	1.3 GENERALIDADES DEL FUNCIONAMIENTO HIDRÁULICO DE PISCINAS	1
	1.4 GENERALIDADES DEL SISTEMA DE BOMBEO DE UNA PISCINA	2
	1.4.1 BOMBAS ROTODINÁMICAS	3
	1.4.2 CURVAS CARACTERÍSTICAS	3
	1.4.3 REGULACIÓN DE BOMBAS	4
	1.5 PUNTOS DE MEJORA Y POSIBLES SOLUCIONES	5
2	OBJETIVOS	6
3	MATERIALES Y MÉTODOS	7
	3.1 PLAN DE TRABAJO	7
	3.2 ANÁLISIS DE LA SITUACIÓN INICIAL	7
	3.2.1 SISTEMA DE BOMBEO	8
	3.3 IDENTIFICACIÓN DE SOLUCIONES DE MEJORA	9
	3.4 MODELIZACIÓN DE LAS PROPUESTAS DE MEJORA	9
	3.5 EJECUCIÓN Y MEDICIÓN DE LAS MEJORAS PROPUESTAS	9
	3.6 ANÁLISIS ECONÓMICO DE LAS PROPUESTAS DE MEJORA	9
	3.7 PARÁMETROS A MEDIR	10
	3.8 ELEMENTOS DE MEDIDA	10
	3.8.1 MEDICIÓN DEL CAUDAL DE AGUA TRASEGADO	11
	3.8.2 MEDICIÓN DE LA PRESIÓN A LA ENTRADA DEL FILTRO	11
	3.8.3 MEDIDOR DE TURBIDEZ EN AGUA	12
	3.8.4 MEDICIÓN DE CONSUMO ELÉCTRICO	13
4	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	14
	4.1 ESTADO INICIAL	14
	4.2 MEJORA MECÁNICA Y ELÉCTRICA	14
	4.2.1 MEJORA 1. Bombas convencionales con variador de frecuencia	14
	4.2.2 MEJORA 2. Sustitución de las bombas originales por bombas de alta eficiencia	17
	4.2.3 MEJORA 3. Sustitución de las bombas originales por bombas de alta eficiencia con variador de frecuencia	19
	4.3. MEJORA DE AUTOMATIZACIÓN DEL PROCESO	20
	4.3.1 ESQUEMA DE FUNCIONAMIENTO Y LÓGICA DE CONTROL	20
	4.3.2 SELECCIÓN DE MATERIALES	21
	4.3.2.1 SENSORES	21
	4.3.2.2 CONTROLADOR	22
	4.3.2.3 ACTUADORES	23
	4.4 ANÁLISIS ECONÓMICO DE LAS MEJORAS PLANTEADAS	23
	4.4.1 MEJORA 1. Bombas convencionales con variador de frecuencia	23
	4.4.2 MEJORA 2. Sustitución de las bombas originales por bombas de alta eficiencia	27
	4.4.3 MEJORA 3. Sustitución de las bombas originales por bombas de alta eficiencia con variador de frecuencia	29
	4.4.5 RESUMEN DE LOS DATOS OBTENIDOS POR LAS MEJORAS	31
5	CONCLUSIONES	33
6	BIBLIOGRAFÍA	34

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Esquema del principio de una piscina tipo	2
Figura 2 Bomba centrífuga radial sin motor	3
Figura 3 Conjunto motobomba de accionamiento eléctrico	3
Figura 4 Curva motriz de varias bombas de diferente potencia	4
Figura 5 Curva de potencia de varias bombas de diferente potencia	4
Figura 6 Curva de rendimiento de varias bombas de diferente potencia	4
Figura 7 Punto de funcionamiento óptimo de una bomba	5
Figura 8 Curvas motrices a diferentes velocidades y posibles curvas resistentes	5
Figura 9. Esquema de principio de la instalación de filtrado y tratamiento de aguas	7
Figura 10 Contador volumétrico Zenner WPH-N	11
Figura 11 Manómetro digital Wika CPG-500	12
Figura 12 Turbidímetro Hanna HI-93703	12
Figura 13 Metrel MI2083 Eurotest 61557	13
Figura 14 Variador seleccionado	15
Figura 15 Bomba Herborner X080-210A-0554H	18
Figura 16. Esquema de funcionamiento del modo día (Programa 1)	21
Figura 17. Esquema de funcionamiento del modo noche (Programa 2)	21
Figura 18 Transmisor de presión WIKA A-10	22
Figura 19 PLC Lovato LRD	22
Figura 20 Módulo de expansión Lovato LRE	23

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Número de usos de actividades acuáticas en piscinas municipales de la ciudad de Valencia	1
Tabla 2 Datos situación inicial (bomba tipo B sin variador de frecuencia)	14
Tabla 3 Datos semanales de presión y caudal	16
Tabla 4 Datos bombas originales con y sin variador de frecuencias a 50 Hz	17
Tabla 5 Datos bombas originales con variador de frecuencias modo día y noche	17
Tabla 6 Datos bomba original y alta eficiencia sin variador de frecuencia	19
Tabla 7 Datos bomba alta eficiencia a frecuencias de modo día y noche	20
Tabla 8 Horarios por periodos para la tarifa 3.1A	24
Tabla 9 N° horas para el 2.016 por periodo para taifa 3.1A y modo día	25
Tabla 10 N° horas para el 2.016 por periodo para taifa 3.1A y modo noche	25
Tabla 11 Ahorro producido en energía para el modo día mejora 1	25
Tabla 12 Ahorro producido en energía para el modo noche mejora 1	25
Tabla 13 Ahorro producido en término de potencia mejora 1	26
Tabla 14 Ahorro producido en impuesto eléctrico mejora 1	26
Tabla 15 Ahorro total producido por la mejora 1	26
Tabla 16 Coste de ejecución de la mejora 1	27
Tabla 17 Ahorro producido en energía para el modo día y noche por la mejora 2	28
Tabla 18 Ahorro producido en término de potencia por la mejora 2	28
Tabla 19 Ahorro producido en impuesto eléctrico por la mejora 2	28
Tabla 20 Ahorro total producido por la mejora 2	28
Tabla 21 Coste de ejecución de la mejora 2	29
Tabla 22 Ahorro producido en energía para el modo día y noche para la mejora 3	30
Tabla 23 Ahorro producido en término de potencia por la mejora 3	30
Tabla 24 Ahorro producido en impuesto eléctrico para la mejora 3	30
Tabla 25 Ahorro total producido por la mejora 3	31
Tabla 26 Coste de ejecución de la mejora 3	31

2. INTRODUCCIÓN

1.1 ANTECEDENTES

La actividad deportiva acuática se ha visto incrementada en los últimos años de forma exponencial en la ciudad de Valencia. Muestra de ello son los datos recogidos en las memorias anuales de la Fundación Deportiva Municipal de Valencia desde el año 2002 hasta el 2015, resumidos en la Tabla 1, donde se observa que su uso se ha triplicado en 13 años (FDM, 2016).

Tabla 1 Número de usos de actividades acuáticas en piscinas municipales de la ciudad de Valencia.

Año			
2002	2005	2010	2015
880.566	2.095.765	2.328.688	2.702.752

Tanto la gestión pública como la privada, han sabido dar respuesta a la demanda de piscinas. En Valencia, el Ayuntamiento dispone de 40 vasos de piscina (FDM, 2003; FDM, 2016). En lo referente a la iniciativa privada, es numerosa su presencia en comunidades de vecinos (en especial de nueva construcción) y en gimnasios privados que prestan servicio al público en general. El último censo de piscinas en la Comunidad Valenciana data de 2015 y cifra en 2.841 los vasos de piscina existentes (CSD, 2015).

1.2 NORMATIVA DE APLICACIÓN EN PISCINAS

Las piscinas de uso público, bien de propiedad municipal o privada, han de cumplir con unas condiciones de seguridad, que garanticen un servicio de calidad y que prevengan accidentes de diferente naturaleza. La normativa que regula estas condiciones en lo referente a infraestructura y servicio son:

- DOGV 255/1994 de 7 de diciembre, del Gobierno Valenciano, por el que se regulan las normas higiénico-sanitarias y de seguridad de las piscinas de uso colectivo y de los parques acuáticos.
- DOGV 97/2000 de 13 de junio, del Gobierno Valenciano, por el que se modifica el Decreto 255/1994, de 7 de diciembre, del Gobierno Valenciano, por el que se regulan las normas higiénico-sanitarias y de seguridad de las piscinas de uso colectivo y de los parques acuáticos.
- RD 742/2013 de 27 de septiembre, por el que se establecen los criterios técnico-sanitarios de las piscinas.

1.3 GENERALIDADES DEL FUNCIONAMIENTO HIDRÁULICO DE PISCINAS

En la Figura 1 se muestra el esquema del principio del sistema de tratamiento de aguas de una piscina tipo.

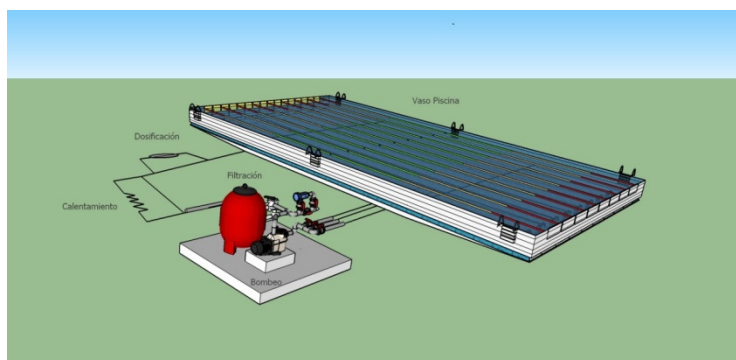


Figura 1 Esquema del principio de una piscina tipo

Tal y como se observa en la Figura 1, el sistema hidráulico empleado habitualmente en el tratamiento del agua de piscina, consta de las siguientes partes:

- Red de conducciones de PVC de presión de al menos 6 atmósferas, con un tramo en aspiración y otro en impulsión, con un conjunto de valvulería y accesorios importante en lo relativo a cantidad y tipología. Dicha red, recibirá la entrada de agua del vaso, comunicará las diferentes subinstalaciones adscritas al tratamiento de agua y la retornará de nuevo al interior del vaso.
- Un sistema de filtración para la retención de sólidos consistente en uno o varios filtros, habitualmente bobinados o laminados, de fibra de vidrio y poliéster y con arena de sílex o vidrio activado como material filtrante.
- Sistema de dosificación de producto químico, con posible medida en continuo de los niveles de desinfectante y pH, consistente en depósitos de almacenaje de producto y medios para su dosificación (producto sólido o líquido) así como las sondas y autómatas necesarios para su control.
- En el caso de las instalaciones climatizadas, existirá un sistema de calentamiento del agua del vaso, consistente en circuito secundario que alimentará un intercambiador de calor de placas. Dicho sistema, dispondrá de un sistema de control, habitualmente una válvula de 3 vías, una sonda de temperatura y un autómata.
- Grupo de bombeo consistente en una motobomba centrífuga que según las necesidades será de eje horizontal o vertical, autoaspirante o no, de fundición o bronce. El grupo de bombeo tiene por objeto dotar al agua del vaso del caudal y presión necesarios para que fluya a lo largo del sistema de tratamiento de aguas. Además, debe producir dentro del vaso las corrientes necesarias para que el agua limpia, caliente y cargada de desinfectante se distribuya homogéneamente por todo el volumen del vaso.

1.4 GENERALIDADES DEL SISTEMA DE BOMBEO DE UNA PISCINA

Según el libro “Ingeniería Rural: Hidráulica” (Arviza y Santamarina, 1995), una máquina hidráulica es un dispositivo que transforma un tipo de energía en energía hidráulica y mecánica. Existen varios tipos de máquinas hidráulicas:

- Gravimétricas: aportan energía potencial, manteniendo el agua a presión atmosférica.
- Volumétricas: aportan energía al líquido en forma de presión.
- Rotodinámicas: máquinas hidráulicas de movimiento rotativo que aportan al líquido energía de presión y cinética.

