

UNIVERSIDAD DE MÁLAGA

Escuela de Ingenierías Industriales

Dpto. Expresión Gráfica, Diseño y Proyectos

Área de Proyectos de Ingeniería

PROGRAMA DE DOCTORADO

INGENIERÍA MECÁNICA Y EFICIENCIA ENERGÉTICA



UNIVERSIDAD
DE MÁLAGA



TESIS DOCTORAL

**ANÁLISIS TEÓRICO-EXPERIMENTAL DE EFICIENCIA
ENERGÉTICA EN INFRAESTRUCTURAS URBANAS**

THEORETICAL-EXPERIMENTAL ANALYSIS OF ENERGY EFFICIENCY IN
URBAN INFRASTRUCTURES

DOCTORANDO

D. Antonio Ocaña Miguel

TUTOR DE LA TESIS

Dr. D. Emilio Ruíz Reina

DIRECTORES

Dr. D. José Ramón de Andrés Díaz

Dr. D. Alfonso Gago Calderón

Málaga, junio de 2022





UNIVERSIDAD
DE MÁLAGA

AUTOR: Antonio Ocaña Miguel

 <https://orcid.org/0000-0002-2049-4875>

EDITA: Publicaciones y Divulgación Científica. Universidad de Málaga



Esta obra está bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-SinObraDerivada 4.0 Internacional:

<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/legalcode>

Cualquier parte de esta obra se puede reproducir sin autorización pero con el reconocimiento y atribución de los autores.

No se puede hacer uso comercial de la obra y no se puede alterar, transformar o hacer obras derivadas.

Esta Tesis Doctoral está depositada en el Repositorio Institucional de la Universidad de Málaga (RIUMA): riuma.uma.es





UNIVERSIDAD
DE MÁLAGA



DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y ORIGINALIDAD DE LA TESIS PRESENTADA PARA OBTENER EL TÍTULO DE DOCTOR

D. ANTONIO OCAÑA MIGUEL, estudiante del programa de doctorado INGENIERÍA MECÁNICA Y EFICIENCIA ENERGÉTICA de la Universidad de Málaga, en calidad de autor de la tesis, que se presenta para la obtención del título de doctor por la Universidad de Málaga, titulada: ANÁLISIS TEÓRICO-EXPERIMENTAL DE EFICIENCIA ENERGÉTICA EN INFRAESTRUCTURAS URBANAS.

Realizada bajo la tutorización de DR. D. EMILIO RUÍZ REINA y dirección de DR. D. JOSÉ RAMÓN DE ANDRÉS DÍAZ Y DR. D. ALFONSO GAGO CALDERÓN.

DECLARA QUE:

La tesis presentada es una obra original que no infringe los derechos de propiedad intelectual ni los derechos de propiedad industrial u otros, conforme al ordenamiento jurídico vigente (Real Decreto Legislativo 1/996, de 12 de abril, por el que se aprueba del texto refundido de la Ley de Propiedad Intelectual, regularizando, aclarando y armonizando las disposiciones legales vigentes sobre la materia), modificado por la Ley 2/2019, de 1 de marzo.

Igualmente asumo, ante la Universidad de Málaga y ante cualquier otra instancia, la responsabilidad que pudiera derivarse en caso de plagio de contenidos en la tesis presentada, conforme al ordenamiento jurídico vigente.

En Málaga, a 04 de junio de 2022.

Fdo.: ANTONIO OCAÑA MIGUEL Doctorando	Fdo.: DR. D. EMLILIO RUÍZ REINA Tutor
Fdo.: DR. D. JOSÉ RAMÓN DE ANDRÉS DÍAZ Y DR. D. ALFONSO GAGO CALDERÓN Directores de la tesis	





UNIVERSIDAD
DE MÁLAGA

*A mi esposa Paqui
y mi hija Laura
...siempre juntos...*





UNIVERSIDAD
DE MÁLAGA

Agradecimientos

Quiero dar las gracias a mis directores de tesis Dr. José Ramón de Andrés Díaz y Dr. Alfonso Gago Calderón. Bien saben ellos que, hubo un momento que pensé en abandonar, dado que además de compatibilizar el trabajo, la familia y el desarrollo de la tesis, tuvimos que añadir la llegada del Covid-19, que impidió realizar los experimentos de una manera continuada, y se iba alargando en el tiempo. Sin sus ánimos y apoyo no hubiera finalizado la tesis.

Mi sincero agradecimiento a los dos, por el esfuerzo que habéis invertido en la supervisión del presente trabajo, las valiosas aportaciones y consejos recibidos. Me habéis instruido en el campo de las publicaciones científicas, haciéndome ver lo importante que era cada detalle, por muy insignificante que fuera.

Quiero agradecer al Excmo. Ayuntamiento de Cártama por permitirnos utilizar las instalaciones municipales para la realización de los ensayos desarrollados para la presente tesis.

Gracias a mis padres, personas humildes, que con su trabajo y esfuerzo han contribuido a mi formación personal y profesional. Si mi padre hubiese tenido la oportunidad de formarse en ingeniería sería mil veces mejor ingeniero que yo.

Agradecer también a los revisores de las publicaciones, ya que por sus correcciones han mejorado los artículos presentados a las revistas.

Y por supuesto, y más importante, dar las gracias a Paqui mi mujer. Sin duda alguna, no lo hubiese conseguido sin tu ayuda y contribución. Tú has tirado del carro familiar mientras yo estudiaba o me ausentaba. Tú me has acompañado desde hace 36 años en mi vida, siempre a mi lado, junto con nuestra hija Laura, la más bonita del mundo. Todo lo que he conseguido es gracias a ti...

Resumen

El presente trabajo se enmarca dentro de la sostenibilidad energética y la autosuficiencia en las infraestructuras municipales. Desde la propia actividad de las Administraciones Públicas de carácter local, es posible ver cómo se está trabajando con múltiples experiencias piloto y sus réplicas en la evolución de la eficiencia energética en el sector de la edificación, con el objetivo final de intentar conseguir un edificio con consumo casi nulo. Sin embargo, no se observa la existencia de una tendencia de evolución similar para el objetivo complementario de lograr un municipio con consumo casi nulo. Desde este punto de vista, y en el contexto de grandes consumidores energéticos como son los ayuntamientos, queda aún mucho que recorrer, evolucionar y mejorar.

Las ciudades consumen la mitad de la energía a escala mundial, y las infraestructuras urbanísticas de los municipios (iluminación, agua, etc.) conllevan un consumo de energía que, en muchos casos, se produce con combustibles procedentes de hidrocarburos. Esto las hace insostenibles a largo plazo.

Por lo tanto, es necesario que a escala urbana se implanten de manera real la producción de energía por fuentes renovables, para permitir un ahorro energético que no comprometa al medio ambiente.

Los municipios pueden ser productores de energías renovables y cubrir con ésta una parte importante de sus necesidades energéticas. Para ello se propone en el presente trabajo diferentes soluciones energéticas, para lograr disminuir el consumo eléctrico mediante la mejora de la eficiencia energética y obtener energía eléctrica mediante fuentes renovables, aplicadas a las infraestructuras del municipio. Nos hemos apoyado en un caso real, como es el municipio de Cártama, cuyas infraestructuras han servido como laboratorio de ensayos.

Se han realizado tres experimentos en dichas instalaciones, donde se proponen y consiguen por un lado una mejora de la eficiencia energética, y por otro, la producción de energía por fuentes renovables para su autoconsumo. Las líneas de investigación desarrolladas siguen un hilo conductor, encaminados a reducir el consumo energético del municipio, mejorando y obteniendo energía en tres ámbitos diferenciados:

- I. Alumbrado público.
- II. Edificios municipales.
- III. Red de abastecimiento de agua.

Estos experimentos han concluido con las siguientes publicaciones:

- 1- Análisis de viabilidad de la programación de alumbrado público usando ciclos de conmutación en la línea eléctrica.
- 2- Adaptación de una instalación de alumbrado exterior fotovoltaico centralizado aislado con sistema de control electrónico para mejorar la garantía del servicio en latitudes tropicales altas.

- 3- Instalación experimental de alumbrado público exterior alimentado por turbina hidráulica instalada en la red municipal de abastecimiento de agua.

Abstract

This work is framed within energy sustainability and self-sufficiency in municipal infrastructures. Since I develop my professional activity as a municipal engineer, in a Public Administration (Cártama City Council), I have seen how energy efficiency has evolved in the building sector, in the direction of achieving a building with almost zero consumption. However, there has been no such evolution to achieve a municipality with almost zero consumption. From an energy point of view, we still have a long way to go to improve. Cities consume half of the world's energy, and the urban infrastructures of municipalities (lighting, water, etc.) involve energy consumption that, in many cases, is produced with fuels from hydrocarbons. This makes them unsustainable in the long term. Therefore, it is necessary to implement the production of energy based on renewable sources in a real way on an urban scale, to allow energy savings that do not compromise the environment.

Municipalities can be producers of renewable energy and cover an important part of their energy needs with it. For this purpose, different solutions applied to are proposed in this work, in order to reduce electricity consumption by improving energy efficiency and obtain electricity through renewable sources, applied to the infrastructure of the municipality. We have relied on a real case, such as the municipality of Cártama, whose infrastructure has served us as a testing laboratory. Three experiments have been carried out in these facilities, where they propose and achieve, on the one hand, an improvement in energy efficiency, and on the other hand, the production of energy from renewable sources.

The lines of research developed follow a common thread, aimed at reducing the energy consumption of the municipality, increasing the efficiency in three different scopes:

- I. Public lighting.
- II. Municipal buildings.
- III. Water supply network.

These experiments have concluded with the following publications:

- 1- Analysis of the viability of street light programming using commutation cycles in the power line.
- 2- Adaptation of an insulated centralized photovoltaic outdoor lighting installation with electronic control system to improve service guarantee in tropical latitudes.
- 3- Experimental installation of outdoor public lighting powered by a hydraulic turbine installed in the municipal water supply network.

ÍNDICE

Resumen.....	iii
Abstract.....	v
ÍNDICE DE TABLAS	iv
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Introducción al tema de estudio	1
1.2 Motivación.....	1
1.3 Resumen del estado del arte	3
1.4 Planteamiento y determinación del problema a investigar.....	8
2. OBJETIVOS DE LA TESIS.....	10
3. METODOLOGÍA.....	12
3.1 Hipótesis de partida.	12
3.2 Metodología aplicada.....	12
4. EXPOSICIÓN DE LA INVESTIGACIÓN REALIZADA.....	14
4.1 Investigación 1: Mejora de la eficiencia energética en la red de alumbrado público basada en la conmutación de pulsos de línea eléctrica.	14
4.2 Investigación 2: Adaptación de una instalación de alumbrado exterior fotovoltaico centralizado aislado para mejorar la garantía del servicio en latitudes tropicales altas.....	24
4.3 Investigación 3: Instalación experimental de alumbrado público alimentado por turbina hidráulica instalada en la red de abastecimiento de agua	39
5. DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS.....	51
5.1 Investigación 1: Mejora de la eficiencia energética en la red de alumbrado público basada en la conmutación de pulsos de línea eléctrica.	51
5.2 Investigación 2: Adaptación de una instalación de alumbrado exterior fotovoltaico centralizado aislado para mejorar la garantía del servicio en latitudes tropicales altas.....	52
5.3 Investigación 3: Instalación experimental de alumbrado público alimentado por turbina hidráulica instalada en la red de abastecimiento de agua	53
6. CONCLUSIONES.....	59
7. LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN FUTURAS	63
8. BIBLIOGRAFÍA	65
9. COMPENDIO DE PUBLICACIONES.....	0

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Evolución del precio de la electricidad POOL/OMIE	2
Figura 2. Esquema de los pasos para aplicación del Pacto de los Alcaldes	4
Figura 3. Número de ciudades españolas por ODS y rango	6
Figura 4. Evolución de la potencia eléctrica instalada en Andalucía	7
Figura 5. Evolución de la producción de electricidad renovable	9
Figura 6. Reparto del consumo de energía eléctrica en el Ayuntamiento de Cártama	9
Figura 7. Escenarios de la evolución de la demanda energética al 2050	10
Figura 8. Diagrama de funcionamiento para diferentes épocas del año.	17
Figura 9. Esquema básico de alimentación para un conjunto de luminarias instaladas en la vía pública.	18
Figura 10. Diagrama de bloques para el modelo de configuración propuesto	20
Figura 11. Esquema electrónico del sistema de regulación y control instalado en cada luminaria y propuesta de implementación	20
Figura 12. Esquema electrónico del sistema de regulación y secuencia de consumo en cada línea del cuadro eléctrico en base a diferentes programaciones.	21
Figura 13. Curvas de descarga de ELG-150-24B (izquierda) y ELG-75-24B (derecha) de Meanwell, ambos trabajando a su potencia nominal.....	22
Figura 14. Diagrama de tiempos de conmutación para configurar el programa de regulación a utilizar por las luminarias en los próximos ciclos de trabajo.....	24
Figura 15: Diagrama distribución y distancia de cableado entre elementos de la instalación	27
Figura 16. Esquema de instalación de prueba y equipo de monitoreo de datos.....	31
Figura 17. Radiación solar recibida en los paneles fotovoltaicos en el mes de abril	31
Figura 18. Radiación solar recibida en los paneles fotovoltaicos en un día soleado promedio de primavera.	32
Figura 19. Radiación solar recibida en los paneles fotovoltaicos en un día soleado	32
Figura 20. Esquemas de las unidades electrónicas de control de supervisión y regulación... 37	
Figura 21. Fotografía de la PCB montada como unidad maestra de control de supervisión y regulación.....	37
Figura 22. Curva de descarga de la batería sin ningún sistema de regulación de carga.....	39
Figura 23. Curva de descarga de la batería mediante un sistema de control de	39
Figura 24. Distribución geográfica de la red de agua potable en Cártama (España).....	42
Figura 25. Diagrama sinóptico de la red de agua potable en Cártama (España)	42
Figura 26. Esquema del bypass ERT instalado en la PRV existente	43
Figura 27. Curvas características de funcionamiento de la micro turbina 050-B0 obtenidas en banco de prueba por el fabricante (Tecnoturbines SL).....	44