Las bombas que se utilizan para alimentar a los sistemas hidráulicos de una piscina son rotodinámicas, por lo que nos centraremos en ellas y desarrollaremos más a fondo sus características y tipología.

1.4.1. BOMBAS ROTODINÁMICAS

Las bombas rotodinámicas (Figura 2) constan de un elemento rotativo (rodete) y del cuerpo de la bomba. Según la dirección del flujo, se pueden clasificar en radiales, axiales o mixtas. Las bombas utilizadas en el tratamiento de agua de piscinas son radiales y pueden ser de eje horizontal o vertical indistintamente. Dependiendo de las necesidades de la instalación se disponen bombas autoaspirantes o no autoaspirantes.

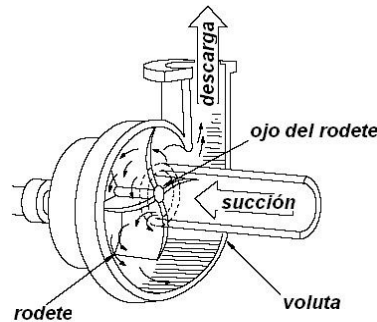


Figura 2 Bomba centrífuga radial sin motor. FULL MECÁNICA (2017).

Los grupos de bombeo que mayoritariamente se utilizan en piscinas son accionados por motores eléctricos, monofásicos o trifásicos a 240-380V, asíncronos de velocidad de giro constante, contruidos en fundición, bronce o termoplástico, con un formato similar al que se muestra en la Figura 3.



Figura 3 Conjunto motobomba de accionamiento eléctrico. BOMBAS SELLOS (2013).

1.4.2. CURVAS CARACTERÍSTICAS

El comportamiento de una bomba está determinado por sus curvas características. Éstas, modelizan el comportamiento de la misma en función de las condiciones existentes de funcionamiento y que son caudal, rendimiento, altura manométrica, potencia y velocidad de giro.

Las curvas características más interesantes por la información que facilitan, todas ellas referidas a una velocidad de giro n , son la curva motriz, la curva de potencia y la curva de rendimiento.

La curva motriz (Figura 4) relaciona la altura a la que se eleva el agua (H) con el caudal suministrado por la bomba (Q) según la potencia de la misma.

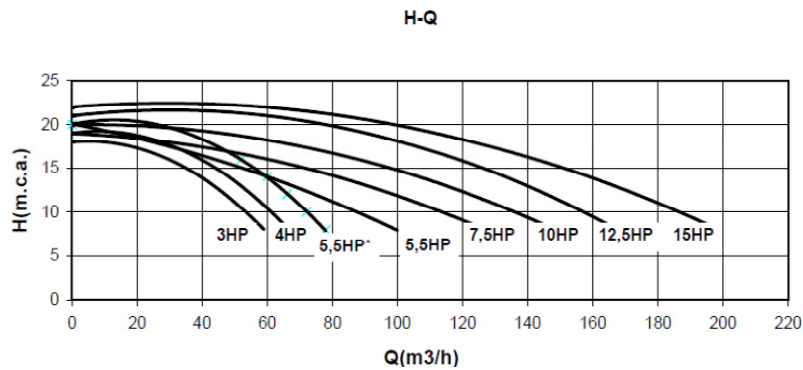


Figura 4 Curva motriz de varias bombas de diferente potencia. ASTRALPOOL (2017).

La curva de potencia (Figura 5) relaciona la potencia de la bomba (POT1) con el caudal (Q) que suministra la misma.

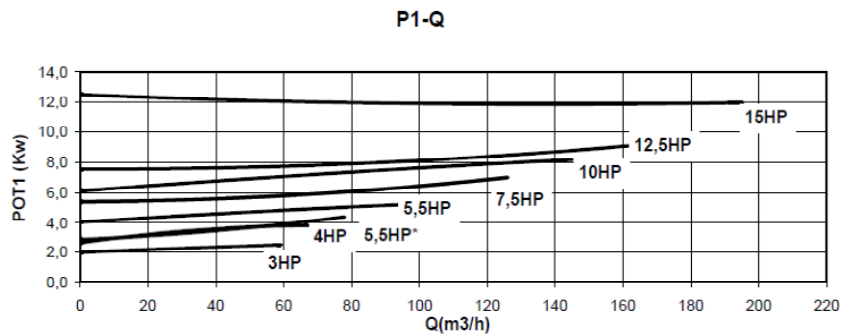


Figura 5 Curva de potencia de varias bombas de diferente potencia. ASTRALPOOL (2017).

La curva de rendimiento (Figura 6) relaciona rendimiento (Rend. %) de la bomba con el caudal (Q) que suministra la misma.

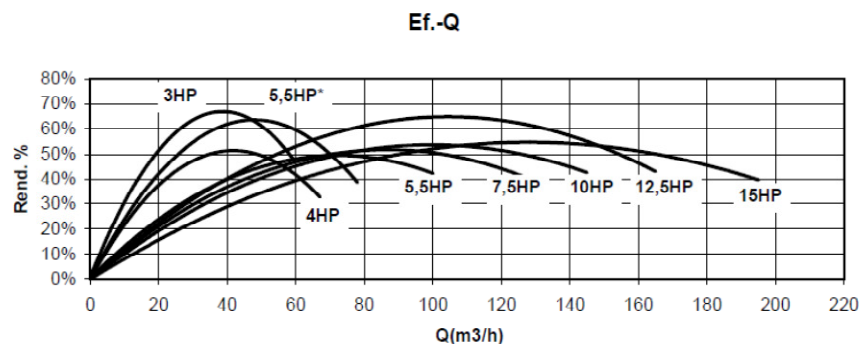


Figura 6 Curva de rendimiento de varias bombas de diferente potencia. ASTRALPOOL (2017).

1.4.3. REGULACIÓN DE BOMBAS

Las condiciones de la instalación hidráulica que alimenta cualquier bomba afectan al funcionamiento de la misma. Por ello, se debe modelizar el comportamiento de la tubería en función del caudal trasegado. Así la curva resistente de una tubería representa la pérdida de presión o altura que se experimenta en la instalación en función del caudal (Figura 7).

El punto de funcionamiento óptimo del conjunto bomba-tubería de impulsión, viene dado por la intersección de la curva resistente de la tubería y la curva motriz de la bomba. En la Figura 7 se observan ambas curvas y se localiza el punto de funcionamiento según las necesidades de caudal y/o presión.

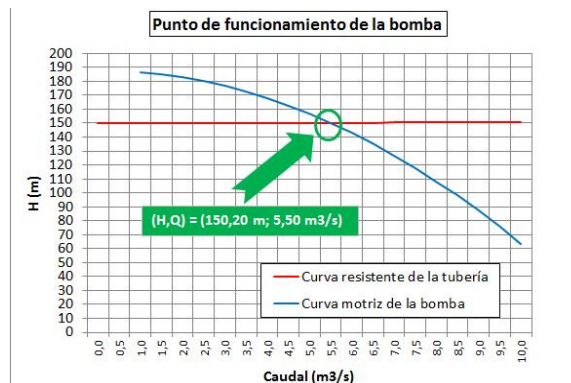


Figura 7 Punto de funcionamiento óptimo de una bomba. ESELAGUA (2017)

Es habitual que las condiciones de la instalación hidráulica o las necesidades de caudal varíen. En el caso de las piscinas, esto ocurre cuando se ensucia el filtro principal o el prefiltro de la bomba. En esta situación, será necesario ajustar de nuevo el punto de funcionamiento. Para ello se puede variar la curva resistente de la tubería (limpiando los filtros, por ejemplo), aunque habitualmente se prefiere variar la curva motriz de la bomba. La alternativa más habitual es una variación continua del caudal como medio de regulación. Se realiza mediante la instalación de dispositivos que permiten variar la velocidad del motor y en consecuencia su caudal de impulsión. A estos equipos se les denomina variadores de velocidad o frecuencia. La Figura 8 representa cómo, variando la velocidad de una bomba, se puede mantener el caudal deseado para dos curvas resistentes diferentes.

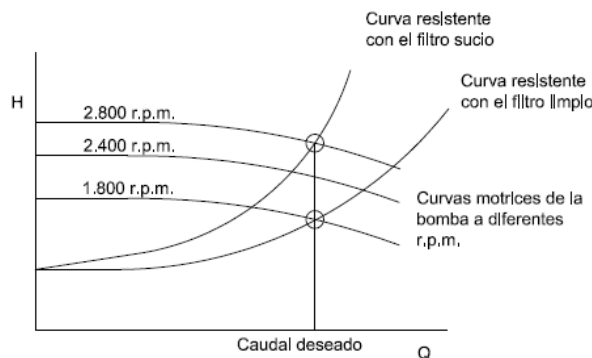


Figura 8 Curvas motrices a diferentes velocidades y posibles curvas resistentes.

1.5. PUNTOS DE MEJORA Y POSIBLES SOLUCIONES

La instalación hidráulica en piscinas requiere de una mejora en eficiencia y un control sobre las condiciones de funcionamiento mínimas, definidas por la normativa descrita en el punto 1.2. Ambas mejoras producirán una reducción de los costes de explotación de la instalación y mejorarán la calidad y seguridad del servicio. Para ello, es necesario instalar elementos de regulación que permitan reducir el consumo eléctrico de la instalación y fijar las condiciones de presión y/o caudal necesarias. Una solución es la instalación de variadores de frecuencia para los grupos de bombeo. Por otra parte, la sustitución de los grupos de bombeo de baja eficiencia existentes, con un estado próximo al final de su vida útil por otros de alta eficiencia, mejorará los costes de funcionamiento de la instalación hidráulica.

2. OBJETIVOS

El objetivo general del presente TFG es definir las vías de mejora del proceso de filtración y tratamiento del agua del vaso mayor de la piscina del Polideportivo Municipal de Nazaret en Valencia.

Este objetivo general puede dividirse en los siguientes objetivos particulares:

1. Caracterización de la situación inicial. Estudio del funcionamiento de la instalación actual. Medida de caudal, presión, consumo eléctrico y conductividad de la situación original.
2. Propuestas de mejora mecánica y eléctrica.
 - 2.1. Instalación de variadores de frecuencia. Caracterización de la propuesta de mejora. Implantación y toma de datos de caudal, presión, consumo eléctrico y conductividad. Evaluación de los cambios producidos y cómo afectan al funcionamiento general de la instalación.
 - 2.2. Instalación de bombas de alta eficiencia. Caracterización de la propuesta de mejora. Implantación y toma de datos de caudal, presión y consumo eléctrico. Evaluación de los cambios producidos y cómo afectan al funcionamiento general de la instalación.
 - 2.3. Instalación de bombas de alta eficiencia con variadores de frecuencia. Caracterización de la propuesta de mejora. Implantación y toma de datos de caudal, presión y consumo eléctrico. Evaluación de los cambios producidos y cómo afectan al funcionamiento general de la instalación.
3. Propuesta de mejora de la automatización del proceso. Caracterización del sistema.
4. Análisis económico de las propuestas de mejora mecánica y eléctrica planteadas. Cálculo de los ahorros económicos producidos en energía eléctrica, término de potencia contratada e impuesto eléctrico. Desarrollo del presupuesto de ejecución. Estimación de la vida útil de la inversión. Cálculo del periodo de retorno de la inversión y de los ahorros producidos al finalizar la vida útil de cada mejora.
5. Determinación de la mejor solución y establecimiento de la viabilidad de la misma.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. PLAN DE TRABAJO

Para alcanzar los objetivos planteados en el apartado 2, se seguirá el plan de trabajo que se define a continuación:

1. Análisis de la situación inicial.
2. Identificación de soluciones de mejora.
3. Modelización de las propuestas de mejora identificando las condiciones óptimas de funcionamiento.
4. Ejecución y medición de las mejoras propuestas.
5. Análisis económico de las mejoras.

3.2. ANÁLISIS DE LA SITUACIÓN INICIAL

El sistema de filtrado y tratamiento de aguas de la piscina de Nazaret consta de una serie de equipos e instalaciones que permiten su funcionamiento adecuado. La instalación original ha sido modificada por la inclusión de sistemas nuevos y la retirada de los obsoletos.