Figura 28. Ubicación del sistema experimental: Válvula reductora abajo a la izquierda, ERT arriba a la izquierda y panel de almacenamiento y control energía a la derecha .	45
Figura 29. Ubicación del sistema experimental: Válvula reductora abajo a la izquierda, ERT arriba a la izquierda y panel de almacenamiento y control energía a la derecha .	45
Figura 30. Esquema visual del sistema de monitorización de alumbrado público	47
Figura 31. Curvas de caudal medidas en la PRV en los meses de julio (arriba), agosto (segundo desde arriba), septiembre (tercero desde arriba), y octubre (abajo)	48
Figura 32. Detalle de la fluctuación de caudales durante el mes de septiembre.	49
Figura 33: Detalle de fluctuación de caudales durante una semana de septiembre.	49
Figura 34. Energía producida y consumida en un día medio de septiembre (con un consumo teórico de 14,5 h de funcionamiento del alumbrado, con la noche más larga del año como peor escenario).	50
Figura 35. Energía producida y consumida en el día medio de generación y cálculo de la transposición de toda la energía generada a las horas nocturnas de uso	55
Figura 36. Balance de energía neta disponible (generada vs. consumida) y aporte de energía suplementaria almacenada en baterías para un balance siempre positivo	55

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Escenario de evolución de las aportaciones de energías renovables en el mix de consumo de España. Fuente: Fundación de Energías Renovables (2014).....	11
Tabla 2. Cálculo del retorno de la inversión (ROI) de una instalación de arquitectura de comunicación de alumbrado público punto a punto de radiofrecuencia (RF) o comunicación por línea eléctrica (PLC) promedio, considerando 4300 horas/año ..	16
Tabla 3. Tiempo de descarga de la salida DC por debajo de 1 V DC de varios drivers LED en diferentes condiciones de trabajo	23
Tabla 4. Características de los equipos utilizados para el diseño del sistema de PVB	30
Tabla 5. Energía producida por los paneles fotovoltaicos en un día soleado de primavera en la localización del Ayto. de Cártama.Fuente: Elaboración propia (2021).....	32
Tabla 6. Generación de energía que resulta del sistema PVB en relación con los requerimientos de potencia de la instalación de iluminación (5 x 40 W).....	33
Tabla 7. Parámetros técnicos y coste de los equipos utilizados en el sistema generador Fuente: Elaboración propia (2022)	46
Tabla 8. Cálculo del ROI de la arquitectura de comunicación de conmutación de potencia de alumbrado público y eliminando la factura recurrente.....	52
Tabla 9. Ahorro económico en costes de capacidad de almacenamiento de energía para generadores ERT y FV equivalentes para instalaciones de alumbrado público	56
Tabla 10. Desarrollo de la instalación ERT para recuperar toda la energía reducida en la PRV de la red de agua estudiada	57

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Introducción al tema de estudio

Conforme a los datos de Naciones Unidas, el 50% de la población mundial vive en las ciudades, y las previsiones indican que a mitad del siglo XXI este porcentaje ascenderá al 70%. Esto conlleva una serie de flujos energéticos que sin duda alguna tendrá impactos ambientales y afectarán a la calidad de vida de sus ciudadanos (Sánchez de Madariaga & Benayas del Álamo, 2020).

Uno de los objetivos de desarrollo sostenible (ODS) planteados por Naciones Unidas es conseguir “Ciudades y Comunidades Sostenibles”. Además, el papel de las mismas será clave en la mitigación del Cambio Climático, tal y como se discutió en la Conferencia de las Partes (COP25) que realiza la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático donde se reúnen 196 países incluyendo a la Unión Europea.

La Unión Europea va encaminando sus políticas hacia una economía baja en carbono y hacia un consumo de energía local, no contaminante, sostenible y respetuoso con el medio ambiente (European Commission, 2019).

Esta Tesis Doctoral aúna esfuerzos en esa dirección, planteando diversas líneas de investigación en torno a las infraestructuras municipales, con el fin de lograr ciudades más sostenibles (Kuhlman & Farrington, 2010) y autosuficientes.

1.2 Motivación

De acuerdo con los datos publicados por la Agencia Internacional de la Energía (AIE), las ciudades consumen el 67% de la energía global (Energy Technology Perspectives, 2017). Si además estas necesidades energéticas se obtienen de las energías fósiles, provocan una disminución de la calidad del aire que respiramos y un aumento del calentamiento global del planeta.

En las dos últimas décadas se han sucedido los años más cálidos registrados hasta la fecha, con un más que previsible aumento de la temperatura del planeta que podría alcanzar los 5°C antes de finales de siglo (National Aeronautics and Space Administration, 2017). Todo esto conllevará a la intensificación de fenómenos meteorológicos extremos, disminuyendo la capacidad para producir alimentos y aumentando los costes para la economía de los distintos países.

Ya sabemos con certeza que la causa principal del cambio climático es la emisión de gases de efecto invernadero (GEI), provocado por el consumo de combustibles fósiles (Gaffney & Steffen, 2017), por lo que debemos orientar nuestros esfuerzos hacia una economía neutra en carbono. Para ello es imprescindible que el sistema energético actual evolucione hacia un modelo descarbonizado.

Las infraestructuras urbanas de los municipios (electricidad, agua, etc.) conllevan actualmente un consumo energético mayoritariamente de combustibles fósiles.

Además, los precios minoristas de la electricidad han aumentado de manera continuada durante los últimos años en muchos países: un 78% en España, un 52% en Alemania y un 48% en Reino Unido (Pena-Bello et al., 2019). De hecho, estamos viendo últimamente una situación muy convulsa del mercado eléctrico, con precios de la electricidad tan elevados, que están poniendo en dificultades al tejido industrial y empresarial.

Como podemos apreciar en la Figura 1, si comparamos el precio del Operador del Mercado Ibérico de Energía (OMIE) en el mes de diciembre ha cerrado en 239,34 €/MW.h, experimentando un aumento del 470,48% con respecto al mismo periodo de 2020.

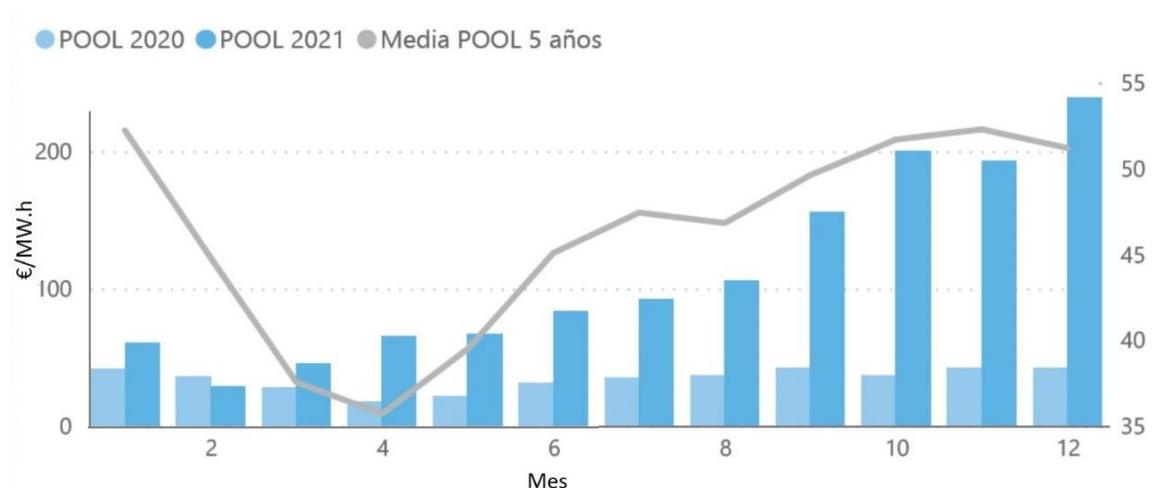


Figura 1. Evolución del precio de la electricidad POOL/OMIE
Fuente: Operador del Mercado Ibérico de Energía (2021)

A título de ejemplo en el Municipio de Madrid, los datos del año 2017 indican que un 80% de las importaciones de energía de los municipios correspondían a fuentes fósiles (un 15,5% a gas natural, un 64,6% a productos petrolíferos y un 18,8% a electricidad) (Pérez-Rodríguez & Lumbreras, 2020). Las fuentes energéticas propias sólo suponen un 3,1% de la energía consumida total. Esto nos indica la elevada dependencia energética exterior, es decir, necesitamos importar la mayor parte de la energía que utilizamos (menor grado de autoabastecimiento).

Desde mi posición como Ingeniero Municipal me planteé la siguiente pregunta: ¿cómo se puede implementar una mejora de la eficiencia de la energía que consumimos y además obtenerla partir de fuentes renovables a escala urbana en la Administración?

En mi opinión, la Administración Pública en todos sus niveles (estatal, autonómico y sobre todo local), debe ser catalizadora de un modelo energético descarbonizado.

Para ello debe incrementar la eficiencia energética en la generación y uso de la energía, y aumentar el uso de energía renovables, para alcanzar un modelo energético neutro en carbono en 2050, tal y como plantea la Unión Europea en su Pacto Verde Europeo.

1.3 Resumen del estado del arte

Tal y como se ha expuesto anteriormente, las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) deben reducirse drásticamente para evitar una crisis climática. El dióxido de carbono (CO₂) representa el 74% de los GEI. La mayor parte de emisiones de CO₂ provienen de combustibles fósiles, especialmente para la producción de electricidad y calor, transporte, industria y consumo.

Desde hace algunos años se están llevando a cabo "cumbres sobre el clima" en la que participan científicos, empresas y gobiernos, con el objetivo de debatir cuestiones medioambientales. La Conferencia de las Partes (COP) es la Cumbre Anual que realiza la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) donde se reúnen los 196 países más la Unión Europea que conforman a las Partes.

La primera Cumbre del Clima se realizó en Estocolmo en 1972. La última cumbre en la que se ha debatido sobre cambio climático, se celebró en Glasgow en 2021 (COP26).

En 1992 se reunió en Río de Janeiro representantes de todos los países del mundo para tratar temas relacionados con el medio ambiente, biodiversidad, cambio climático y desarrollo sostenible. Se denominó a este encuentro Cumbre de la Tierra, expresión utilizada para denominar las Conferencias de Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente y su Desarrollo (CNUCED).

El 11 de diciembre de 1997 fue adoptado el Protocolo de Kioto en Japón (entró en vigor el 16 de febrero de 2005). Es un protocolo de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), y un acuerdo internacional para reducir las emisiones de GEI. Se establecieron objetivos que vinculaban a la reducción de emisiones para 37 países y la Unión Europea. En el año 2009 ya fueron 187 los países que lo habían ratificado.

El Protocolo ha impulsado la creación de los bonos de carbono (Fundación Bioplanet París, 2015), que son un mecanismo internacional para reducir las emisiones de CO₂.

El compromiso de la Unión Europea con la reducción de sus emisiones de CO₂, conllevó a la Comisión Europea (CE) a lanzar el Pacto de los Alcaldes en 2008, como acción clave en la Estrategia de la Unión Europea de la adaptación al cambio climático, con el objetivo de apoyar a las autoridades locales para mitigar el cambio climático, y mejorar la eficiencia energética en entornos urbanos.

Los Ayuntamientos que firman este pacto, se comprometieron a desarrollar estrategias que permitan reducir sus emisiones a nivel municipal, en al menos un 20% para 2020.

La Unión Europea propone para el desarrollo del pacto una serie de hitos a seguir, que se estructuran en los pasos detallados en la Figura 2.



Figura 2. Esquema de los pasos para aplicación del Pacto de los Alcaldes
Fuente: Oficina de las Energías Renovables del Cabildo de Tenerife (2008)

El paso 2 de la corresponde a la elaboración de un documento que defina un Marco Estratégico para alcanzar los objetivos, denominándose Plan de Acción para la Energía Sostenible y el Clima.

Las ciudades adheridas al Pacto de Alcaldes tienen el compromiso de mejorar los objetivos establecidos por la Comisión Europea de reducción de emisiones de CO₂ mediante actuaciones de eficiencia energética y utilización de fuentes de energía renovables. Estas ciudades deben adaptar sus infraestructuras urbanas para la puesta en marcha del citado plan de acción.

En octubre de 2014, la UE aprueba el Marco de Clima y Energía para 2030. Según esta revisión, la UE deberá haber reducido en un 40% las emisiones de gases de efecto invernadero con respecto a 1990, a través de la mejora de la eficiencia energética y un mayor uso de fuentes de energía renovable.

Actualmente existen más de 100 ciudades (Red Española para el Desarrollo Sostenible, 2020) que obtienen la mayor parte de la energía eléctrica de fuentes renovables. En febrero de 2018, la *Disclosure Insight Action* (CDP) nombró al menos 40 ciudades que operan con electricidad 100% renovables, entre las que se destacan Burlington, Basilea y Reikiavik.