El esquema de funcionamiento del sistema de tratamiento de agua de piscina es el que se muestra en la Figura 9:

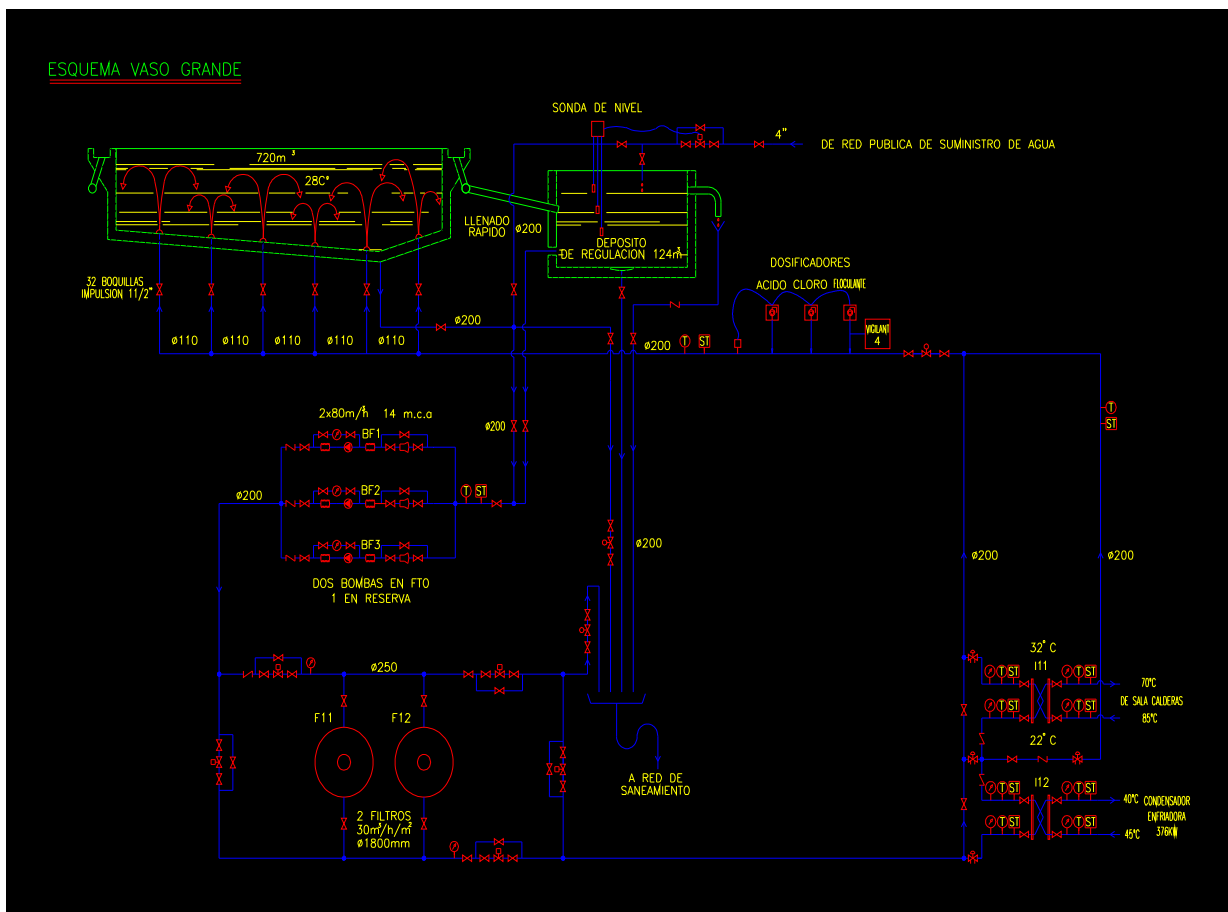


Figura 9. Esquema de principio de la instalación de filtrado y tratamiento de aguas.

Los equipos e instalaciones reflejados en la Figura 9 se describen a continuación:

- Vaso de la piscina, de encofrado de hormigón en masa armado con acero corrugado de diferentes diámetros. Las medidas del vaso son 25x16x1,80 metros. La impermeabilización está realizada con mortero de resinas hidrófugo y tejido de malla. El vaso está revestido por baldosa cerámica de 20x10 cm y rejuntado con cemento blanco.
- Depósito de regulación o vaso de compensación de hormigón en masa armado con barras de acero corrugado de diferentes diámetros. Las medidas del depósito de regulación son 16x6x1,30 metros. Está impermeabilizado con mortero de resinas hidrófugo y tejido de malla. Se encuentra revestido por una imprimación al clorocaucho.
- Red de conducciones de PVC a presión de 16 atm, con un tramo en aspiración de 15 m y otro de impulsión de 35 m en el punto más alejado. El diámetro mayoritario de conducción es de 200 mm, aunque existen gran variedad de los mismos. El circuito hidráulico se encuentra en carga, ya que el vaso de la piscina se ubica en planta primera y la sala de filtración y tratamiento de aguas está en planta baja. La red dispone de un número considerable de valvulería y accesorios entre los que encontramos válvulas de retención, mariposa, esfera, equilibrado hidráulico, manómetros, caudalímetros, sondas de temperatura, derivaciones, codos y bridas.
- Sistema de filtración para la retención de sólidos consistente en 2 filtros bobinados de fibra de vidrio y poliéster de 1800 mm de diámetro. El material filtrante que alojan es vidrio activado. Existe una batería de 5 válvulas a la entrada del filtro que permite que éste trabaje en filtración, lavado, recirculación, enjuague, vaciado o cerrado.
- Sistema de dosificación de producto químico, con medida en continuo de los niveles de desinfectante (cloro libre) y pH. Consta de depósitos de almacenaje de producto químico (hipoclorito sódico y ácido clorhídrico), bombas dosificadoras de impulsos, picajes así como las sondas y autómatas necesarios para su medición y control.
- Sistema de calentamiento del agua del vaso, ya que al ser un vaso climatizado, es necesario mantener una temperatura constante en el agua de la piscina. Consiste en un circuito secundario que alimenta un intercambiador de placas. Dispone de un sistema de control basado en un autómata que recibe la señal de una sonda de temperatura y actúa sobre una válvula de tres vías motorizada.
- Instalación de bombeo, que permite dotar al agua del vaso del caudal y la presión necesaria y producir las corrientes que favorezcan la recirculación dentro del mismo. Por ser el objeto principal de estudio del presente TFG, se detalla el sistema de bombeo en un apartado independiente.

3.2.1. Sistema de bombeo

La instalación original de bombeo del sistema de filtración y tratamiento del agua en la piscina municipal de Nazaret data del año 2004. Se instaló de acuerdo a lo definido en el proyecto de ejecución del polideportivo y consta de los siguientes elementos:

- Sistema de control: ON/OFF y AUTO (programa horario)/MANUAL.
- Alimentación trifásica a 400V con arranque convencional estrella-triángulo a 50 Hz.
- 3 bombas, de las cuales 2 están funcionando y 1 en reserva. Las características de las bombas se detallan a continuación (ASTRALPOOL, 2017):
 - Marca: ASTRAL
 - Modelo: Baikal C3000
 - Velocidad de giro: 3.000 r.p.m.
 - Caudal Nominal: 80 m³/h a 14 m.c.a.
 - Rendimiento hidráulico: 51,0 %

- Nivel sonoro: 85 dBA
 - Motor: 5,5 kW. Alimentación trifásica a 400/690V con arranque convencional estrella-triángulo a 50 Hz.
 - Diámetro aspiración/impulsión: 100/100 mm.
 - Material de construcción: Fundición y bronce.
 - Tipo: Rotodinámica, radial, de eje horizontal y no autoaspirante.
- Accesorios: Prefiltros de maya (inox) en aspiración, válvulas antirretorno y de mariposa, manómetros de glicerina y caudalímetros tipo Woltman.

3.3. IDENTIFICACIÓN DE LAS SOLUCIONES DE MEJORA

La instalación original dispone de un sistema convencional de arranque de los motores eléctricos en estrella-triángulo. Los arranques producidos por el sistema, generan golpes de ariete en la instalación, reduciendo la vida útil de la misma y aumentando el riesgo de averías. Otro de los problemas de funcionamiento identificado es que no existe posibilidad de regulación del caudal y presión. Por ello, si varía la curva resistente de la instalación hidráulica o las necesidades de caudal y presión, no hay posibilidad de ajuste del grupo de bombeo. Por último, precisar que el coste de funcionamiento de los grupos de bombeo que operan 24h al día, 365 días al año es elevado, por el desgaste de los mismos y por el consumo eléctrico que producen.

Dadas las condiciones de funcionamiento de los variadores de frecuencia en grupos de bombeo, todos los aspectos a mejorar descritos en el párrafo anterior se verían mejorados con su instalación. Esto permitiría poder variar las condiciones de funcionamiento para los diferentes requerimientos que hay a lo largo del día. Por otra parte, la sustitución de los equipos de bombeo, en mal estado de funcionamiento y con una eficiencia baja por otros de alta eficiencia, reduciría el consumo y por tanto los costes de funcionamiento.

3.4. MODELIZACIÓN DE LAS PROPUESTAS DE MEJORA

El desarrollo de las propuestas de mejora va directamente ligado a las condiciones de funcionamiento de la instalación. Por lo tanto, se definirán las diferentes situaciones y demandas existentes a lo largo del ciclo de funcionamiento de la instalación para adecuar las mejoras propuestas a dichos requerimientos.

3.5. EJECUCIÓN Y MEDICIÓN DE LAS MEJORAS PROPUESTAS

Una vez se tengan definidas las propuestas de mejora, éstas deben de ejecutarse. Una vez en funcionamiento, se medirán los parámetros descritos en el punto 3.7. para cada mejora. El objetivo es valorar el funcionamiento de cada propuesta en comparación con la situación inicial.

3.6. ANÁLISIS ECONÓMICO DE LAS PROPUESTAS DE MEJORA

Con los datos obtenidos para la situación inicial y cada propuesta de mejora se valorará el ahorro económico anual producido por cada una de ellas. Con el coste de ejecución de cada mejora (presupuesto) y el ahorro anual producido, se calculará el periodo de retorno de la inversión. El ahorro acumulado producido por cada mejora, viene determinado por el ahorro anual durante el periodo de vida útil de los equipos, descontando el coste de ejecución de la mejora. Por último reseñar que no se han tenido en cuenta los costes de mantenimiento de las inversiones al ser nulos o similares a los necesarios para la solución inicial. El ahorro económico viene producido por el coste de la energía, por lo que también se calcula la energía eléctrica que se ha dejado de consumir al implantar las mejoras propuestas.

3.7. PARÁMETROS A MEDIR

Para la obtención de resultados, es imprescindible la medición de una serie de parámetros cuantitativos. A continuación, se detalla y justifica la necesidad de medición de los siguientes parámetros:

- Caudal de agua trasegado. Su medición nos permitirá asegurar el trasiego del caudal mínimo estipulado por la norma para el horario de apertura de la piscina cubierta de Nazaret. En el DOGV 255/1994 Capítulo II, artículo 10.2, se regula que: *“En las piscinas de uso colectivo, el ciclo de depuración de todo el volumen de agua del vaso no será superior a dos horas en las de chapoteo. En el resto de los vasos, el ciclo de depuración no será superior a ocho horas en las descubiertas y cinco horas en las cubiertas.”*
- Presión a la entrada del filtro. La medición de presión a la entrada del filtro permitirá asegurar la presión mínima de funcionamiento de la instalación para el horario de cierre al público donde ya no es necesario disponer de un caudal mínimo.
- Turbidez del agua a la salida del filtro. Éste parámetro nos permite definir cuál será la presión mínima de trabajo del filtro sin que se vea afectada su capacidad de retención de sólidos.
- Consumo eléctrico del sistema de bombeo. La medida de consumo eléctrico es necesaria para cuantificar los ahorros económicos y energéticos obtenidos, los periodos de retorno de la inversión y en general la eficiencia de las mejoras propuestas. Las medidas de consumo de las bombas reflejadas en los posteriores apartados son la media de los consumos entre las tres fases R, S y T con el Neutro.

Como será necesario comparar las condiciones iniciales (arranque estrella-triángulo) con las finales (variador instalado), se mide el consumo eléctrico, caudal y presión a la entrada de los filtros de la solución original.

Una vez instalados los variadores de velocidad, se realizarán las pruebas a diferentes revoluciones hasta dar con las condiciones de funcionamiento adecuadas para cada modo (día y noche).

Para comprobar las condiciones de funcionamiento de la instalación hidráulica en lo referente al caudal y presión aportados por las bombas se definirá el ciclo de funcionamiento de la instalación hidráulica, siendo éste semanal. Así, se lavarán los filtros de vidrio todos los lunes. Si tomamos datos de lunes a domingo, obtendremos una variabilidad suficiente de datos para comprobar dicha situación. Por otra parte, se comprobará que la afluencia de público no afecta al funcionamiento de la instalación. Para poder resolver este interrogante, distribuiremos las tomas de medidas en horarios de muy baja afluencia (8h) y de alta ocupación (18h). También se comprobará si el uso de la instalación afecta a las medidas por lo que se tomarán medidas fuera de horario de apertura, a las 7 y a las 23 h.

Los datos que se expondrán se corresponden al funcionamiento de una sola bomba. Los cálculos para la obtención de los ahorros producidos y el periodo de retorno de la inversión se referenciarán a la suma de dos bombas de iguales características colocadas en paralelo. La causa por la que se opta por esta medida es que los requerimientos hidráulicos del proceso de filtración y tratamiento del agua de la piscina necesitan de dos unidades de bombeo.

3.8. ELEMENTOS DE MEDIDA

Para realizar la medida de los parámetros descritos en el apartado 3.7. hemos utilizado los equipos de medida que a continuación se detallan.

3.8.1. Medición del caudal de agua trasegado

Se trata de un contador volumétrico de turbina marca Zenner, modelo WPH-N DN200, como el que se muestra en la Figura 10.



Figura 10 Contador volumétrico Zenner WPH-N. ZENNER (2017)

Dispone de las siguientes características técnicas (ZENNER, 2017):

- Arranque bajo
- Buena protección contra sobrecarga
- Gran rango de medición
- Inserto de medición desmontable
- Baja pérdida de presión
- Descarga de presión de cojinete hidráulico para una estabilidad de medición duradera
- Retroadaptable con emisores de impulsos activos y pasivos
- Salida digital, emisor de impulsor REED
- Cubierta protectora metálica estándar
- Medidor evacuado protegido contra la condensación
- El contador de esfera seca con indicadores grandes facilita la lectura
- Para posiciones de montaje horizontales, verticales e inclinadas
- Registro de esfera seca
- Principio de medición: Medidores Woltman paralelos
- Temperatura máxima: Agua caliente 90°C
- Indicadores: Indicador de metros cúbicos
- Clase metrológica horizontal (max.): B
- Caudal nominal: 250 m³/h
- Presión máxima de trabajo: 16 atm

3.8.2. Medición de la presión a la entrada del filtro

El equipo utilizado es un manómetro Digital de fluido marca WIKA, modelo CPG-500.



Figura 11 Manómetro digital Wika CPG-500. WIKA (2017)

Dispone de las siguientes características técnicas (WIKA, 2017):

- Rango de medida desde -1 ... +20 bar hasta 0 ... 1.000 bar
- Exactitud de medición: 0,25 %
- Caja robusta con goma de protección
- Manejo fácil mediante cuatro teclas
- Temperatura de servicio: desde -5°C hasta +50°C
- Protección: IP67

3.8.3. Medidor de turbidez en agua

Se utiliza un turbidímetro nefelométrico marca Hanna modelo HI-93703



Figura 12 Turbidímetro Hanna HI-93703. HANNA INSTRUMENTS (2017)

El equipo tiene las siguientes características (HANNA INSTRUMENTS, 2017):

- Rango de 0.00 a 50.00 FTU* de 50 a 1000 FTU*
- Resolución 0.01 FTU (de 0.00 a 50.00 FTU) 1 FTU (de 50 a 1000 FTU)
- Exactitud ± 0.5 FTU o $\pm 5\%$
- Calibración en 3 puntos (0 FTU, 10 FTU y 500 FTU)

- Fuente luminosa LED infrarrojo
- Sensor fotocélula de silicio
- Tipo pila / duración 4 x 1.5V AA / aprox. 60 horas de uso continuo o 900 medidas; auto-desconexión después de 5 minutos
- Condiciones de trabajo de 0 a 50°C; H.R. máx. 95% (sin agua de condensación)

3.8.4. Medición de consumo eléctrico

Utilizaremos un instrumento multifunción de comprobación eléctrica marca Metrel, modelo MI 2083 Eurotest 61557.



Figura 13 Metrel MI2083 Eurotest 61557. METREL (2002-2016)

Las medidas que se pueden realizar con este equipo son (METREL, 2002-2016):

- Comprobación completa de las instalaciones eléctricas (intensidad, tensión, cos Phi...), permitiendo además otras funciones adicionales como la medición de corriente TRMS, la resistencia de tierra con 4 hilos / una pinza / dos pinzas y la tierra específica con 4 hilos, la medición de la iluminación y la función de localizador de fusibles y fallos.
- El MI 2086 Eurotest 61557 realiza las pruebas de continuidad, aislamiento, diferencial, bucle, línea, tensión, frecuencia, resistencia de tierra y fase exigidas por la normativa EN 61557.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este apartado, se detallan los resultados correspondientes a la solución inicial y se comparan con los resultados obtenidos en las diferentes mejoras propuestas. También se expondrán los resultados del análisis económico de las mejoras propuestas.

4.1. ESTADO INICIAL

Para poder comparar y valorar cada mejora propuesta, se necesita conocer las condiciones de la situación de partida. Tal y como se describe en el apartado 3, se miden los parámetros necesarios para caracterizar el funcionamiento de la situación inicial.

La situación inicial analizada está definida por una instalación hidráulica alimentada por los sistemas de bombeo originales de baja eficiencia, de ahora en adelante, bombas tipo B, y su sistema de arranque en estrella-triángulo. Las características de la instalación están descritas en el apartado 3.2.

Los datos obtenidos de los parámetros a analizar para la situación inicial se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2 Datos situación inicial (bomba tipo B sin variador de frecuencia)

Tipo Bomba	MODO	Variador	(Hz)	CAUDAL (m³/h)	Presión (kg/cm²)	Consumo medio(A)
B	Día	No	50	80,00 ± 0,54	0,60 ± 0.01	12,52 ± 0,44

El consumo referenciado en la placa de la bomba es de 11 A por fase, lo que denota que la bomba está trabajando algo forzada al ser su consumo de 12,52 A (Tabla 2).

El estudio de la situación inicial permite proponer las siguientes soluciones de mejora:

- Mejora mecánica y eléctrica. Se plantearán tres soluciones de mejora:
 - Mejora 1: Bombas convencionales con variador de frecuencia.
 - Mejora 2: Sustitución de las bombas originales por bombas de alta eficiencia sin variador.
 - Mejora 3: Bombas de alta eficiencia con variadores de frecuencia.
- Mejora de automatización del proceso

A continuación se exponen los resultados obtenidos para cada mejora propuesta y su análisis económico.

4.2. MEJORA MECÁNICA Y ELÉCTRICA

4.2.1. MEJORA 1. Bombas convencionales con variador de frecuencia.

Es ya conocido el funcionamiento de los variadores de frecuencia en los motores eléctricos y las mejoras que produce en las condiciones de trabajo, la durabilidad y el consumo eléctrico.

Las bombas centrífugas se comportan según las leyes de afinidad, que para nuestro caso en el que el diámetro del impulsor es constante, postulan que:

- El flujo es proporcional a la velocidad del eje.
- La presión estática es proporcional al cuadrado de la velocidad del eje.

- La potencia eléctrica absorbida por el motor de la bomba es proporcional al cubo de la velocidad del eje.

Con la instalación de variadores de frecuencia se puede regular la velocidad del giro del eje de la bomba, lo que nos permite modificar (tal cual definen las leyes de afinidad) la presión, el caudal y el consumo. También permite realizar arranques y paros progresivos. Todo ello se traduce en mejoras de:

- Funcionamiento, al permitir fijar una velocidad giro que aporte el caudal y la presión necesaria en cada situación.
- Funcionamiento, al reducirse los golpes de ariete y la cavitación de las bombas en el arranque, aumentando así la vida mecánica del motor y del grupo de bombeo.
- Rendimiento, por la reducción del coste de funcionamiento (consumo eléctrico) y por la reducción de la tasa de reposición del equipo debida al aumento de la vida útil.

Los materiales seleccionados para instalar, han sido 2 unidades de variador de frecuencia de la marca Lovato, modelo VFS15-4055 PLW que se muestran en la Figura 14 .



Figura 14 Variador seleccionado. LOVATO ELECTRIC (2017)

Los variadores de frecuencia seleccionados disponen de sistemas de seguridad que garantizan la integridad del grupo motor en una situación de funcionamiento anómalo. Es el caso de ausencia de agua en el circuito o cierre de válvulas en aspiración y/o impulsión o rotura del eje, rodete o rodamiento, detectando un consumo excesivamente alto o bajo y procediendo al paro del motor de la bomba.

Para el modo día, es necesario como ya hemos comentado cumplir con la norma de aplicación que define en 5 horas el tiempo máximo de recirculación de todo el volumen de agua del vaso. Como el vaso cubica 720 m³, necesitaremos trasegar como mínimo 144 m³/h. Para ello disponemos de dos grupos de bombeo que trabajan en serie y que deben mover como mínimo un caudal de agua de 72 m³/h cada uno.

Para el modo noche, la consigna de funcionamiento será la presión a la salida del filtro del sistema, que debe ser la mínima necesaria para que todo el sistema funcione correctamente. En las pruebas realizadas, comprobando los caudales y presiones mínimos de los diferentes subsistemas (filtración, calentamiento y desinfección), se ha identificado que el factor limitante es la presión de trabajo de los filtros de vidrio activado.

El fabricante (Astralpool) no define una presión mínima de trabajo para el filtro Rodas 1.800 mm de diámetro. Las muestras de agua tomadas con el turbidímetro muestran que por debajo de 0.3 kg/cm² de presión de entrada al filtro, la turbidez a la salida del mismo supera los niveles máximos definidos por la norma para el agua de piscinas. El límite máximo de turbidez se cifra en 5 UNF (RD 742/2013 de 27 de septiembre, por el que se establecen los criterios técnico-sanitarios de las piscinas).

Por lo tanto, los criterios para la regulación de las bombas de la piscina serán:

- Modo día: Caudal mínimo trasegado por las dos bombas en paralelo de 144 m³/h.
- Modo noche: Presión mínima a la entrada del filtro de 0.3 kg/cm².

Se realizan varias pruebas variando la frecuencia de funcionamiento de las bombas hasta reproducir las condiciones definidas para el modo día y noche, siendo:

- Modo día: 49 Hz y 73,11 m³/h para una bomba, 146,22 m³/h para dos.
- Modo noche: 42 Hz y 0.32 kg/cm².

Se comprueba que las condiciones de caudal recirculado y presión a la entrada del filtro permanecen prácticamente constantes de lunes a domingo y en modo día y noche con una media de 146,22 m³/h y una desviación típica de 0.536 m³/h para el modo día y una media de 0.32 kg/cm² y 0.008 kg/cm² de desviación típica para el modo noche. Dichos datos se recogen en la Tabla 3.