Burlington es la ciudad más grande del Estado de Vermont en los Estados Unidos, y obtiene su electricidad a partir de la energía eólica, solar, hidroeléctrica y biomasa; tiene su propia empresa de servicios públicos de propiedad municipal, y proporciona electricidad a la ciudad.

Reikiavik, capital de Islandia, obtiene toda su electricidad de la energía hidroeléctrica y la energía geotérmica. Sus objetivos para el año 2040 es que todos los automóviles y transporte público estén libre de combustibles fósiles.

Basilea, en Suiza, se alimenta con su propia empresa de suministro de energía eléctrica. Proviene el 90% de la energía hidroeléctrica y el 10% del viento.

Sin embargo, en nuestro país, según la Federación Española de Municipios y Provincias (FEMP) hay 655 municipios españoles adheridos al Pacto de Alcaldes. No obstante, en España existen 8.131 municipios, por lo que falta aún una mayor implicación de las Administraciones Locales.

El informe del año 2020 realizado por la Red Española para el Desarrollo Sostenible (REDS), presenta una panorámica de la situación y el avance del cumplimiento de la Agenda 2030 y sus 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS).

Este informe analiza a 103 ciudades españolas, donde se incluyen a capitales de provincia, las ciudades autónomas, las capitales administrativas de las ciudades autónomas, Mérida, Mijas, Fuengirola y todas las ciudades de más de 80.000 habitantes. Para ello se realizó una encuesta a responsables técnicos y políticos municipales y a personas expertas vinculados a la REDS. Los gobiernos locales juegan un papel muy importante en la implementación de la Agenda 2030. Sin embargo, presupuestos en manos de las Administraciones Locales rondan el 15% del presupuesto público total, por lo que es imposible afrontar los retos de los ODS.

En cuanto al grado de consecución de los 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible de las ciudades españolas podemos verlos en la Figura 3, en base a los indicadores agregados para estos objetivos.

INTRODUCCIÓN

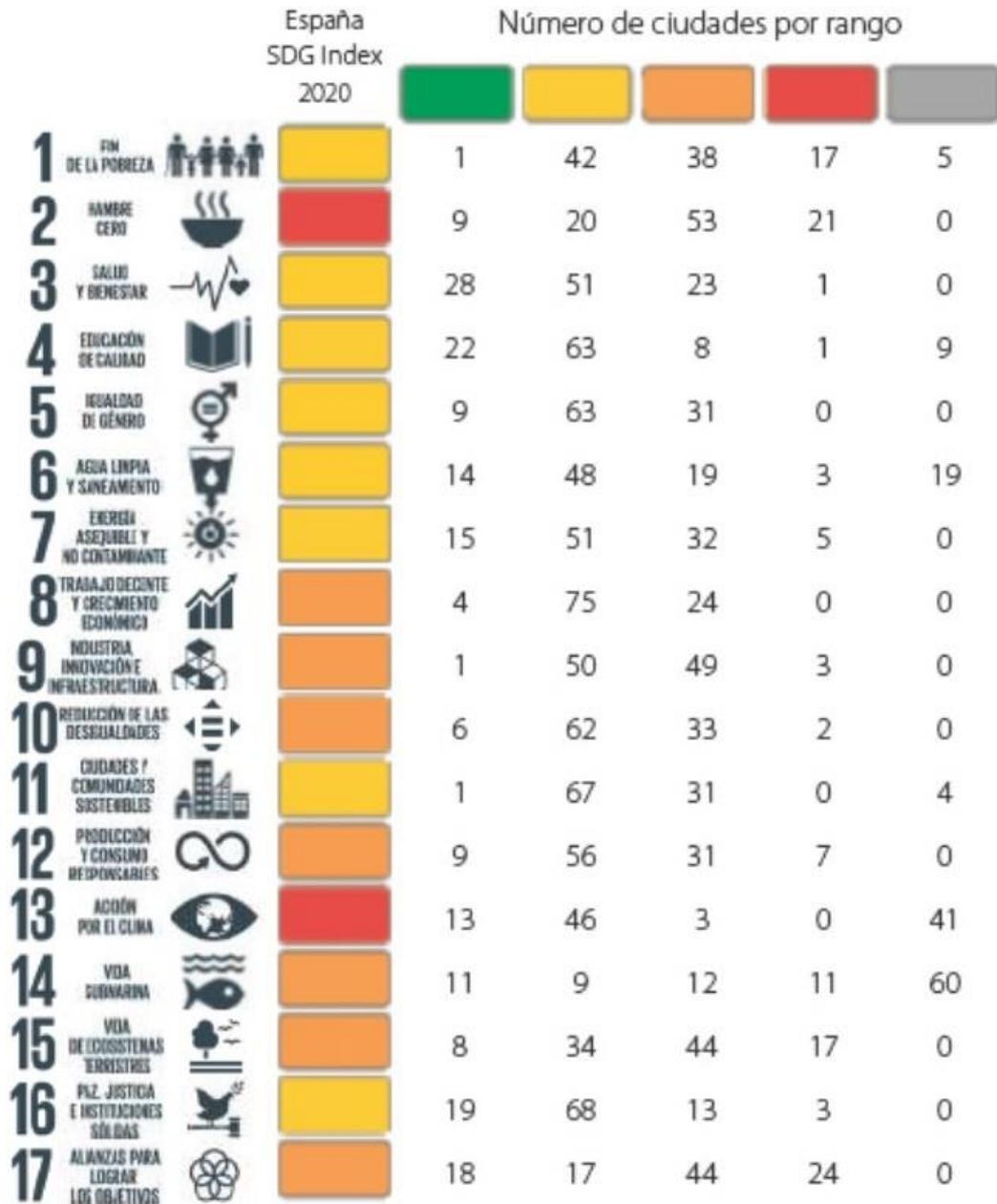


Figura 3. Número de ciudades españolas por ODS y rango

Fuente: Red Española para el Desarrollo Sostenible (Informe REDS. 2ª Edición. 2020)

Cómo podemos observar sólo existe una ciudad española con mayor de grado de cumplimiento en ODS 11.

Con respecto a la Comunidad Autónoma de Andalucía, es el Plan Andaluz de Acción por el Clima (PAAC) 2030, el que constituye el instrumento general de planificación de esta administración autonómica para la lucha contra el cambio climático. Los objetivos de este plan son:

- Reducir las emisiones de gases de efecto invernadero difusas en Andalucía un 39,0% con respecto al año 2005.

- Reducir el consumo de energía primaria como mínimo al 39,5%.
- Aportar a partir de fuentes de energía renovable al menos el 42% del consumo de energía final bruta.

La evolución de la potencia eléctrica instalada en Andalucía, año a año, se puede apreciar en la Figura 4.

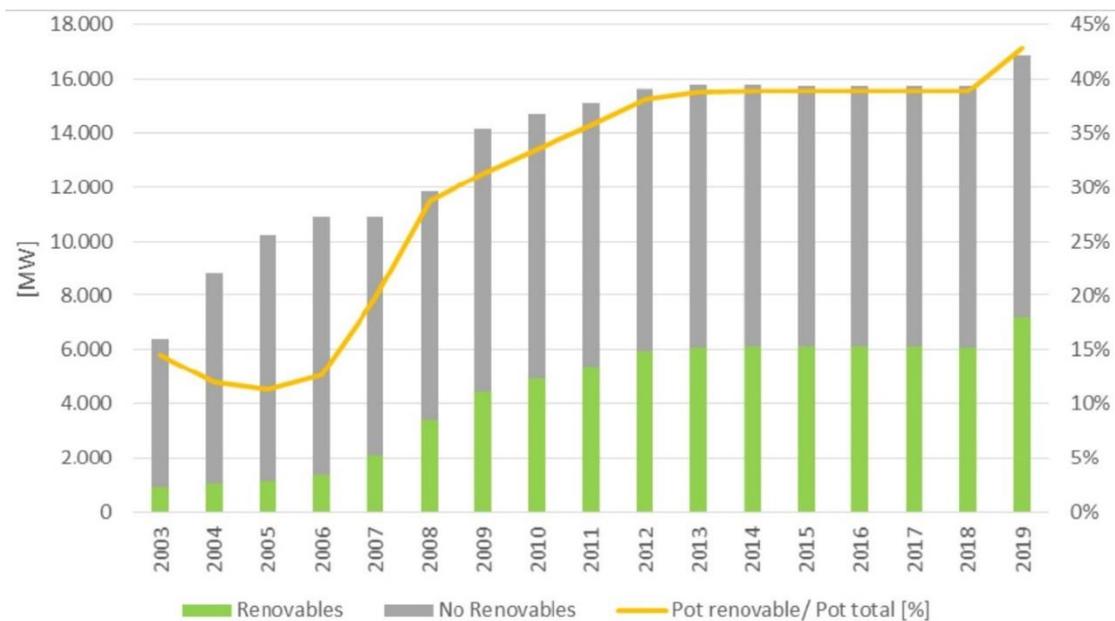


Figura 4. Evolución de la potencia eléctrica instalada en Andalucía
Fuente: Agencia Andaluza de la Energía (2020)

Por lo tanto, podemos concluir la situación actual como:

- Es determinante lograr un incremento de la eficiencia energética en las Administraciones Locales, que contribuya a lograr los objetivos marcados por la Comunidad Autónoma de Andalucía, y lograr Ciudades Sostenibles.
- Es necesario dotar de partidas presupuestarias a los Ayuntamientos, para lograr un frente común en la implantación de fuentes de energías renovables, y lograr reducir el consumo de energía eléctrica de combustibles fósiles.
- Es necesario mejorar las infraestructuras eléctricas al fin de posibilitar un aprovechamiento óptimo del elevado potencial renovable autóctono disponible, sobre todo la energía fotovoltaica.
- Aún estamos lejos de conseguir que nuestras ciudades operen con electricidad provenientes de fuentes 100% renovables.

En la línea de investigación de esta tesis tenemos la propuesta inicial (de septiembre 2021) de la Estrategia Energética de Andalucía 2030 (Agencia Andaluza de la Energía).

1.4 Planteamiento y determinación del problema a investigar

Como sabemos el efecto invernadero consiste en la retención de la energía radiante del Sol en la atmósfera de la Tierra por parte de los gases de efecto invernadero (dióxido de carbono, óxido nitroso, el metano, etc.) existentes en la atmósfera. Los combustibles fósiles son responsables de aproximadamente el 75% de las emisiones de CO₂.

El análisis del apartado anterior ha puesto en evidencia la necesidad de promover en las Administraciones Locales la transición gradual para conseguir ciudades que operen con electricidad 100% renovables, para abandonar los combustibles fósiles y promover una transición gradual hacia una economía neutra en carbono.

Este planteamiento tiene dos campos diferentes donde debemos actuar. Por un lado, tenemos el campo político, donde cómo hemos manifestado anteriormente, es necesario hacer un frente común entre todos los municipios, para que se destine mayor presupuesto a las actuaciones energéticas a nivel local. Sin esta acción, no será posible lograr una economía neutra en carbono. Por otro lado, tenemos el campo técnico, donde los distintos actores trabajan en la Administración debemos proponer, proyectar y ejecutar las estrategias dirigidas a la sustitución de los combustibles fósiles por fuentes de energías renovables en la demanda eléctrica.

La sostenibilidad y los precios de la energía hacen necesario para las autoridades municipales el uso de energía de fuentes renovables a escala urbana y para instalaciones locales aisladas. Podemos apreciar en la Figura 5 la evolución de la producción de electricidad renovable en Andalucía, donde la energía eólica, biomasa e hidráulica ha permanecido prácticamente constante, con un ligero aumento de la energía fotovoltaica y ligeras variaciones de la energía termosolar. En términos relativos la producción de la energía hidráulica es muy inferior al resto de energías.

Por lo tanto, se ha planteado centrar la investigación en mejorar las instalaciones de alumbrado público, que requieren de media el 40% del presupuesto de los pequeños municipios.

Otra línea que se plantea es conseguir que los edificios municipales avancen hacia el autoconsumo que permitan incrementar el nivel de autosuficiencia.

Por último, se estudiará mecanismos con los que obtener electricidad a partir de fuentes de carácter renovable vinculadas a otros espacios e infraestructuras municipales.

El consumo de electricidad del citado municipio presenta distribución de uso de la energía que se muestra en la Figura 6.

Para ello se han realizado tres estudios experimentales, relacionados cada uno de ellos con los tres sectores de consumo eléctrico de un municipio de mayor relevancia.

INTRODUCCIÓN

Uno de ellos de mejora de la eficiencia energética en las instalaciones de alumbrado público, otro de ellos mejorar la eficiencia en el uso de la energía fotovoltaica en edificios; y un tercer escenario la obtención de electricidad mediante las redes de suministro de agua potable y su uso eficiente por proximidad a instalaciones y por periodo de generación. Son actuaciones novedosas (Howard et al., 2008) e innovadoras (Baregheh et al., 2009).