Tabla 3 Datos semanales de presión y caudal

Modo	Día	Hora	Caudal (m³/h)	Presión (kg/cm²)
Día	Lunes	18	146,20	0,54
Día	Lunes	8	146,80	0,55
Día	Martes	18	145,90	0,54
Día	Martes	8	146,70	0,55
Día	Miércoles	18	145,40	0,53
Día	Miércoles	8	146,30	0,54
Día	Jueves	8	145,10	0,52
Día	Jueves	18	146,00	0,53
Día	Viernes	18	146,30	0,54
Día	Viernes	8	147,00	0,56
Día	Sábado	18	145,90	0,53
Día	Sábado	8	146,30	0,54
Día	Domingo	8	146,80	0,55
Día	Domingo	18	146,40	0,55
Noche	Lunes	7	84,30	0,31
Noche	Lunes	23	85,40	0,33
Noche	Martes	7	84,90	0,32
Noche	Martes	23	85,60	0,33
Noche	Miércoles	23	84,60	0,32
Noche	Miércoles	7	85,30	0,33
Noche	Jueves	23	84,00	0,31
Noche	Jueves	7	85,40	0,33
Noche	Viernes	7	84,70	0,32
Noche	Viernes	23	86,10	0,34
Noche	Sábado	23	84,30	0,32
Noche	Sábado	7	85,90	0,33
Noche	Domingo	23	84,10	0,32
Noche	Domingo	7	83,90	0,32
Día	Media Muestral		146,22	0,54
Noche	Media Muestral		84,89	0,32
Día	Desviación típica		0,54	0,011
Noche	Desviación típica		0,73	0,008

Una vez analizados los datos recabados, se observa que el arranque pasa de ser un sistema estrella-triángulo a ser sólo en estrella pero progresivo. También se aprecia una diferencia de consumo cuando la misma bomba trabaja a 50 Hz sin variador y con variador de frecuencia (Tabla 4).

Tabla 4 Datos bombas originales con y sin variador de frecuencias a 50 Hz

Tipo Bomba	MODO	Variador	(Hz)	CAUDAL (m ³ /h)	Presión (kg/cm ²)	Consumo medio(A)
B	Día	Si	50	76,36 ± 0,54	0,59 ± 0.01	10,86 ± 0,44
B	Día	No	50	80,00 ± 0,54	0,60 ± 0.01	12,52 ± 0,44

Con el medidor de consumo instalado, se aprecia que desaparecen los picos de arranque de hasta 25 A que se producen con el arranque convencional. Estos picos de consumo en el arranque no se han reflejado en las tablas por ser muy puntuales y de difícil medición. Por otra parte, a nivel cualitativo desaparecen los sonidos producidos por los golpes de ariete en arranques y paros y el sonido que producen las bombas durante su funcionamiento se percibe menor si bien es cierto que no se dispone de medios para cuantificarlo.

Se miden los consumos, presiones a la entrada del filtro y caudales trasegados por la bomba original con el variador de velocidad instalado. Las frecuencias a las que se miden dichos datos son las que reproducen las condiciones de funcionamiento óptimas para el modo día (49Hz) y modo noche (42Hz) tal y como se muestra en la Tabla 5.

Tabla 5 Datos bombas originales con variador de frecuencias modo día y noche

Tipo Bomba	MODO	Variador	(Hz)	CAUDAL (m ³ /h)	Presión (kg/cm ²)	Consumo medio(A)
B	Día	Si	49	73,11 ± 0,54	0,55 ± 0.01	10,02 ± 0,44
B	Noche	Si	42	39,56 ± 0,73	0,32 ± 0.01	5,07 ± 0,44

Analizando los datos obtenidos con la instalación del variador de frecuencia en el grupo de bombeo original, se extraen las siguientes conclusiones frente a la situación sin variador descrita en el punto 4.1.

- Para el modo día, se reduce 1 Hz la frecuencia pero desciende el caudal y la presión. También desciende el consumo medio por fase, en concreto un 19,97 % (de 12,57 a 10,02 A).
- Para el modo noche, bajar la frecuencia 8 Hz supone reducir el caudal trasegado en más de la mitad que a 50Hz. La presión a la entrada del filtro merma en 0,28 kg/cm². El consumo para el modo noche se reduce en un 59,50% con respecto a la situación inicial.

4.2.2. MEJORA 2. Sustitución de las bombas originales por bombas de alta eficiencia.

Otra de las propuestas de mejora es la sustitución de los grupos de bombeo originales por unos nuevos de alta eficiencia. Para la selección de los nuevos grupos de bombeo se parte de las condiciones de caudal mínimas (144 m³/h) mencionadas en el apartado anterior. Por otra parte, se conocen las condiciones de diseño reflejadas en el proyecto de ejecución, con una presión necesaria de 14 m.c.a y una velocidad máxima en la tubería de 1,5 m/s.

Con los datos anteriores se seleccionaron e instalaron dos unidades de la bomba vertical marca Herborner, modelo X080-210A-0554H (Figura 15) con las siguientes características (HERBORNER PUMPS, 2017):

- Marca: HERBORNER
- Modelo: X080-210A-0554H
- Velocidad de giro: 1.450 r.p.m.
- Motor: 5,5 kW/ 400 V/ 50 Hz/ IE2/ Cos Phi 0,99
- Aislamiento: Clase F
- Rendimiento hidráulico: 79,6%
- Caudal Nominal: 75 m³/h
- Altura manométrica: 14 m.c.a.
- Nivel sonoro: 63 dBA
- Diámetro aspiración/impulsión: 100/100 mm.
- Material de construcción: Acero, acero inoxidable y bronce con revestimiento completo.
- Tipo: Rotodinámica, radial, de eje vertical y no autoaspirante.



Figura 15 Bomba Herborner X080-210A-0554H. HERBORNER PUMPS (2017)

La sustitución de las bombas por otras de alta eficiencia tiene una serie de mejoras que a continuación detallamos:

- La reducción de consumo produce un ahorro en energía y a su vez una reducción en la potencia instantánea consumida por la instalación deportiva. Esto permitirá reducir la potencia contratada en los 3 periodos tarifarios. La optimización de la potencia contratada producirá un ahorro en el coste de funcionamiento del proceso.
- Reducción en los costes de mantenimiento ya que la mayor solidez del conjunto de la bomba requiere un mantenimiento más sencillo y dilatado en el tiempo.
- Mejora de las condiciones de trabajo para el personal encargado del mantenimiento ya que la percepción del nivel sonoro es sensiblemente menor.

La metodología de estudio para la presente mejora se centra en reproducir de manera aislada, el funcionamiento con cada bomba (original y alta eficiencia) para la solución de arranque convencional a 50 Hz sin variador de frecuencia.

Para ello, se ha realizado un muestreo de consumos para cada uno de los dos tipos de bombas en condiciones similares.

Los datos obtenidos del funcionamiento del proceso en modo día para el bombeo con un equipo de alta eficiencia (bomba tipo A) y de baja eficiencia (bomba tipo B), funcionando a 50Hz, sin variador de frecuencia instalado, se muestran en la Tabla 6.

Tabla 6 Datos bomba original y alta eficiencia sin variador de frecuencia

Tipo Bomba	MODO	Variador	(Hz)	CAUDAL (m³/h)	Presión (kg/cm²)	Consumo medio(A)
A	Día	No	50	75,00 ± 0,54	0,60 ± 0.01	7,40 ± 0,23
B	Día	No	50	80,00 ± 0,54	0,60 ± 0.01	12,52 ± 0,44

Si comparamos los datos recogidos en la Tabla 6, se deduce:

- El caudal de la bomba de alta eficiencia coincide con el caudal de diseño manteniéndose la presión estable.
- El consumo medio por fase se reduce significativamente, en concreto un 40,89%.
- Si se reduce el consumo eléctrico, el nuevo caudal trasegado cumple con la demanda prevista y la presión permanece constante, se confirma que con la implementación de la propuesta, mejora la eficiencia del proceso de bombeo.
- Las vibraciones, el ruido y el funcionamiento general de la instalación hidráulica ha mejorado con la instalación de las bombas de alta eficiencia. Una de las causas del menor ruido y vibraciones percibidos, es la reducción de la velocidad de giro de la bomba que pasa de 3.000 rpm a 1.450 rpm. La calidad de los rodamientos, el revestimiento interior de la voluta y el sistema de amortiguación que monta en su base también mejoran este aspecto.

4.2.3.MEJORA 3: Sustitución de las bombas originales por bombas de alta eficiencia con variador de frecuencia.

Siguiendo el procedimiento de los anteriores casos, comparamos la solución original descrita en el punto 4.1 con la nueva, procediendo a la instalación de la bomba tipo A con el variador de frecuencia descrito en el apartado 4.2.1. Actualmente, en la situación inicial, el cambio del modo día al de noche se realiza de forma manual por personal de la instalación.

Tal y cómo se ha definido en los objetivos del trabajo, se considera interesante valorar conjuntamente las dos mejoras. El objeto es identificar si la suma de ambas tiene algún efecto sobre el rendimiento final del proceso, es decir, si son independientes o no.

Para ello, se procede a comparar la situación original con la situación resultante de implementar las dos medidas vistas en los apartados 4.2.1. y 4.2.2.

No se disponen de las condiciones de trabajo de las bombas de alta eficiencia para el modo día y noche, por lo que se procedió de forma similar a lo descrito en el apartado 4.2.1. para identificarlas.

Se realizaron varias pruebas variando la frecuencia de funcionamiento de las bombas de alta eficiencia hasta reproducir las condiciones definidas para el modo día y noche, siendo:

- Modo día: 45 Hz y 72.2 m³/h para una bomba y 144,4 m³/h para dos.
- Modo noche: 37 Hz y 0.31 kg/cm².

Se compararon las medidas de consumos de la situación original (bombas estándar a 50 Hz sin variador de frecuencia (Tabla 2)) con la situación final (bombas alta eficiencia con variador de frecuencia a 45 Hz para el modo día y 37 Hz para noche (Tabla 7)).

Tabla 7 Datos bomba alta eficiencia a frecuencias de modo día y noche

Tipo Bomba	MODO	Variador	(Hz)	CAUDAL (m ³ /h)	Presión (kg/cm ²)	Consumo medio(A)
A	Día	Si	45	72,20 ± 0,54	0,55 ± 0.01	6,52 ± 0.23
A	Noche	Si	37	38,85 ± 0,73	0,30 ± 0.01	3,55 ± 0.23

Al igual que sucedía con las mejoras 1 y 2, descritas en los apartados 4.2.1. y 4.2.2., el consumo eléctrico de la MEJORA 3 se ve reducido respecto a la situación inicial, presentando los menores consumos de las diferentes soluciones analizadas. Aunque el caudal y la presión disminuyen con respecto a la solución original, se mantienen las condiciones de presión y caudal exigidas. El consumo para el modo día se reduce en un 47,92% y para el modo noche un 71,64%.

4.3. MEJORA DE AUTOMATIZACIÓN DEL PROCESO

El funcionamiento actual del sistema de filtración de la instalación deportiva municipal se regula manualmente. El accionamiento de los variadores de velocidad para cada modo (día y noche) se realiza por los operarios de la instalación.

Se cree interesante, proponer un sistema que pudiese permitir la automatización de este proceso de cambio de frecuencia en los variadores. Además, permitiría tal y cómo se ha descrito en el apartado 4.2.1., mantener las condiciones de servicio para cada modo. Se ha demostrado a través de las medidas tomadas que las condiciones son estables a lo largo del tiempo (apartado 4.2.1., Tabla 3). No obstante, siempre se pueden dar situaciones excepcionales que produzcan una variación en la curva resistente de la tubería. En caso de que se produzca dicha situación, el autómata detectará la situación y regulará la frecuencia de los variadores hasta adaptar las bombas a la nueva situación. De esta forma, las condiciones de caudal para el modo día y la presión para el modo noche se mantendrán estables independientemente de la curva característica de la tubería. Por supuesto esta situación tiene límites que vendrán determinados por el caudal y presión máximos aportados por los grupos de bombeo.

Así mismo, automatizar el funcionamiento de los variadores mediante un programa horario de aperturas y cierres en un autómata, reducirá la carga de trabajo del personal de mantenimiento. Esta parte del proyecto será formulada a nivel de propuesta aunque no se ha llevado a ejecución para la realización del presente TFG.