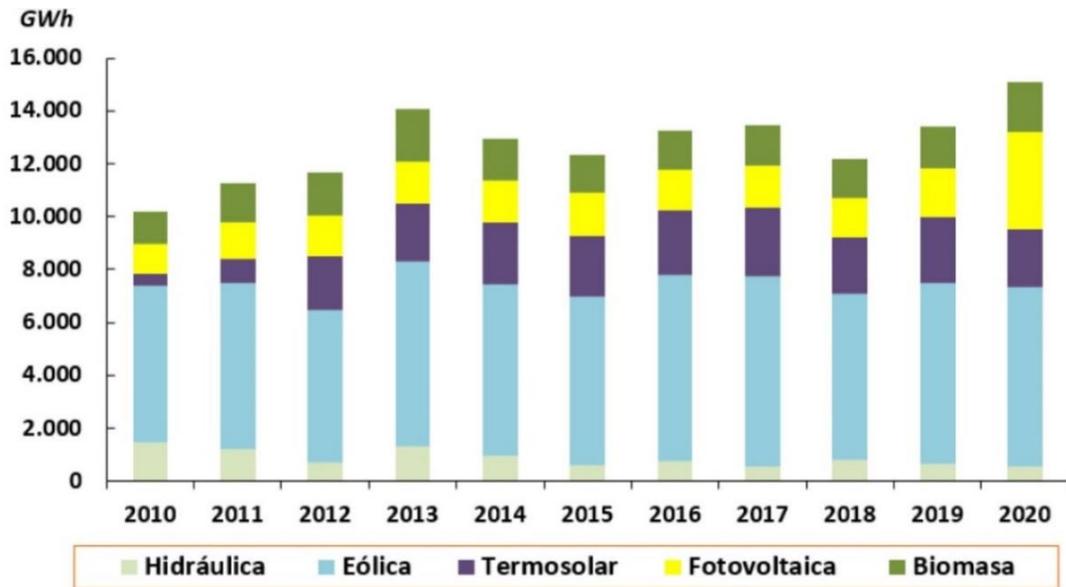


Figura 5. Evolución de la producción de electricidad renovable
Fuente: Agencia Andaluza de la Energía (2021)

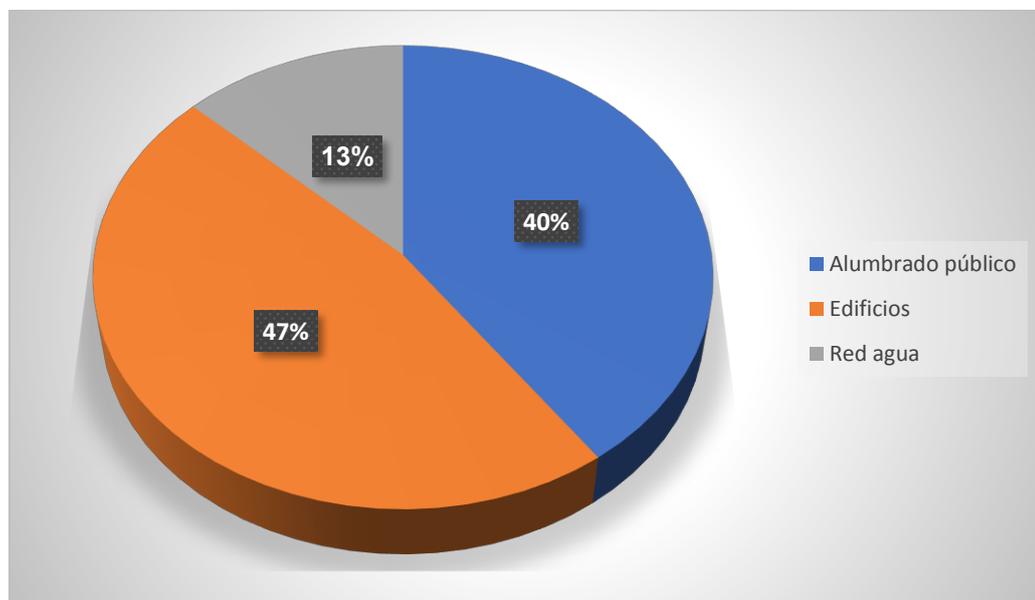


Figura 6. Reparto del consumo de energía eléctrica en el Ayuntamiento de Cártama
Fuente: Elaboración propia (2021)

2. OBJETIVOS DE LA TESIS

El objetivo primordial de esta tesis se enmarca en la investigación sobre posibles líneas de actuación con las que mejorar de la eficiencia y autosuficiencia energética y obtención de electricidad mediante energías renovables en las infraestructuras municipales, para lograr municipios que operen con electricidad 100% renovables. Este objetivo se enmarca dentro del Compromiso de Emisiones Cero (de CO₂) para el 2050 en la ciudad (Hoja de Ruta 2050 de la Unión Europea para una UE descarbonizada). Ver Figura 7.

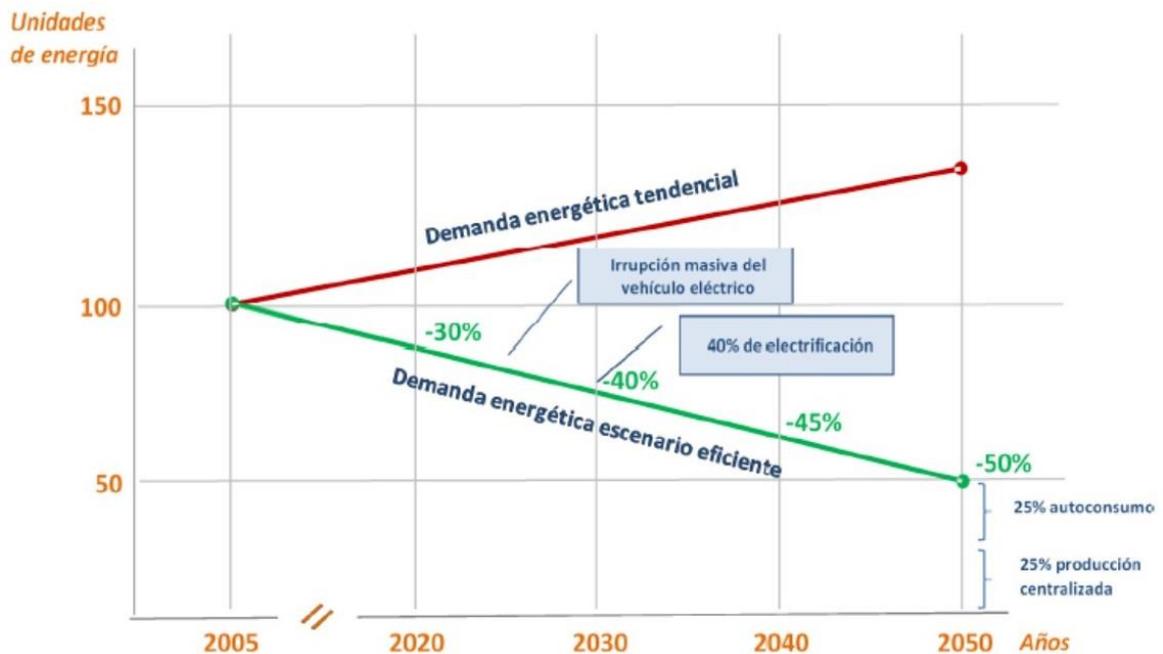


Figura 7. Escenarios de la evolución de la demanda energética al 2050

Fuente: Fundación de Energías Renovables (2014)

Para conseguir estos objetivos a nivel de Administración Local, tenemos que implantar una estructura energética que recorra los siguientes hitos (Renovables, 2014) (Ver Tabla 1):

1. Renovación de las tecnologías del alumbrado público, con mejoras de la eficiencia energética de al menos el 60%.
2. Plan de rehabilitación de los edificios públicos, con una reducción de la demanda de energía del 50%.
3. Origen de la energía eléctrica 100% provenientes de fuentes renovables.

Una vez que hemos definido el objetivo de la tesis, resulta necesario definir las cuestiones clave en la que vamos a centrar nuestra investigación, por lo que se propone el estudio de tres actuaciones, cada una relacionada con los tres hitos descritos anteriormente, y que nos permitan evaluar y analizar las posibilidades reales de ahorro energético y económico, así como la implantación de energías renovables en las infraestructuras municipales.

Tabla 1. Escenario de evolución de las aportaciones de energías renovables en el mix de consumo de España. Fuente: Fundación de Energías Renovables (2014)

Año	Reducción emisiones %	Mejora de la eficiencia energética %	Reducción de la demanda de energía %	Aportación Energías Renovables %
2020	30	30	20	30
2030	55	45	40	50
2040	80	55	45	80
2050	Emisiones Cero	60	50	100

3. METODOLOGÍA

3.1 Hipótesis de partida.

Actualmente la mayor parte de la energía eléctrica que se consumen en los municipios provienen de combustibles fósiles. Para cambiar esta tendencia energética, se plantea la idea de modificar la estructura energética de los municipios, mediante las siguientes hipótesis de partida, aplicadas a las infraestructuras urbanas:

- Mejora de la eficiencia energética.
- Reducción de la demanda energética.
- Aportación de energías renovables.

3.2 Metodología aplicada.

Para el desarrollo de la presente tesis hemos seguido una metodología de generación de hipótesis de partida y verificación mediante experimentación en entornos reales, basada en el desarrollo de tres líneas de investigación de naturaleza aplicada. Para ello, nos hemos apoyado en las infraestructuras del municipio de Cártama, que se ha utilizado como un laboratorio para llevar a cabo los ensayos. Los trabajos desarrollados siguen un hilo conductor, encaminados a reducir el consumo energético del municipio, mejorando la eficiencia de uso y, en los casos posibles, obteniendo energía eléctrica renovable en tres bloques diferenciados:

- I. Alumbrado público.
- II. Edificios municipales.
- III. Red de abastecimiento de agua.

En cada línea de investigación se han realizado las hipótesis de partida los cálculos teóricos para el dimensionamiento de la instalación. Posteriormente se han montado dichas instalaciones en campo, en las propias infraestructuras, sin alterar su explotación. Para cada uno de ellos se ha realizado la monitorización de las distintas variables eléctricas y energéticas, se han obtenido los puntos fuertes y débiles del sistema. Finalmente se han propuesto los resultados y mejoras para cada una de las actuaciones.

Estos experimentos han concluido con las siguientes publicaciones:

- 1- **Article:** Analysis of the viability of street light programming using commutation cycles in the power line.

Journals: *Sustainability* **2018**, 10, 4043; doi:10.3390/su10114043

Science Citation Index Expanded (SCIE) - ENVIRONMENTAL SCIENCES

JCR category rank [2018]: Q2 (105/251)

Impact Factor [2018]: 2.592

Nº Citas: Web of Science 4 - Google Académico: 9

- 2- **Article:** Adaptation of an insulated centralized photovoltaic outdoor lighting installation with electronic control system to improve service guarantee in tropical latitudes.

Journals: *Sustainability* **2021**, 13, 1925; doi.org/10.3390/su13041925

Science Citation Index Expanded (SCIE) - ENVIRONMENTAL SCIENCES

JCR category rank [2020]: Q2 (124/274)

Impact Factor [2020]: 3.251

Nº Citas: SCOPUS 2 - Google Académico: 2

- 3- **Article:** Experimental installation of outdoor public lighting powered by a hydraulic turbine installed in the municipal water supply network.

Journals: *Water* **2022**, 14, 21; doi.org/10.3390/w14010021

Science Citation Index Expanded (SCIE) – WATER RESOURCES

JCR category rank [2020]: Q2 (39/98)

Impact Factor [2020]: 3.103

Nº Citas: 0

Conforme a los criterios de la Agencia Nacional de Evaluación de la Calidad y Acreditación (ANECA) sobre publicaciones, la suma de las puntuaciones de éstas es:

- Publicaciones en el campo de Ingeniería y Arquitectura: para obtener la puntuación de 0,75 puntos de cada publicación, se requiere esté publicada en una revista situada en el segundo tercio del listado de su especialidad en el Science Citation Index.

En nuestro caso tenemos: 3 artículos x 0,75 puntos/artículos = 2,25 puntos

Los artículos generados se reproducen, tal y como se han publicado, en el apartado 9 de este documento.

Asimismo, en el siguiente apartado se hace un resumen de los principales aspectos de cada investigación, donde cada publicación desarrolla una actuación para mejorar la eficiencia energética en los municipios, objetivo de esta tesis doctoral.

4. EXPOSICIÓN DE LA INVESTIGACIÓN REALIZADA

4.1 Investigación 1: Mejora de la eficiencia energética en la red de alumbrado público basada en la conmutación de pulsos de línea eléctrica.

Actualmente, los sistemas de control de las instalaciones de iluminación se utilizan, entre otras funcionalidades, para mejorar la eficiencia energética y configurar diferentes potencias lumínicas de las luminarias según requerimientos puntuales. Esto permite aumentar la eficiencia energética adaptando la instalación a las necesidades ambientales. Sin embargo, los sistemas de control actuales están orientados principalmente a arquitecturas punto a punto, que en la mayoría de los casos son complejas y costosas de implantar, sobre todo en municipios menores de 5000 habitantes (6826 municipios en España). Como alternativa, presentamos el análisis de viabilidad de una arquitectura de control sostenible de las instalaciones de iluminación para mejorar dichos inconvenientes.

Este sistema de control utiliza una técnica de comunicación basada en secuencias controladas de encendido/apagado en la línea de alimentación de las luminarias para configurar diferentes horarios de perfiles de regulación.

Cabe destacar la importancia del tema, ya que el pasado día 02/03/2022 el Gobierno ha comprometido dedicar 100 millones de euros de los fondos *Next Generation* para fomentar la eficiencia energética del alumbrado público.

Se estima que los costes anuales de energía eléctrica relacionados con el alumbrado público alcancen entre \$ 23,9 mil millones y \$ 42,5 mil millones para 2025 (Sedziwy, 2016). Cada punto de alumbrado público es responsable de generar entre 330 y 1500 kg de CO₂ cada año, según informe de 2014 realizado por investigadores de mercado de la consultora Northeast Group (Northeast Group, 2015). Hoy en día las instalaciones de alumbrado público requieren de media, entre el 40% de su presupuesto en los municipios pequeños (Ozadowicz & Grela, 2017), y el 12% en las grandes ciudades europeas (Wojnicki et al., 2016).

Varios estudios indican que el potencial de ahorro que se puede lograr con la modernización de estas instalaciones está por encima del 30%, si se instalan tecnologías de investigación más eficientes (Valentová et al., 2015). También se requiere que se instalen e implementen sistemas de regulación y control dentro de ellos (Beccali et al., 2015).

En la actualidad el sector de la iluminación se encuentra inmerso en un proceso de digitalización que está cambiando todos los fundamentos de la industria. Las nuevas tecnologías de emisión de luz permiten luminarias más eficientes y una mejora significativa en su capacidad de gestión, regulación y supervisión (Gutiérrez-Escolar et al., 2015).

Los esfuerzos de investigación para interconectar una unidad de control con las luminarias de una instalación se han centrado en el desarrollo de interfaces

electrónicas o pasarelas junto con capas de hardware (buses de datos). El objetivo es regular, de forma dinámica, el flujo luminoso de las luminarias y adaptar la luminancia/iluminancia obtenida a las necesidades específicas de las vías. Un sistema puede funcionar utilizando perfiles de evolución de atenuación como se especifica, por ejemplo, en la norma EN 13201-1:2014. Esto indica que se puede aplicar una variación significativa de los valores de los parámetros en diferentes periodos de la noche, lo que reduce los niveles de iluminación, y por consiguiente el consumo de energía. El uso de esta metodología genera ahorros superiores al 50% en comparación con el consumo eléctrico de una instalación equivalente sin sistema de regulación (Jagerbrand, 2016).

Se han impuesto tres sistemas de comunicación en el mercado del equipo de iluminación: buses digitales cableados, comunicaciones digitales específicas (es decir, DALI), transceptores de comunicación de línea de potencia (PLC) y sistemas de comunicaciones inalámbricas en el rango de radiofrecuencia (RF). Pueden provocar un proceso de atenuación en las luminarias, pero también pueden encargarse de las tareas de supervisión y recolección de información, como sus parámetros de consumo exactos o alarmas de funcionamiento (Mahoor et al., 2017).

Todas estas arquitecturas analizadas permiten comunicaciones bidireccionales que optimizan su funcionalidad. Sin embargo, requieren de:

- Módulos de hardware específicos complejos que actúan como transceptores de comunicación que adaptan las señales a la capa física y los protocolos de transmisión de datos (Daely et al., 2017).
- Sistemas de monitoreo y control remotos que incluyen, al menos, un servidor de servicios de fondo para ejecutar software de control y múltiples controladores de medio plazo descentralizados en los paneles eléctricos de la instalación de iluminación (Kovacs et al., 2016).

Todos estos equipos implican un aumento significativo del costo final de la instalación (es decir, la adaptación de los dispositivos de adaptación de señales grandes de los paneles eléctricos como en las arquitecturas de PLC). Aunque estos sistemas de gestión de alumbrado público contribuyen a la reducción del consumo de energía, los costos de instalación globales tienen períodos de retorno de la inversión (ROI) de, al menos, 6,5 años que reemplazan las luminarias conectadas a la red o 5 años que utilizan luminarias con energía solar.

Si solo consideramos los costos de la arquitectura de comunicación, hay dos componentes básicos: hardware (transceptor de comunicación y unidades de control para luminarias, centralitas de comunicaciones, medidores de consumo, interfaces de potencia, módems, servidores web ...) y costos recurrentes (comunicaciones M2M, Alojamiento web y configuración de software, mantenimiento y actualizaciones). Según la información proporcionada por varios de los fabricantes anteriores, suponiendo una instalación de 50 luminarias y 1 marco de panel eléctrico, la inversión

EXPOSICIÓN DE LA INVESTIGACIÓN REALIZADA

para el hardware de RF o PLC es, aproximadamente, 60,00 € / luminaria (considerando todos los requisitos de hardware) y 180,00 € / panel eléctrico y año.

En un escenario adecuado, los ahorros significativos provienen de la reducción del consumo eléctrico y de la prolongación de la vida útil de la luminaria. Sin embargo, el ROI calculado alcanza un valor de 13,3 años, tal y como ver en la Tabla 2.

Tabla 2. Cálculo del retorno de la inversión (ROI) de una instalación de arquitectura de comunicación de alumbrado público punto a punto de radiofrecuencia (RF) o comunicación por línea eléctrica (PLC) promedio, considerando 4300 horas/año
Fuente: Elaboración propia (2018)

Reducción del consumo eléctrico		Prolongación de la esperanza de vida	
Potencia de luminaria (≈150W equivalente a bombilla VSAP)	50 W	Costo aproximado de: Driver + LED PCB + Instalación	125,00 €/luminaria
Precio de la electricidad	0,11 €/kWh	Esperanza de vida	100.000h 23 años sin regulación
Horas de trabajo equivalentes a través de la regulación	3.100 h/año		(1- (3.100h/año) / (4.300h/año)) x 125,00 €/luminaria =
AHORROS	$((4.300h - 3.100h) \times 50W \times 0,11€/kWh) / 1.000 =$	AHORROS	= 34,88 € y 23 años →
	6,60 €/año y luminaria		1,51 €/año y luminaria
AHORROS TOTALES		6,60 + 1,51 = 8,11 €/año y luminaria	
ROI		60,00 € per luminaria / (8,11 €/año pc	
Costo hardware / (Ahorros + Costos recurrentes)		luminaria – 180,00 €/año / 50 luminaria	13,3 años

Estos costos adicionales y los grandes retornos de la inversión llevaron al desarrollo de controladores programados autorreguladores para obtener ahorros de energía equivalentes operando de manera autónoma siguiendo un perfil de atenuación proporcional adaptativo cargado en el proceso de fabricación de la luminaria. Estos son controladores más complicados y costosos que los modelos normales, pero la solución general es más asequible y la inversión requerida es más sostenible. Así, la medición de segmentos de tiempo se ha convertido en un estándar en el mercado de drivers y controladores para luminarias LED (Winder, 2017).

Esta solución encuentra un gran inconveniente. Un solo perfil de regulación configura una estructura rígida que difícilmente ofrece un funcionamiento óptimo para las diferentes estaciones. Sólo se pueden realizar ligeras regulaciones reconfigurando el ajuste de los interruptores temporizadores astronómicos o los niveles de referencia de los sensores crepusculares que se utilizan para reducir el uso de la instalación durante la noche. Por tanto, es difícil encontrar un perfil único optimizado adecuado para todas las estaciones o para eventos especiales, como festividades, en los que se requiere la máxima iluminación durante toda la noche.

Por lo tanto, se estudia una alternativa para gestionar diferentes configuraciones de programas en una instalación de iluminación basada en la conmutación de pulsos de línea eléctrica. Pretende aumentar la flexibilidad con un período de ROI reducido en

comparación con el detallado para arquitecturas punto a punto. El objetivo es permitir el uso de diferentes perfiles de regulación lumínica.

La arquitectura de control es sencilla. La Figura 8 muestra diferentes rutinas de atenuación de trabajo que cumplen con los requisitos de diferentes estaciones del año o eventos especiales que pueden requerir diferentes modos de trabajo adaptativos. Cada punto de ignición está establecido por un sistema automatizado para que coincida con precisión con el anochecer. Los períodos de requisitos máximos de luz al principio (atardecer) y al final (amanecer) de la noche se indican con un fondo diferente al segmento de la medianoche en el que se desea atenuar.

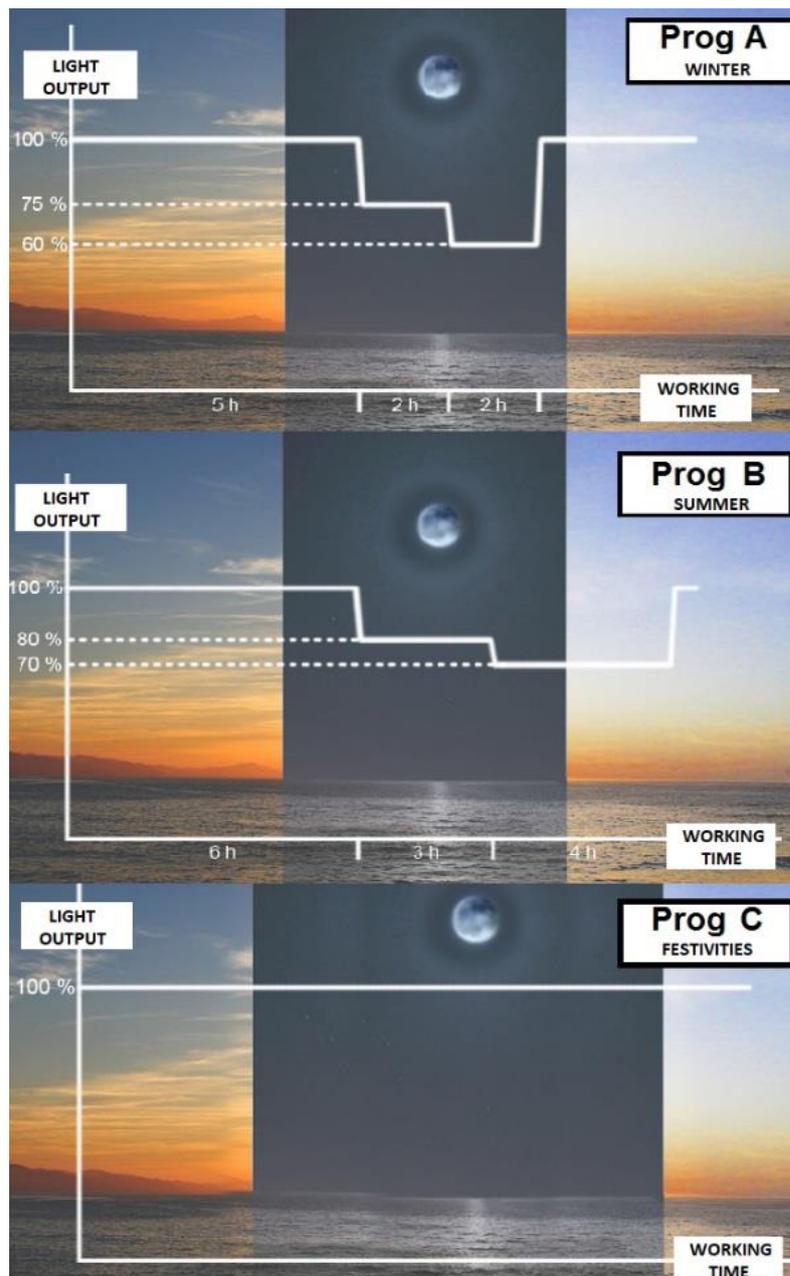


Figura 8. Diagrama de funcionamiento para diferentes épocas del año.
Fuente: Elaboración propia (2018)

La infraestructura mínima básica en toda instalación de alumbrado público, tal como se presenta en la Figura 9, es la capacidad de maniobra (OFF/ON) de las líneas eléctricas a través de contactores instalados en sus tableros eléctricos. Esto, junto con un controlador regulable no programable (sistema estandarizado 0-10 V) y un microcontrolador que incluye periféricos de temporizador, tiene la capacidad de generar señales de control de modulación de ancho de pulso (PWM) y, con cierta capacidad de memoria digital para el almacenamiento de datos, es suficiente para cumplir con nuestros requisitos para generar una instalación de iluminación configurable por pulsos de potencia. Así, es posible utilizar la capacidad de contar el tiempo, no solo para establecer diferentes perfiles de regulación de trabajo, sino también para poder interpretar pequeños ciclos de encendido como paquetes de información transmitidos a través de la línea eléctrica.

De esta forma, un ciclo de encendido “OFF/ON/OFF” en una línea de luminarias por un tiempo breve pero controlado, permite enviar información a estos dispositivos siempre que el emisor (responsable del control) y el receptor (las luminarias) tienen establecido un enfoque común que relaciona unívocamente la duración del pulso con información específica.

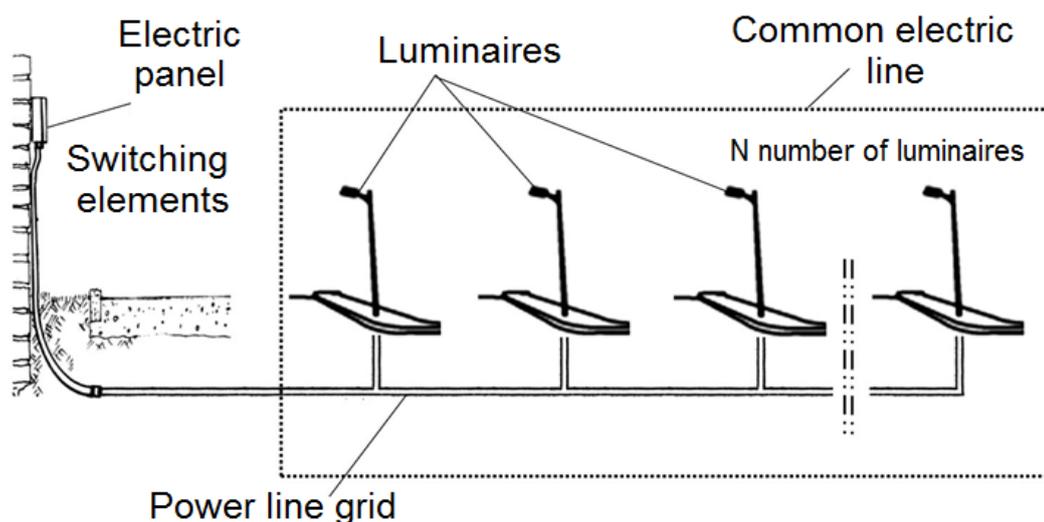


Figura 9. Esquema básico de alimentación para un conjunto de luminarias instaladas en la vía pública. Fuente: Elaboración propia (2018)

Se trata, por tanto, de un sistema básico de comunicaciones unidireccionales que no incluye ningún hardware adicional a la instalación eléctrica mínima legal para alumbrado público y una CPU electrónica básica. La información básica enviada a las lámparas podrá utilizarse para seleccionar una determinada secuencia de encendido de un conjunto pre programado que deberá utilizarse a partir de ahora en todos sus ciclos de funcionamiento hasta que sea cambiada de nuevo por este mismo sistema. En este caso, el elemento que porta la información es el intervalo de tiempo de un ciclo de encendido activo dedicado que elige una programación activa de un conjunto previamente incorporado en las luminarias. Estos programas se almacenan en la memoria no volátil de cada sistema de control electrónico de los equipos emisores.