4.3.1. Esquema de funcionamiento y lógica de control

De forma simplificada, existirán 2 programas con los siguientes esquemas de funcionamiento y lógicas:

- PROGRAMA 1: Funcionamiento en horario apertura. Modo día, necesita una frecuencia de funcionamiento de bombas determinada para mantener el caudal exigido por la norma de 144 m³/h. El programa dispondrá de un sensor de caudal que envía la señal a un controlador (PLC), que actuará en función de la lógica de control programada sobre los variadores de velocidad de las bombas. El modo día se activa a las 08:00h y se desactiva a las 22:00h. Se empleará un control proporcional del tipo PID, donde la señal de control enviada al variador de frecuencia es proporcional al error, a la integral de los errores y a la derivada del error. El error se define como la diferencia entre el valor de caudal necesario (144 m³/h) y el medido por el sensor. El esquema general de funcionamiento se define en la Figura 16.

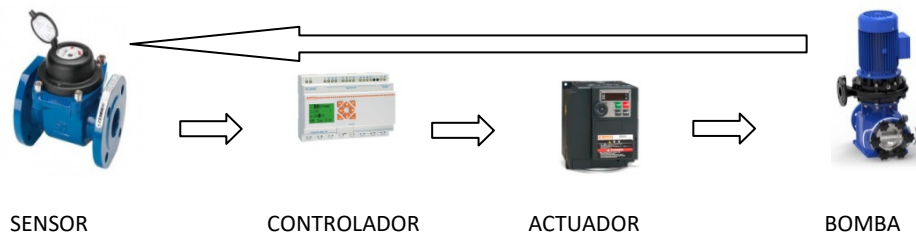


Figura 16. Esquema de funcionamiento del modo día (Programa 1).

- PROGRAMA 2: Funcionamiento en horario cierre. Modo noche, comienza a las 22:00 h y finaliza a las 08:00 h. Las condiciones de servicio para el modo noche, vienen definidas por una presión mínima de $0,30 \text{ kg/cm}^2$ en la entrada del filtro. Para ello se dispone de un sensor que mide la presión a la entrada del filtro, un controlador (mismo PLC que se ha utilizado para el Programa 1) que recibe las medidas y da señal a los actuadores (variadores de frecuencia) que actuarán sobre las bombas. La programación es similar a la del Programa 1 pero cambiará el sensor de caudal por uno de presión y el parámetro a controlar ya no es caudal, es la presión a la entrada del filtro. Se empleará un control proporcional del tipo PID, donde la señal de control enviada al variador de frecuencia es proporcional al error, a la integral de los errores y a la derivada del error. El error se define como la diferencia entre el valor de presión necesaria ($0,3 \text{ kg/cm}^2$) y el medido por el sensor. El esquema general de funcionamiento se define en la Figura 17.

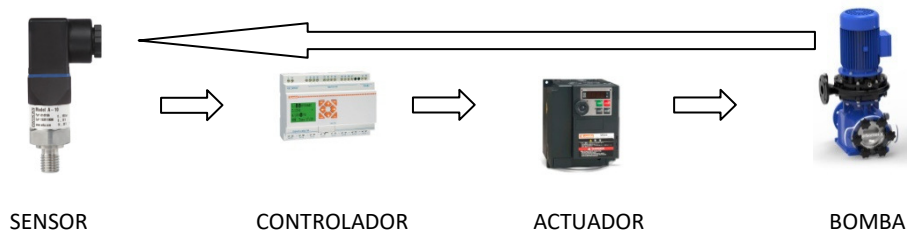


Figura 17. Esquema de funcionamiento del modo noche (Programa 2).

Así pues, el sistema de control seleccionado es un sistema PID que funciona en bucle cerrado por retroalimentación para ambos programas, siendo la única diferencia la variable a controlar y los sensores empleados.

4.3.2. Selección de materiales

Para la selección de los materiales que se utilizarían para la automatización del proceso, se ha tenido en cuenta los sensores y autómatas existentes en la instalación.

4.3.2.1. Sensores

El sensor de caudal existente es el descrito en el apartado 3.8.1. El caudalímetro Zenner, modelo WPH-N DN200 dispone de un emisor de impulsos (REED), salida digital. El contacto REED es un emisor de impulsos pasivo realizado en forma de contacto de trabajo libre de potencial. Un imán integrado de serie en la relojería del contador lo acciona con una frecuencia proporcional al caudal. Los valores de impulsos típicos son 100 litros / impulso. El contacto REED no requiere alimentación propia. El voltaje es de hasta 24V y la carga de corriente máxima 50 mA.

El manómetro WIKA, modelo CPG-500 no permite una salida de comunicación por lo que no será válido para el sistema que se pretende instalar. Es por ello que se selecciona un transmisor de presión WIKA A-10 con salida analógica 0-10V como el de la Figura 18.



Figura 18 Transmisor de presión WIKA A-10. WIKA (2017)

El equipo dispone de las siguientes características (WIKA, 2017):

- Rango de medición desde 0 ... 1 bar hasta 0 ... 1.000 bar.
- No linealidad: 0,25 % ó 0,5 %.
- Salida analógica 4 ... 20 mA, 0 ... 10 V, 0 ... 5 V y otras.
- Conexión eléctrica: Conector angular forma A y C, conector M12 x 1, salida de cable 2m.

4.3.2.2. Controlador

Analizadas las opciones del mercado y disponiendo de un servicio técnico para el desarrollo de la programación, soporte en la instalación y mantenimiento, se opta por los equipos de la marca Lovato. En concreto se selecciona el modelo de PLC marca Lovato, modelo LRD12TD024 que dispone de las siguientes características (LOVATO ELECTRIC, 2017):

- Entradas: Dispone de 6 entradas digitales y 2 digitales configurables como analógicas
- Salidas: 4 transistores
- Reloj y programa horario configurable integrado

El equipo es el que se muestra en la Figura 19.



Figura 19 PLC Lovato LRD. LOVATO ELECTRIC (2017)

La comunicación entre la señal del caudalímetro (sistema de impulsos REED) y el PLC requiere de un equipo que convierta la señal de impulsos REED en una señal analógica. Dicha señal, la puede recibir el PLC en una de sus 2 entradas digitales configurables como analógicas. Para ello se selecciona un convertidor-aislador universal para todo tipo de captadores de pulsos. De la marca Remberg, modelo Taco-Digi. El equipo, convierte la frecuencia en una señal proporcional y aislada en forma de corriente o tensión. Admite un amplio rango de frecuencia, especializado en frecuencias muy bajas. Se opta por la señal de salida de 0-10V.

El PLC seleccionado no dispone de las salidas analógicas necesarias para comunicar con los variadores de frecuencia existentes. Para ello se opta por instalar un módulo de expansión de la misma marca modelo LRE02AD024 con 2 salidas analógicas 0-10V, suficientes para el control sobre los actuadores. El equipo seleccionado es el que se muestra en la Figura 20.



Figura 20 Módulo de expansión Lovato LRE. LOVATO ELECTRIC (2017)

4.3.2.3. Actuadores

En lo referente a los actuadores se mantienen los equipos seleccionados. Los variadores de frecuencia existentes Lovato VFS15-4055 PLW descritos en el apartado 4.2.2. Los equipos disponen de 6 entradas digitales y 2 entradas digitales configurables como analógicas. Las señales de control para el ajuste de la velocidad del variador de frecuencia pueden ser entre otras, señales de tensión 0-10V. Con ello se asegura una óptima comunicación entre el PLC seleccionado y el actuador existente.

4.4. ANÁLISIS ECONÓMICO DE LAS MEJORAS PLANTEADAS

En el apartado 4.2 se han propuesto mejoras que producen un ahorro en energía y unas mejores condiciones de funcionamiento de la instalación hidráulica.

Con los datos obtenidos se procede a realizar un estudio económico de cada una de las tres situaciones de mejora propuestas. El estudio tiene como fin, valorar los ahorros económicos producidos por cada mejora. Los ahorros vienen derivados en mayor medida de la disminución en el consumo eléctrico, la reducción de la potencia contratada y el ahorro en impuesto eléctrico. Por otra parte, se evaluarán cualitativamente los aspectos de mejora que no son económicamente cuantificables.

El coste de cada actuación, vendrá definido por el presupuesto de ejecución de cada solución que se desglosará en las oportunas tablas.

4.4.1. MEJORA 1: Bombas convencionales con variador de frecuencia.

Siguiendo los datos obtenidos y reflejados en el apartado 4.2.1. se obtiene una reducción de consumo con respecto a la solución original de:

- Modo día: El consumo pasa de 12,52 A a 10,02 A = 2,50 A de ahorro por bomba
- Modo noche: El consumo pasa de 12,52 A a 5,07 A = 7,45 A de ahorro por bomba

Pasamos los siguientes datos de consumo eléctrico a potencia eléctrica absorbida por la bomba en W (ecuación 1). Para ello, aplicamos la fórmula para un equipo trifásico cuando medimos la intensidad de línea (fase-neutro).

$$P (W) = \frac{U (V) \times (I_1 + I_2 + I_3) (A) \times \cos \Phi}{\sqrt{3}} \quad (1)$$

Obtenemos que hay un ahorro de:

- Modo día: 2,50 A= 866,46 W= 0.87 kW
- Modo noche: 7,45 A= 2.582,05 W= 2,58 kW

Por las condiciones de funcionamiento descritas en el apartado 4.2.1., son dos las unidades de bombas las que funcionan al unísono. Es por ello que multiplicamos por 2 el ahorro en la potencia empleada en el bombeo para cada modo.

- Modo día: 2 bombas x 0.86 kW = 1,73 kW
- Modo noche: 2 bombas x 2,58 kW = 5,16 kW

El ahorro anual en energía producido durante las horas de funcionamiento de la instalación para cada modo es:

- Modo día: 8-22h = 14 h/día x 1,73 kW x 365 días = 8.855,63 kWh
- Modo noche 22-8h = 10 h/día x 5,16 kW x 365 días = 18.846,60 kWh

El reparto de horas para cada periodo de tarificación eléctrica 3.1A que es la que se ha contratado en el Polideportivo de Nazaret, se representa en la Tabla 8 según lo descrito en el Real Decreto 1164/2001, de 26 de octubre, por el que se establecen tarifas de acceso a las redes de transporte y distribución de energía eléctrica.

Tabla 8 Horarios por periodos para la tarifa 3.1A. Mi FACTURA DE LA LUZ (2017)

Tarifa		3.1 A			
Invierno		Verano		Fin de Semana y Festivo	
Hora	Periodo	Hora	Periodo	Hora	Periodo
H1 (00-01h)	P3	H1 (00-01h)	P3	H1 (00-01h)	P3
H2...H7	P3	H2...H7	P3	H2...H17	P3
H8 (07-08h)	P3	H8 (07-08h)	P3	H18 (17-18h)	P3
H9 (08-09h)	P2	H9 (08-09h)	P2	H19 (18-19h)	P2
H10...H16	P2	H10 (09-10h)	P2	H20...H23	P2
H17 (16-17h)	P2	H11 (10-11h)	P1	H24 (23-00h)	P2
H18 (17-18h)	P1	H12...H15	P1		
H19...H22	P1	H16 (15-16h)	P1		
H23 (22-23h)	P1	H17 (16-17h)	P2		
H24 (23-00h)	P2	H18...H23	P2		
		H24 (23-00h)	P2		

- Modo día:
 - Laborables invierno: De 8-17h P2. De 17-22h P1 = 5h P1 + 9h P2
 - Laborables verano: De 8-10h P2. De 16-22h P2. De 10-16h P1 = 6h P1 + 8h P2
 - Festivos: 8-18h P3. De 18-22h P2 = 4h P2 + 10h P3
- Modo noche:
 - Laborables invierno: De 22-23h P1. De 23-24h P2. De 24-8h P3 = 1h P1 + 1h P2 + 8h P3
 - Laborables verano: De 22-24h P2. De 24-8h P3 = 2h P2 + 8h P3
 - Festivos: 24-8h P3. De 22-24h P2 = 2h P2 + 8h P3

El horario de verano comenzó el 27 de marzo y duró hasta el 29 de octubre. El horario de invierno es del 1 de enero al 26 de marzo y del 30 de octubre al 31 de diciembre.