Este sistema requiere una cantidad mínima de componentes (todos ellos con una gran expectativa de vida) y aprovecha los componentes obligatorios de este tipo de instalaciones de iluminación, como son los contactores, instalados en los cuadros eléctricos.

El proceso de conmutación de la línea de alimentación de las luminarias se puede realizar de forma manual o mediante una unidad de control instalada en el cuadro eléctrico. Esta unidad de control tendría la capacidad de accionar los contactores de potencia de cada una de las líneas eléctricas controladas por esta unidad. Estos equipos de control pueden ser controlados remotamente desde una aplicación de software de la misma forma que las arquitecturas punto a punto.

La Figura 10 muestra el esquema de la instalación de iluminación de referencia propuesta. El conjunto de módulos requeridos incluye:

- Cuadro eléctrico de mando con elementos de conmutación para una o varias líneas de alimentación. Permiten encender y apagar las luminarias de forma controlada y precisa a través de una unidad CPU telecontrolada o por un operador que activa y desactiva manualmente los interruptores.
- Un conjunto de luminarias conectadas. Cada uno de ellos debe integrar en cada uno de ellos una unidad de control electrónico que ha de decodificar correctamente los ciclos de potencia y toma el control sobre el puerto de regulación de un driver no programable. Nuestra implementación de prueba incluye:
 - 1 microcontrolador de muy bajo consumo: Modelo MSP430F2001 del fabricante Texas Instruments. Sistema programable en ensamblador para minimizar la necesidad de recursos del sistema para la tarea requerida.
 - 1 amplificador operacional (LM258/Texas Instruments) con una entrada PWM filtrada con un circuito RC para generar una señal analógica equivalente de amplitud máxima de 3,3 V en la entrada positiva del amplificador y una retroalimentación de la señal de salida del sistema a través de la entrada negativa para poder generar una ganancia de 3:1 de la entrada en el pin positivo, dando lugar a un valor máximo de 10V ajustado perfectamente al sistema de control analógico 0-10V.
 - 2 reguladores de voltaje lineales (L78L12AB y L78L33AB) para obtener establecer 12V_{DC} y 3.3V_{DC} desde la salida del controlador de la luminaria.
 - Varios componentes RC (condensador de cerámica y resistencias de película delgada) para generar los circuitos de señal de reinicio, entrada y retroalimentación necesarios.

El sistema completo está desarrollado con 13 componentes donde 9 de ellos son componentes RC como se detalla en la Figura 11.

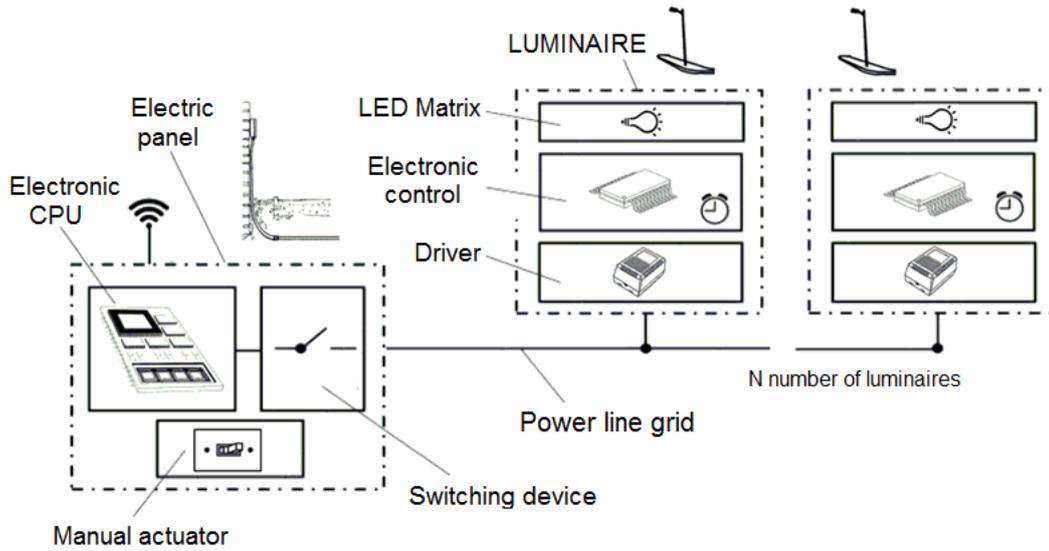


Figura 10. Diagrama de bloques para el modelo de configuración propuesto
Fuente: Elaboración propia (2018)

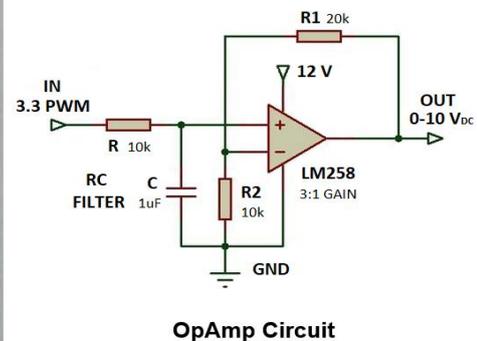
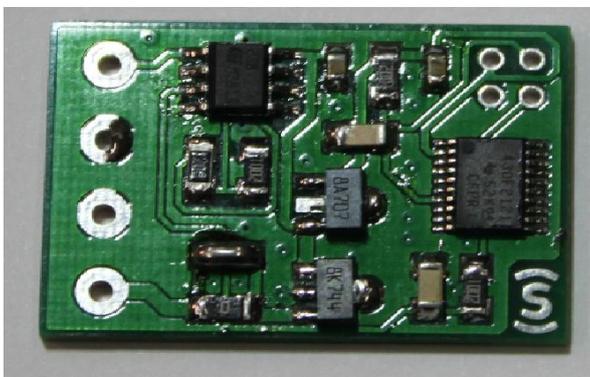
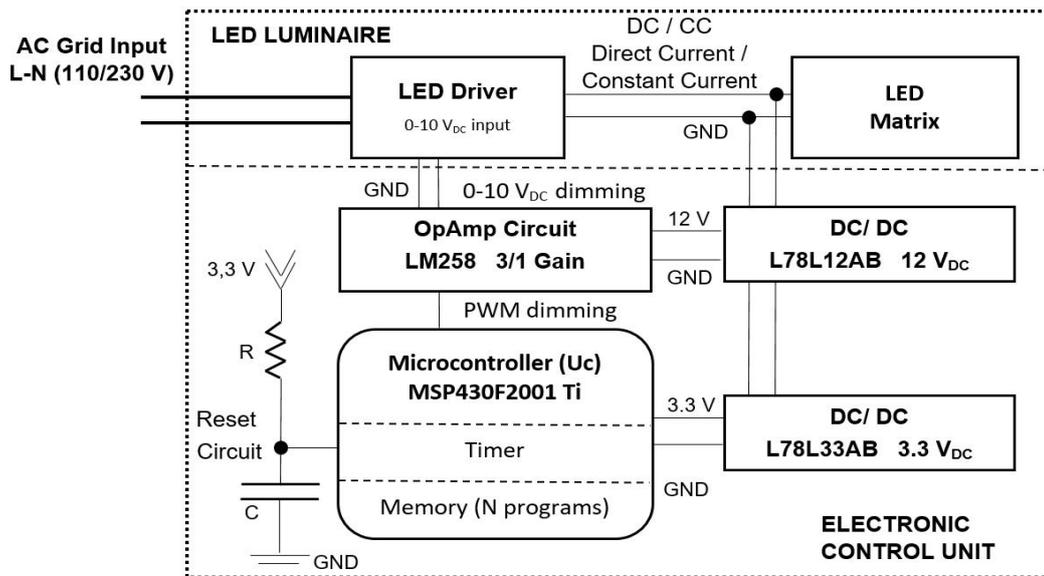


Figura 11. Esquema electrónico del sistema de regulación y control instalado en cada luminaria y propuesta de implementación
Fuente: Elaboración propia (2018)

Este circuito electrónico se puede conectar a cualquier controlador de LED regulable mediante 4 cables: 2 entradas para la salida de alimentación de CC del controlador ($V_{CC} + GND$) y 2 salidas para el control de atenuación ($0-10 V_{CC} + GND$). Las dos líneas de CC son redundantes ya que conducen al mismo punto de voltaje.

En una implementación básica de control, se pueden establecer diferentes segmentos de lapso de tiempo para que cada uno de ellos codifique un perfil de atenuación diferente. Si dentro de uno de ellos se corta el pulso de alimentación de entrada AC, el sistema asignará el estado correspondiente como nuevo programa de visualización para los siguientes ciclos de trabajo. Este perfil se mantiene hasta que se selecciona otro programa con este mismo protocolo.

Para probar el sistema se ha desplegado una instalación real en un cuadro eléctrico de una instalación de alumbrado público en un pequeño municipio (población: 2.900) del sur de España. Da servicio a un segmento de 6 calles en las afueras del pueblo con 3 líneas de salida con una sección de cable de distribución de 6 mm^2 para una longitud total de 470 m (línea 1: 145 m; línea 2: 160 m y línea 3: 165 m). En cada una de estas líneas eléctricas se instalan 4 unidades de luminarias LED de alumbrado público de 80W y 5 luminarias de similares características, pero con 35W; todos ellos son idénticos dentro de su propio rango de potencia y lleva instalado un driver básico 0-10V y el circuito eléctrico de control descrito. Cada línea tiene su propio contactor para el control de maniobras y se instala un medidor de potencia digital ABB B23 de 3 fases de precisión Clase 1 Serie B como se muestra en la Figura 12.

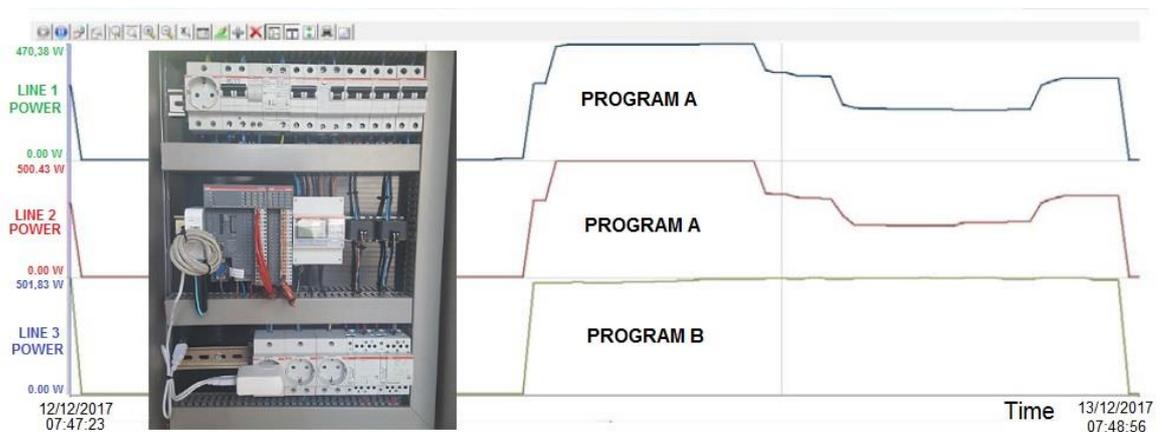


Figura 12. Esquema electrónico del sistema de regulación y secuencia de consumo en cada línea del cuadro eléctrico en base a diferentes programaciones.

Fuente: Elaboración propia (2018)

Una dificultad que nos hemos encontrado en este diseño ha sido el tiempo de duración de la transición de potencia “OFF-ON-OFF” lleva la información a transmitir a todas las luminarias de una misma línea eléctrica. Esta longitud no puede ser demasiado corta, de modo que no sea posible confundirla con un fallo o un inicio defectuoso, o demasiado larga, generando un proceso de programación inconvenientemente lento.

Para resolver el primer requisito, establecemos que el pulso mínimo reconocible para transmitir información no puede ser inferior a 10s. Para el segundo requisito, gracias

a la rápida acción de los contactores eléctricos que pueden desconectar una línea eléctrica en pocos milisegundos, se desea que el rango de longitudes de los segmentos de tiempo utilizados para codificar los datos sea lo más corto posible.

Los condensadores de estabilización de la salida DC de los drivers LED provocan que la eliminación completa de la tensión de salida DC/CC no sea instantánea ya que la entrada AC está desconectada. La señal de alimentación DC disminuye exponencialmente y toma un tiempo antes de que baje de un valor que el procesador es capaz de detectar (generando una interrupción de reinicio con una entrada de alimentación inferior a $1 V_{DC}$) sin utilizar ningún complejo adicional, ineficiente o costoso hardware.

Este tiempo de descarga es significativamente alto y no es constante para diferentes modelos de controladores; el proceso varía desde unos pocos segundos hasta sobrepasar en gran medida una docena de ellos. Las dos variables principales de las que depende este tiempo son la potencia nominal del controlador y la carga a la que está operando en el momento del apagado.

Con el fin de establecer rangos mínimos de segmentos de tiempo adecuados, hemos probado y analizado el comportamiento de 11 controladores comerciales con capacidad de atenuación (0-10 V_{DC}) de los 3 principales fabricantes con diferentes salidas de potencia y en tres modos de trabajo: 100%, 75% y 50% de su carga nominal. Se conectaron matrices LED adecuadas a cada corriente de salida deseada y consumo de energía con disipadores de aluminio a los diferentes drivers probados y luego se alimentaron con 230 V_{AC} .

Después de 5 minutos, se atenuaron a cada estado de prueba requerido y se dejaron otros 5 minutos para alcanzar condiciones de carga estables. Posteriormente se apagaron y se registraron las rampas de descarga con un Osciloscopio Tektronix TDS 1002.

Todas las medidas obtenidas se detallan en la Tabla 3. Asimismo, se adjuntan dos ejemplos diferentes de sus curvas de descarga de apagado en la Figura 13.

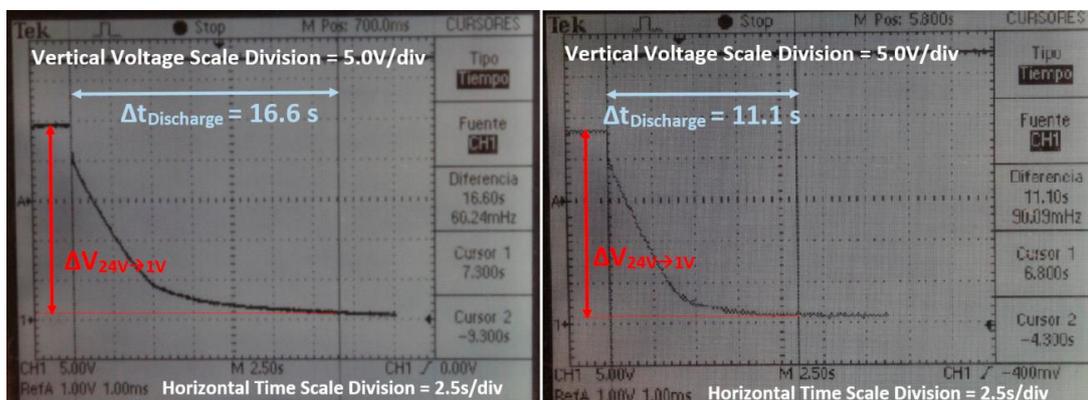


Figura 13. Curvas de descarga de ELG-150-24B (izquierda) y ELG-75-24B (derecha) de Meanwell, ambos trabajando a su potencia nominal.
Fuente: Elaboración propia (2018)

Tabla 3. Tiempo descarga de la salida DC por debajo de 1 V DC de varios drivers LED en diferentes condiciones de trabajo. Fuente: Elaboración propia (2018)

Conductor (Modelo // Fabricante)	Tiempo Off 100% Pnom	Tiempo Off 75% Pnom	Tiempo Off 50% Pnom
PLN-30-24B // Meanwell	8,9 s	8,4 s	7,8 s
NPF-40-24D // Meanwell	10,2 s	9,8 s	9,2 s
ELG-75-24B // Meanwell	11,9 s	11,4 s	10,9 s
ELG-150-24B // Meanwell	16,6 s	16,1 s	15,8 s
HLG-240-24B // Meanwell	17,8 s	17,2 s	16,8 s
LCA 30W 250-700mA C PRE OTD // Tridonic	8,1 s	7,8 s	7,5 s
LCA 75W 250-700mA C PRE OTD // Tridonic	10,8 s	10,3 s	9,7 s
LCA 160W 350-1050mA One4All // Tridonic	17,8 s	17,1 s	16,7 s
Xitanium 30W / 0.7A-42V DIM // Philips	7,8 s	7,4 s	7,1 s
Xitanium 75W 0.1-1.05A Prog+ sXt // Philips	10,2 s	9,7 s	9,2 s
Xitanium 150W 0.35-0.7A GL Prog sXt // Philips	14,2 s	13,6 s	13,1 s

A partir de los resultados obtenidos, calculando la diferencia entre el tiempo mínimo y el caudal máximo medido, se requiere establecer una duración segura de al menos 20 s para un segmento de tiempo habilitado para detectar un mismo dato. Cualquier conmutación de potencia dentro de este rango permitiría programar las luminarias conectadas en ese bus con el mismo perfil dispuesto. Con base en esta decisión, en caso de que un sistema requiera distinguir entre 5 programas diferentes, es decir, identificado cada uno de ellos con las letras de 'A' a 'E' en la Figura 14, se deben asignar tramos incrementales de 20 s para codificar cada uno de ellos. También es necesario dejar un tramo inicial de 10 s para evitar fallos. Así, si el pulso de encendido de programación en un carril de luminarias oscila entre 10 s y 30 s, en todas ellas se activará el programa 'A'. Si el pulso dura entre 30 s y 50 s, se memorizará el programa 'B'. Durante un tiempo entre 50 s y 70 s se solicita el programa 'C' y así sucesivamente hasta que el pulso de potencia dura más de 110 s. En este caso, no se considerará programación ya que se asume como un ciclo de trabajo normal a lo largo de una noche completa y se utilizará este mismo modo de trabajo en todos los ciclos siguientes hasta que se detecte otro proceso de programación.

Según esta secuencia, para codificar un pulso de programación que sea reconocible por todo tipo de conductor, la selección del perfil 'A' requiere de un pulso estandarizado de 10 s; el perfil 'B' necesita 30 s; perfil 'C' 50 s y así sucesivamente.

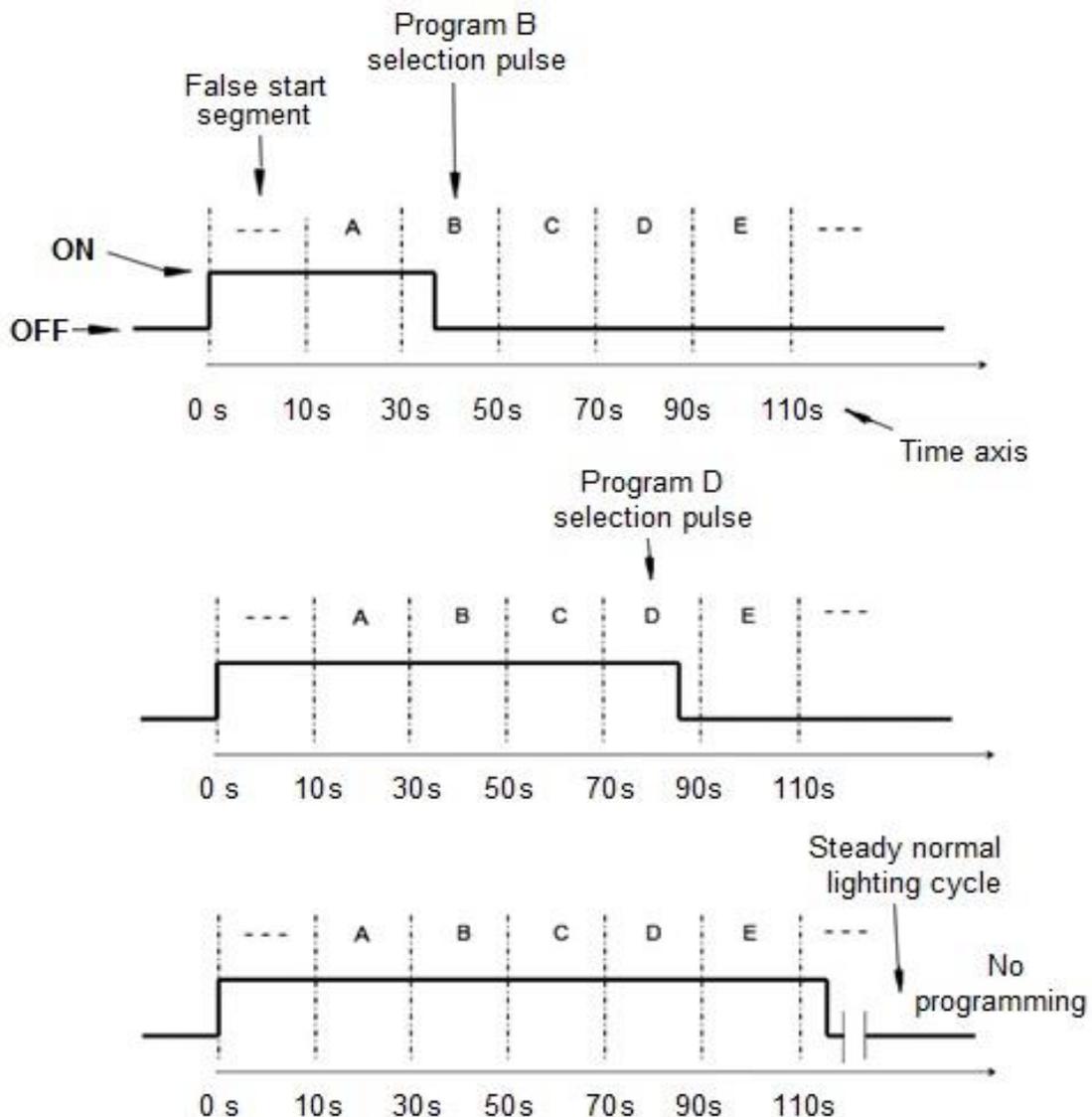


Figura 14. Diagrama de tiempos de conmutación para configurar el programa de regulación a utilizar por las luminarias en los próximos ciclos de trabajo
Fuente: Elaboración propia (2018)

4.2 Investigación 2: Adaptación de una instalación de alumbrado exterior fotovoltaico centralizado aislado para mejorar la garantía del servicio en latitudes tropicales altas.

Siguiendo con los objetivos planteados en la presente tesis, se desarrolla en esta línea de investigación la mejora de la eficiencia energética de un generador fotovoltaico que alimenta a un alumbrado exterior en un edificio docente. Dado que la demanda de energía es nocturna, es necesario el uso de sistemas acumulativos. El uso de baterías puede suponer más del 70% del presupuesto de estos sistemas, y tiene un impacto crítico en el proyecto. Además, este problema aumenta cuando la ubicación la instalación se aleja del Ecuador, ya que aumenta la variación entre la duración de los días y las noches. Esto implica que se debe sobredimensionar el sistema hasta casi

triplicar su capacidad de generación y almacenamiento para garantizar el suministro de energía.

Es importante destacar que la capacidad de obtener energía en una instalación fotovoltaica está principalmente relacionada con la cantidad de horas de sol disponibles en cada momento. Y estas diferencias de horas de sol dependen de la Latitud de la instalación.

Así, en el Ecuador, la noche dura unas 12 h independientemente de la estación del año. En las latitudes medias bajas del planeta (norte y sur), donde se encuentran California, el sur de España, Egipto o Sudáfrica, la diferencia estacional es de aproximadamente 4 h en el lapso de luz entre los solsticios de invierno y verano. Si aumentamos aún más la distancia al ecuador, la diferencia en la duración del día entre el verano y el invierno aumenta y puede alcanzar valores muy notables. De media, en Europa central el cielo seguirá iluminado a las 22:00 horas en verano, pero a las 17:00 horas en invierno estará completamente oscuro. Esto significa que existen diferencias muy notables en la capacidad de generar energía mediante sistemas fotovoltaicos en invierno y en verano en cualquier zona por encima de los trópicos. Esto requiere que las instalaciones se diseñen bajo los criterios del peor de los casos, aumentando la superficie fotovoltaica total y la capacidad del sistema de baterías. Esto conlleva sin duda alguna, al aumento de costes de los sistemas fotovoltaicos y sistemas de almacenamiento de baterías fotovoltaicas (PVB).

La gran evolución y demanda actual de energía fotovoltaica ha sido posible gracias a la gran caída de precios que ha experimentado la industria debido a criterios de economía de escala a nivel mundial. En Europa se ha reducido en torno al 20%, hasta alcanzar una media de 1.130 €/kW, y en Australia se ha reducido hasta un 30%, situándose en torno a los 950 €/kW (European Commission, 2018).

Sin embargo, los sistemas de almacenamiento de baterías fotovoltaicas son menos comunes, debido a su mayor período de amortización y riesgos de fallos. Además, los costes del sistema de baterías tienen una mayor variación, y actualmente se encuentran entre los 540 y 1900 USD/kW.h (Say et al., 2019).

El alto costo de las baterías es la principal barrera para la adopción masiva a nivel mundial de los sistemas de PVB. Esto es especialmente relevante en lugares con latitudes más altas, y en aplicaciones como son las instalaciones de iluminación donde la dependencia de la capacidad de almacenamiento de la batería es total.

La media de irradiación global en las capitales de provincia de España está entre 3,54 y 5,40 kWh/m²d, disponiendo de entre 2.500 y 3.000 horas de luz plena al año, con más de 8,2 horas al día. Esto hace que los sistemas PV puedan considerarse una solución adecuada para aquellas instalaciones de iluminación independientes (Faranda et al., 2015).

Para aprovechar al máximo estos sistemas fotovoltaicos autónomos, se han realizado estudios sobre sistemas de control que permiten regular los niveles de iluminación (Huang et al., 2010). Todos estos sistemas están basados en tecnología LED y en

regular los drivers que controlan dichos LEDs. En la actualidad ya hay estudios que establecen las condiciones para que los equipos de iluminación fotovoltaicos autónomos minimicen su panel fotovoltaico y su batería en la temporada de invierno (Cucchiella et al., 2016).