Existieron 110 días festivos o de fin de semana durante el 2016, 107 días laborables de invierno y 149 días laborables de verano.

Con estos datos obtenemos que el número de horas para cada periodo y modo, es el que se refleja en las Tablas 9 y 10.

Tabla 9 Nº horas para el 2.016 por periodo para tarifa 3.1A y modo día

Periodo	(h) Invierno	(h) Verano	(h) Festivo	(Días) Invierno	(Días) Verano	(Días) Festivos	(h) año
P1	5	6		107	149		1.429
P2	9	8	4	107	149	110	2.595
P3			10			110	1.100

Tabla 10 Nº horas para el 2.016 por periodo para tarifa 3.1A y modo noche

Periodo	(h) Invierno	(h) Verano	(h) Festivo	(Días) Invierno	(Días) Verano	(Días) Festivos	(h) año
P1	1			107			107
P2	1	2	2	107	149	110	625
P3	8	8	8	107	149	110	2.928

El coste medio, I.V.A incluido, de la energía contratada en tarifa 3.1A en el Polideportivo Municipal de Nazaret durante el ejercicio 2.016 para cada periodo se muestra en la Tabla 11.

Si multiplicamos el coste de cada periodo por las horas/año y la potencia eléctrica ahorrada por la mejora 1, obtendremos el importe de ahorro imputable a la energía que se ha dejado de consumir, lo que queda reflejado en las Tablas 11 y 12.

Tabla 11 Ahorro producido en energía para el modo día mejora 1

Periodo	Coste (€/kW)	(h) año	(kW) ahorro	Ahorro (€)
P1	0,114	1.429	1,733	282,32
P2	0,102	2.595	1,733	458,71
P3	0,077	1.100	1,733	146,79
Total ahorro energía modo día				887,81

Tabla 12 Ahorro producido en energía para el modo noche mejora 1

Periodo	Coste (€/kW)	(h) año	(kW) ahorro	Ahorro (€)
P1	0,114	107	5,164	62,99
P2	0,102	625	5,164	329,21
P3	0,077	2.928	5,164	1.164,25
Total ahorro energía modo noche				1.556,45

El gasto energético no sólo viene producido por la energía consumida, una parte importante procede del término fijo de la factura, que viene derivado de la potencia contratada. Al reducir la potencia consumida en 1,733 kW, se puede bajar en dicha cuantía la potencia contratada. Los costes ahorrados de implementar esta medida se describen en la Tabla 13.

Tabla 13 Ahorro producido en término de potencia mejora 1

Periodo	(kW) ahorro	Coste (€/kW)	Importe final anual (€)
P1	1,733	5,97	124,08
P2	1,733	3,68	76,52
P3	1,733	0,84	17,55
Total ahorro término de potencia			218,15

Existe un impuesto directamente aplicado en factura sobre el coste sin I.V.A. del término de energía (T.E.) y el término de potencia (T.P.). Al reducir el coste de ambos, el importe del impuesto eléctrico asociado también se verá reducido (Tabla 14).

Tabla 14 Ahorro producido en impuesto eléctrico mejora 1

T.E. y T.P. Ahorrado sin IVA (€)	Impuesto eléctrico (€)	Total Ahorro I.E. con IVA (€)
2.200,34	0,05	136,12

Los costes directamente cuantificables de la mejora 1 que se han descrito en el presente apartado se resumen en la Tabla 15.

Tabla 15 Ahorro total producido por la mejora 1

Concepto	Importe (€)
Total ahorro en energía consumida €	2.444,26
Total ahorro término de potencia €	218,15
Ahorro Impuesto Eléctrico	136,12
Ahorro total MEJORA 1	2.798,53

Los costes cuantificables económicamente ascienden a 2.798,53 € IVA incluido. Existen otras mejoras asociadas a la instalación de los variadores de velocidad que no se han cuantificado en el presente TFG, pero que se pueden valorar cualitativamente, como son:

- Reducción de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) asociadas a la producción de electricidad.
- Mejora en el funcionamiento hidráulico de la instalación. Ello prolonga la durabilidad de la válvula de retención, de las juntas elásticas, de las tramadas de tuberías, de los cierres mecánicos de bombas, etc.
- Mayor durabilidad de los motores eléctricos al trabajar en mejores condiciones.

Para poder cuantificar el periodo de retorno de la inversión, se ha tomado como criterio utilizar para el cálculo los ahorros cuantificables descritos en la Tabla 15.

El coste derivado de la implantación de la medida 1, viene valorado según el presupuesto de material solicitado y la mano de obra necesaria para su instalación (Tabla 16).

Tabla 16 Coste de ejecución de la mejora 1

Concepto	Uds.	Importe Ud (€)	Total (€)
Variador de frecuencia	2	451,62	903,24
Mano de obra de oficial electricista para instalación en cuadro existente	6	16,58	99,48
Mano de obra de ayudante electricista para instalación en cuadro existente	6	14,10	84,60
Pequeño material para conexonado y cableado interior en cuadro	1	38,65	38,65
		Base imponible	1.125,97
		IVA 21%	236,45
		Total coste mejora 1	1.362,42

El cálculo del plazo de amortización de la inversión se realiza dividiendo el coste de implantación de la mejora entre el ahorro anual producido. Realizando el anterior cálculo, obtenemos que el plazo de amortización de la mejora 1 es de 0,49 años. Si suponemos que la inversión ejecutada tiene una vida útil de al menos 15 años, el importe ahorrado antes de su reposición será de 40.615,53 €.

4.4.2.MEJORA 2: Sustitución de las bombas originales por bombas de alta eficiencia.

Siguiendo el procedimiento empleado en el apartado 4.4.1. se procede a calcular el ahorro producido y el periodo de retorno de la inversión para la mejora 2.

La sustitución directa de los grupos de bombeo originales por unos de alta eficiencia nos produce una reducción considerable en la potencia de los motores de los mismos. La menor potencia, tal y cómo se ha explicado en el anterior apartado, conlleva una reducción de los costes de funcionamiento.

Con las medidas obtenidas de los dos grupos de bombeo (A y B) reflejadas en la Tabla 4, se obtiene que la potencia eléctrica de cada grupo de bombeo aplicando la fórmula para equipos trifásicos:

- Baja eficiencia (B): 4,34 kW
- Alta eficiencia (A): 2,92 kW

El ahorro producido por la sustitución de las dos unidades de bombas de alta eficiencia es de 2,84 kW. Las condiciones de funcionamiento y horas por periodo y año son similares a las descritas en el anterior apartado. Con ello se calcula el importe de ahorro en término de energía y potencia así como el impuesto eléctrico que se dejará de pagar. Todo ello viene reflejado en la Tabla 17.

Tabla 17 Ahorro producido en energía para el modo día y noche por la mejora 2

Periodo	Coste (€/kW)	(h) año	(kW) ahorro	Ahorro (€)
P1	0,114	1.429	2,84	462,65
P2	0,102	2.595	2,84	751,72
P3	0,077	1.100	2,84	240,55
Total ahorro energía modo día				1.454,92

Periodo	Coste (€/kW)	(h) año	(kW) ahorro	Ahorro (€)
P1	0,114	107	2,84	34,64
P2	0,102	625	2,84	181,05
P3	0,077	2.928	2,84	640,30
Total ahorro energía modo noche				855,99

A continuación se calcula el ahorro producido por la reducción del término de potencia contratado, reduciéndose éste en 2,84 kW. El importe ahorrado se refleja en la siguiente tabla.

Tabla 18 Ahorro producido en término de potencia por la mejora 2

Periodo	(kW) ahorro	Coste (€/kW)	Importe final anual (€)
P1	2,84	5,97	203,34
P2	2,84	3,68	125,40
P3	2,84	0,84	28,75
Total ahorro término de potencia			357,50

El menor coste energético hace que el impuesto asociado a él también se reduzca por un importe anual descrito en la Tabla 19.

Tabla 19 Ahorro producido en impuesto eléctrico por la mejora 2

T.E. y T.P. Ahorrado sin IVA (€)	Impuesto eléctrico (€)	Total Ahorro I.E. con IVA (€)
2205,29	0,05	136,43

Con todos los costes definidos podemos cuantificar globalmente los ahorros económicos producidos por la mejora 2 (Tabla 20).

Tabla 20 Ahorro total producido por la mejora 2

Concepto	Importe (€)
Total ahorro en energía consumida €	2.310,91
Total ahorro término de potencia €	357,50
Ahorro Impuesto Eléctrico	136,43
Ahorro total MEJORA 2	2.804,83

La mejora 2 produce unos ahorros anuales cuantificables económicamente de 2.804,83 €. La instalación de las bombas de alta eficiencia, también lleva asociadas otras mejoras:

- Reducción de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) asociadas a la producción de electricidad.
- Ausencia de vibraciones y reducción significativa del ruido asociado al funcionamiento de las bombas, lo que mejora las condiciones laborales de los operarios.
- Mayor durabilidad de los grupos de bombeo por mejorar la calidad frente a la solución original.

Para cuantificar el periodo de retorno de la inversión se mantiene el criterio del apartado 4.4.1. y sólo se utilizan para el cálculo, los ahorros cuantificables descritos en la Tabla 20.

El coste derivado de la implantación de la mejora 2, valorado según presupuesto de suministro e instalación de los grupos de presión seleccionados se define en la Tabla 21.

Tabla 21 Coste de ejecución de la mejora 2

Concepto	Uds.	Importe Ud (€)	Total (€)
Bombas alta eficiencia	2	4.067,00	8.134,00
Accesorios, tubería y tornillería	1	875,00	875,00
Mano de obra de fontanería (h)	24	31,25	750,00
		Base imponible	9.759,00
		IVA 21%	2.049,39
		Total coste mejora 2	11.808,39

Con los datos de las Tablas 20 y 21 se obtiene el periodo de retorno de la inversión de la mejora 2, que es de 4,21 años. A priori puede parecer que el plazo de amortización es alto. Hay que tener en cuenta que la reposición de los grupos de bombeo originales es inminente por su mal estado tras más de 14 años de funcionamiento continuo. El coste de la reposición de los equipos es de 5.110 € por unidad, IVA incluido. Así pues, en nuestro caso, al ser necesaria la reposición de los equipos, el plazo de retorno de la inversión es de 0,57 años.

La vida útil estimada de los grupos de bombeo es de al menos 15 años. El plazo de amortización del total de la inversión correspondiente a la mejora 2 es de 4,21 años sin tener en cuenta la reposición de los equipos. Con estos datos y los correspondientes al ahorro anual producido por las bombas de alta eficiencia, se calcula el ahorro acumulado al final de la vida de los equipos. Para este caso es de 30.264,12 €. Si se considera, como en nuestro caso, que la reposición de las bombas es imprescindible, el ahorro acumulado es de 40.473,70 €.

4.4.3.MEJORA 3: Sustitución de las bombas originales por bombas de alta eficiencia con variador de frecuencia.

En el presente apartado se quiere cuantificar la suma de las mejoras 1 y 2. Para ello se sustituyen las bombas de alta eficiencia y se instalan variadores de frecuencia, actuando de modo manual sobre el cambio de frecuencias para el modo día y noche.

Con las medidas obtenidas de los dos grupos de bombeo de la solución original (Tabla 2) y alta eficiencia con variador de velocidad (Tabla 7), se obtiene que la potencia eléctrica de cada grupo de bombeo aplicando la formula vista en el apartado 4.4.1.

- Baja eficiencia (B): 4,34 kW
- Alta eficiencia (A) modo día (45 Hz): 2,57 kW
- Alta eficiencia (A) modo noche (37Hz): 1,40 kW

El ahorro producido por la sustitución de las dos unidades de bombas de alta eficiencia es de 3,54 kW para el modo día y 5,88 kW para el modo noche. Con los datos de potencia de las bombas de alta eficiencia se calcula el ahorro anual en euros para la mejora 3.

Primero calculamos el ahorro en término de energía (TE) que se refleja para cada modo de funcionamiento en la Tabla 22.

Tabla 22 Ahorro producido en energía para el modo día y noche para la mejora 3

Periodo	Coste (€/kW)	(h) año	(kW) ahorro	Ahorro (€)
P1	0,114	1.429	3,54	576,69
P2	0,102	2.595	3,54	937,00
P3	0,077	1.100	3,54	299,84
Total ahorro energía modo día				1.813,53
Periodo	Coste (€/kW)	(h) año	(kW) ahorro	Ahorro (€)
P1	0,114	107	5,88	71,72
P2	0,102	625	5,88	374,85
P3	0,077	2.928	5,88	1.325,68
Total ahorro energía modo noche				1.772,26

Posteriormente calculamos el ahorro en término de potencia (TP). Se contabiliza sólo el menor de los ahorros producidos ya que se baja la potencia en los 3 periodos. Su cálculo e importe ahorrado se definen en la Tabla 23.

Tabla 23 Ahorro producido en término de potencia por la mejora 3

Periodo	(kW) ahorro	Coste (€/kW)	Importe final anual (€)
P1	3,54	5,97	253,46
P2	3,54	3,68	156,30
P3	3,54	0,84	35,84
Total ahorro término de potencia €			445,61

Se procede al cálculo del impuesto eléctrico que se dejará de pagar si aplicamos la mejora 3 (Tabla 24).

Tabla 24 Ahorro producido en impuesto eléctrico para la mejora 3

T.E. y T.P. Ahorrado sin IVA (€)	Impuesto eléctrico (€)	Total Ahorro I.E. con IVA (€)
3331,73	0,05	206,11

Para finalizar el estudio de ahorros, se resumen en la Tabla 25, los ahorros totales producidos para la mejora 3.

Tabla 25 Ahorro total producido por la mejora 3

Concepto	Importe (€)
Total ahorro en energía consumida €	3.585,78
Total ahorro término de potencia €	445,61
Ahorro Impuesto Eléctrico	206,11
Ahorro total MEJORA 3	4.237,51

Las mejoras no cuantificables económicamente, son las descritas para las mejoras 1 y 2.

El coste previsto de la mejora 3 es la suma de las mejoras 1 y 2 y que se muestran en la Tabla 26.

Tabla 26 Coste de ejecución de la mejora 3

Concepto	Uds.	Importe Ud (€)	Total (€)
Variador de frecuencia	2	451,62	903,24
Mano de obra de oficial electricista (h)	6	16,58	99,48
Mano de obra de ayudante electricista (h)	6	14,10	84,60
Pequeño material para conexionado	1	38,65	38,65
Bombas alta eficiencia	2	4.067,00	8.134,00
Accesorios, tubería y tornillería	1	875,00	875,00
Mano de obra de fontanería (h)	24	31,25	750,00
		Base imponible	10.884,97
		IVA 21%	2.285,84
		Total coste mejora 3	13.170,81

Una vez se dispone del importe de ejecución y el importe ahorrado por la mejora 3, se procede al cálculo del periodo de retorno. El plazo de amortización de la inversión es de 3,11 años. Si se tiene en cuenta en los cálculos la reposición de las bombas antiguas por haber llegado al final de su vida útil, tal y como se ha explicado en el apartado 4.4.2, el plazo de amortización se reduce hasta los 0,70 años. La inversión tiene una vida útil estimada de 15 años, por lo que se calcula un ahorro acumulado al final de la vida útil de los equipos de 50.391,84 €.

4.4.4. Resumen de los datos obtenidos por las mejoras

A continuación se enumeran las mejoras propuestas y los datos que resultan de la aplicación de cada una de ellas:

- Mejora 1: Instalación de variadores de frecuencia.
 - Coste de ejecución: 1.362,42 €
 - Ahorro anual obtenido kWh: 27.780,13 kWh
 - Ahorro anual obtenido €: 2.798,53 €
 - Plazo de amortización inversión: 0,49 años
 - Vida útil estimada: 15 años
 - Ahorro al final de la vida útil kWh: 416.701,95 kWh
 - Ahorro al final de la vida útil €: 40.615,53 €

- Mejora 2: Instalación de grupos de bombeo de alta eficiencia.
 - Coste de ejecución: 11.808,39 €
 - Coste sustitución bombeo original 10.220,00 €
 - Coste imputable a la mejora 1.588,39 €
 - Ahorro anual obtenido kWh: 24.946,56 kWh
 - Ahorro anual obtenido €: 2.804,83 €
 - Plazo de amortización inversión: 0,57 años
 - Vida útil estimada: 15 años
 - Ahorro al final de la vida útil kWh: 374.198,40 kWh
 - Ahorro al final de la vida útil €: 40.484,06 €

- Mejora 3: Bombas de alta eficiencia con variador de velocidad.
 - Coste de ejecución: 13.170,81 €
 - Coste sustitución bombeo original 10.220,00 €
 - Coste imputable a la mejora 2.950,81 €
 - Ahorro anual obtenido kWh: 39.659,76 kWh
 - Ahorro anual obtenido €: 4.237,51 €
 - Plazo de amortización inversión: 0,70 años
 - Vida útil estimada: 15 años
 - Ahorro al final del plazo kWh: 594.896,40 kWh
 - Ahorro al final del plazo €: 50.391,84 €

Uno de los criterios a tener en cuenta a la hora de definir el orden de ejecución de las inversiones, es el menor plazo de amortización de la inversión, es decir, se ejecutaría primero la inversión que ofrezca un mayor rendimiento económico. Por ello, y en función de los datos obtenidos, se considera que de las 2 inversiones propuestas, primero se deberá ejecutar la mejora 1 con 0,49 años de periodo de retorno. Este criterio es estrictamente económico y por la similitud de plazos de retorno de la inversión, pudiera verse afectado por otros criterios. Por ejemplo, si las bombas se deben sustituir por encontrarse al final de su vida útil, podría ejecutarse por necesidades de servicio la propuesta 2 antes que la 1. Existen otros criterios válidos como el ahorro económico acumulado al final de la vida útil de la inversión o la energía eléctrica que se ha dejado de consumir. Ambos criterios están directamente relacionados, por lo que será idéntico el orden estipulado para la ejecución de las inversiones. De ésta forma, la propuesta de inversión 3 (suma de la 1 y 2) sería la más interesante con 50.391,84 € y 594,90 MWh ahorrados. En el caso no se pudiesen ejecutar conjuntamente, se propone primero la 1 y posteriormente la 2.

5. CONCLUSIONES

A continuación se exponen las conclusiones obtenidas en el presente trabajo.

- Se ha caracterizado la solución inicial del sistema de bombeo de la piscina municipal de Nazaret, de la cual se desconocían determinados aspectos, lo que ha permitido proponer vías de mejora tanto mecánicas y eléctricas como de automatización de la instalación.
- Las propuestas de mejora mecánica y eléctrica se han definido en todos sus ámbitos y una vez ejecutadas se han medido por separado todos los parámetros necesarios para valorar su rentabilidad. Las tres mejoras propuestas incrementan la calidad, rentabilidad, eficiencia, estabilidad, seguridad y sostenibilidad del proceso. Por lo tanto, se puede afirmar que las mejoras propuestas incrementan la calidad del proceso en todos los ámbitos.
- La propuesta de mejora para la automatización del proceso se ha planteado pero no se ha definido económicamente. No se considera prioritaria su ejecución al disponer la instalación de Nazaret, de personal de mantenimiento en toda la franja horaria que permite realizar los cambios de frecuencia en las bombas para cada modo de funcionamiento. No obstante, para aquellas instalaciones deportivas donde no exista personal para el cambio de programa horario, es una mejora necesaria a ejecutar. La automatización del proceso, también asegura en horario de apertura (modo día) que el caudal trasegado, sea el estipulado por la normativa de aplicación. Por otra parte, fuera del horario de apertura (modo noche), permitirá mantener la presión mínima a la entrada de los filtros, asegurando en ambos casos, a lo largo del tiempo, el correcto funcionamiento de la instalación de filtración y tratamiento del agua de la piscina con el mínimo coste.
- El análisis económico de las 3 propuestas de mejora mecánica y eléctrica, ha permitido obtener unos resultados que tras su análisis permiten cuantificar los ahorros producidos y el periodo de retorno, lo que definirá el orden de ejecución de las inversiones.
- El orden de ejecución de las inversiones depende del criterio seleccionado:
 - Menor periodo de retorno de la inversión: Se define como la mejor solución, la instalación de variadores de frecuencia (mejora 1) ya que su periodo de retorno es inferior a la sustitución de las bombas originales por las de alta eficiencia (mejora 2).
 - Mayor ahorro económico al final de la vida útil de la inversión: La mejora 3 (suma de la 1 y 2) es la que mayor ahorro produce con 50.391,84 €. Si se deben ejecutar por separado las mejoras 1 y 2, se propone primero realizar la 1.
 - Mayor energía ahorrada al final de la vida útil de la inversión: la propuesta de inversión 3 es la más interesante con 594,90 MWh ahorrados. Si se deben ejecutar por separado las mejoras 1 y 2, se propone primero realizar la 1.
- La suma de las mejoras 1 y 2 no produce los efectos esperados pero aún así se amortiza en un plazo de 0,70 años y ahorra más que cualquiera de las otras 2 mejoras propuestas por separado. Esto indica que es muy rentable ejecutar las 2 mejoras propuestas.

6. BIBLIOGRAFÍA

Arviza J., Santamarina C. (1995). *Ingeniería Rural: Hidráulica*. Universidad Politécnica de Valencia. 84, 7721-309-7.

Consejo Superior de Deportes (2015). *Censo Nacional de Instalaciones Deportivas*. Ministerio de Educación, Cultura y Deporte. 030, 15-091-7.

Consellería de Justicia y Administraciones Públicas. Consellería de Medio Ambiente (1994). *DOGV 255/1994 de 7 de diciembre, del Gobierno Valenciano, por el que se regulan las normas higiénico-sanitarias y de seguridad de las piscinas de uso colectivo y de los parques acuáticos*. Generalitat Valenciana.

Consellería de Justicia y Administraciones Públicas. Consellería de Medio Ambiente (2000). *DOGV 97/2000 de 13 de junio, del Gobierno Valenciano, por el que se modifica el Decreto 255/1994, de 7 de diciembre, del Gobierno Valenciano, por el que se regulan las normas higiénico-sanitarias y de seguridad de las piscinas de uso colectivo y de los parques acuáticos*. Generalitat Valenciana.

F D M (2003). *Memoria anual 2002*. Fundación Deportiva Municipal de Valencia.

F D M (2016). *Memoria anual 2015*. Fundación Deportiva Municipal de Valencia. V-1686-20.

Ministerio de Economía (2001). *RD 1164/2001 de 26 de octubre, por el que se establecen tarifas de acceso a las redes de transporte y distribución de energía eléctrica*. Gobierno de España.

Ministerio de Sanidad, Servicios Sociales e Igualdad (2013). *RD 742/2013 de 27 de septiembre, por el que se establecen los criterios técnico-sanitarios de las piscinas*. Gobierno de España.

REFERENCIAS ELECTRÓNICAS

ASTRALPOOL (2017). www.astralpool.com. Consultado el 5 de abril de 2017.

BOMBAS SELLOS (2017). www.bombasellos.com.mx. Consultado el 5 de abril de 2017.

ES EL AGUA (2013). www.eselagua.com. Consultado el 3 de mayo de 2017.

FULL MECÁNICA (2017). www.fullmecnica.com. Consultado el 5 de abril de 2017.

HANNA INSTRUMENTS (2017). www.hannainst.es. Consultado el 7 de mayo de 2017.

HERBORNER PUMPS (2017). www.herborner-pumpen.de. Consultado el 7 de mayo de 2017.

LOVATO ELECTRIC (2017). www.lovatoelectric.es. Consultado el 7 de mayo de 2017.

METREL (2017). www.metrel.es. Consultado el 7 de mayo de 2017.

MI FACTURA DE LA LUZ (2017). www.mifakturadeluz.com. Consultado el 3 de mayo de 2017.

WIKA (2017). www.wika.es. Consultado el 3 de mayo de 2017.

ZENNER (2017). www.zenner.es. Consultado el 3 de mayo de 2017.