El problema de los sistemas convencionales de alumbrado autónomo PV es el apagado repentino de la iluminación. Es decir, una vez que se llega al valor mínimo de descarga de la batería, la luz se apaga de forma repentina. El estudio de la regulación de estos sistemas autónomos para que se garantice la máxima duración de su alumbrado, independientemente de las circunstancias meteorológicas, han llevado a estudios (Kiwani et al., 2018), donde se diseñan nuevos controladores para cada luminaria. Estos controladores intentan minimizar el problema del apagado repentino de la luminaria y alarga la vida del sistema de la batería.

Esta línea de investigación propone el uso de un sistema novedoso de gestión centralizado electrónico robusto y asequible, que pueda regular el consumo en función de la energía disponible en baterías. A diferencia de obras anteriores, todos los puntos de luz se alimentarán de un sistema de batería centralizado, y un controlador maestro encenderá, apagará y regulará simultáneamente todos los puntos de luz.

Para probar este sistema se ha utilizado un caso real de nanogrid de alumbrado exterior según la distribución presentada en la Figura 15. La instalación ha sido alimentada por un sistema de baterías fotovoltaicas agrupadas dimensionadas para las condiciones solares medias anuales con y sin gestión de consumo. Cuando se utiliza sin regulación, en invierno o en días nublados, se han producido caídas repetitivas del sistema. Por otro lado, con el uso del control electrónico propuesto se han evitado los apagados, regulando el nivel de iluminación cuando ha sido necesario.

Con esta propuesta, el sistema es más eficiente y económicamente más asequible; evita el coste de sobredimensionar los paneles fotovoltaicos y las baterías del sistema que son absolutamente necesarias para las instalaciones de alumbrado, y es robusto (al alimentar la carga con corriente continua, trabajar los sistemas de generación y las lámparas a un nivel de voltaje unificado). La arquitectura de control también es económica, simple y fácil de implementar y mantener.

Para conseguir este objetivo se aprovechó una instalación de alumbrado exterior existente previamente alimentada desde la red eléctrica. Esta instalación se ha renovado utilizando paneles fotovoltaicos y baterías para que pueda funcionar de forma autónoma (Bronomano et al., 2016).

El método utilizado para el dimensionamiento del panel fotovoltaico está basado en el cálculo del consumo diario “amperios-hora”, teniendo en cuenta las pérdidas entre la batería y las cargas, así como el rendimiento de ésta.

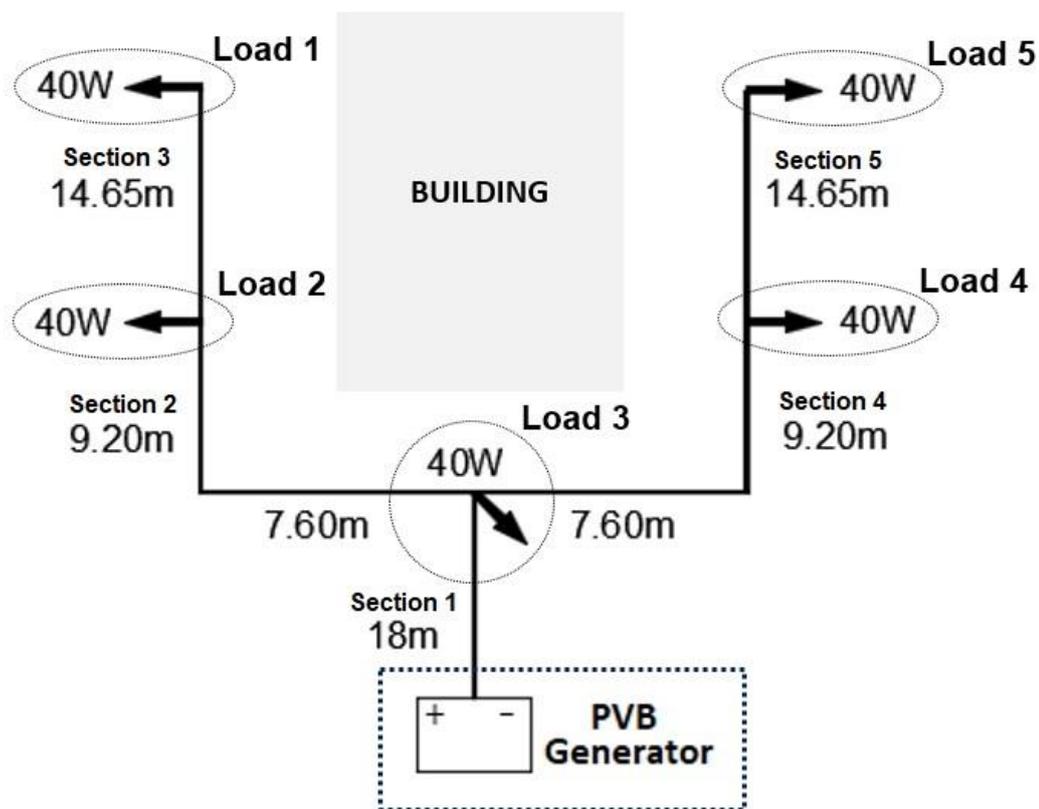


Figura 15: Diagrama de distribución y distancia de cableado entre elementos de la instalación. Fuente: Elaboración propia (2021)

Los equipos de generación y almacenamiento de energía deben ser capaces de abastecer el consumo de la instalación en la situación media anual del número de horas solares punta existentes con una autonomía de trabajo de 3 noches completas de 12 horas (equinoccio de primavera o verano). Por ello, la instalación se dimensiona utilizando los valores medios anuales de irradiación en el plano de generación. No obstante, el ángulo de inclinación de los paneles utilizados se selecciona optimizando la trayectoria solar de diciembre, para maximizar la captación de energía en el mes de menor radiación solar.

En primer lugar, hemos procedido al cálculo del consumo diario de la instalación. El consumo establecido para las condiciones de diseño es el de 5 luminarias en las que inicialmente se instalan lámparas de inducción con el balasto integrado y un consumo total individual de 40W (2.600 lúmenes; factor de potencia: 0,98; tensión nominal de entrada: 230 V_{AC}). Así, el consumo total de cálculo es de 200W con un uso de 12 horas al día.

Considerando los 24 V_{CC} nominales del sistema PVB y teniendo en cuenta la eficiencia de conversión del inversor ($\eta_{\text{conversión}} = 0,90$), se calcula un requerimiento de consumo diario de energía de 111,11 Ah/d mediante la ecuación 1.

EXPOSICIÓN DE LA INVESTIGACIÓN REALIZADA

$$Capacidad = \frac{P_{total\ carga} \times tiempo}{\eta_{conversión} \times voltaje} = \frac{200W \times 12h}{0,90 \times 24V} = 111,11\ Ah/d \quad (1)$$

Considerando un factor de rendimiento del 98% del cable ($\eta_{cable} = 0,98$) y un factor de rendimiento del 90% de la batería ($\eta_{batería} = 0,90$), en base a las especificaciones de los fabricantes, se establece un valor de consumo corregido de la instalación de 125,97 Ah/d.

Seguidamente se ha dimensionado la capacidad de las baterías. El sistema se dimensiona mediante la ecuación 2, estableciendo un requerimiento de almacenamiento de 3 días sin recarga de energía, una descarga máxima permisible del 85% del rack de baterías y una corrección de temperatura del 80%.

$$Capacidad = \frac{N^{\circ} \text{ días autonomía} \times \text{consumo corregido}}{\text{Tasa descarga}_{m\acute{a}xima} \times \text{Factor corrección } t^a} = \quad (2)$$

$$\frac{3 \text{ días} \times 125,97 \text{ Ah/día}}{0,85 \times 0,80} = 555,75 \text{ Ah}$$

Por último, se ha dimensionado el Generador Fotovoltaico de la instalación. En base a la latitud de nuestra instalación, el ángulo de inclinación óptimo de los paneles fotovoltaicos para el mes de diciembre es de 55° en la orientación sur. Asimismo, según los datos facilitados por la Agencia Nacional de Meteorología de España (AEMET), la irradiancia media anual total para nuestro emplazamiento es de $5,45 \text{ kW}\cdot\text{h}/\text{m}^2\cdot\text{d}$. Este valor lo utilizamos de acuerdo a los requisitos de dimensionamiento establecidos. En comparación, el valor de captación solar para el mes más desfavorable del año (diciembre) es una irradiancia total de $2,36 \text{ kWh}/\text{m}^2\cdot\text{d}$. (Sancho-Ávila et al., 2012).

El número de módulos fotovoltaicos a conectar en serie se obtiene del cálculo del cociente entre la tensión nominal del sistema y la tensión nominal del módulo. En nuestro caso, un único módulo proporciona la tensión necesaria del PVB (24 V_{DC}). El número de paneles en paralelo se obtiene como el cociente entre la corriente de diseño del generador y la corriente de cada módulo en el punto de máxima potencia en condiciones estándar.

La corriente de diseño del generador es, por su parte, el cociente del consumo corregido de la instalación entre el número de horas de sol punta disponibles. En este caso, este requisito se cumple con cuatro paneles del modelo seleccionado en la Tabla 4.

El resto de componentes de la instalación son:

Controlador de batería: Este equipo se utiliza para proteger las baterías contra sobrecargas o descargas excesivas. También es capaz de determinar las situaciones de puesta y salida del sol en función de la tensión de salida de los paneles fotovoltaicos y abrir o cerrar el bus de alimentación de las luminarias en función de este criterio. El modelo específico seleccionado ($I_{carga}: 40 \text{ A}_{DC}/I_{descarga}: 30 \text{ A}_{DC}$) ofrece valores de trabajo

por encima de la corriente de cortocircuito de los cuatro paneles fotovoltaicos en paralelo ($22,5 A_{DC}$) aplicando un coeficiente de seguridad de 1,50.

Inversor: Equipo utilizado para transformar la corriente eléctrica desde CC a CA la energía eléctrica se seleccionó con una potencia máxima de conversión de 300 W para tener un margen de seguridad suficiente sobre la potencia total instalada en las lámparas, teniendo en cuenta las pérdidas en los hilos y en el equipamiento auxiliar de las luminarias.

Hilos de la red eléctrica: Los hilos de la red de distribución eléctrica existentes hasta la carga utilizaban cobre de 2,50 mm² de sección en conductor trifilar con envoltorio de aislamiento RZ1-K 0,6/1 kV. El nivel de consumo de las cargas requiere de una sección inferior para soportar una baja caída de tensión y soportar una falla por atajo; sin embargo, este es el valor mínimo permitido por la normativa de instalaciones eléctricas de baja tensión del país de la instalación. Para minimizar el coste del proceso de renovación y, al no ser necesario, se mantuvo el mismo cable para la configuración autónoma.

Para generar el sistema experimental se utilizó el equipo descrito en la Tabla 4. Este conjunto de equipos se ensambló de acuerdo a la arquitectura presentada en la Figura 16, y se sometió a un análisis de trabajo continuado a largo plazo para verificar el rendimiento real alcanzado y garantizar que las simplificaciones utilizadas en el dimensionamiento del sistema no fueran significativas (Bacha et al., 2015). Se tomaron diferentes medidas eléctricas y de irradiación que indican el comportamiento operativo exacto del generador fotovoltaico diseñado que permite hacer una evaluación de su rendimiento.

La toma de medidas experimentales se ha realizado utilizando:

- Un piranómetro modelo SLM 018-C2 del fabricante Mac Solar para medir la irradiación global. Se ha colocado junto a los paneles fotovoltaicos con la misma inclinación que estos.
- Un registrador de datos PA6000 del fabricante PCE para medir la tensión e intensidad en la sección DC del PVB.
- Un analizador de red modelo Power Vision V1.8.c del fabricante Circutor para medir la tensión, intensidad y factor de potencia en la red eléctrica AC. Se coloca a la salida del inversor.

Se ha controlado y medido el comportamiento de la instalación entre los meses de diciembre y mayo, y se ha constatado el déficit energético que se genera en los meses de menor radiación solar que deriva en caídas repentinas y repetitivas del sistema. La Figura 17 muestra las medidas de la radiación en el mes de abril y mayo y las Figuras 18 y 19 y la Tabla 5 detallan por horas los parámetros obtenidos en los paneles fotovoltaicos en un día soleado ilustrativo según los datos recogidos en la instalación, concretamente, se selecciona el 29 de abril de 2020.

Tabla 4. Características de los equipos utilizados para el diseño del sistema de PVB
Fuente: Elaboración propia (2021)

Panel Fotovoltaico [standard test conditions (STC): 1kW/m ² , 25°C, 1,5 atm]	
Modelo y fabricante	XH-72M-190 // Shiness
Voltaje en circuito abierto (V_{oc})	44,6 V _{DC}
Tensión en el punto de máxima potencia (V_{max})	36,6 V _{DC}
Corriente de cortocircuito (I_{sc})	5,62 A _{DC}
Corriente en el punto de máxima potencia (I_{max})	5,20 A _{DC}
Potencia nominal (P_{max})	190 W _p
Eficiencia	14,9 %
Precio por unidad (con impuestos)	121,00 €
Batería	
Modelo y fabricante	Classic OPzS Solar 660 // GNB
Tensión nominal	2 V _{DC}
Capacidad nominal	660 Ah
Capacidad útil (85% descarga)	561 Ah
Precio por unidad (con impuestos)	248,00 €
Controlador de batería	
Modelo y fabricante	RS40 // Sumsol
Tensión nominal	24 V _{DC} (Range 10-36 V _{DC})
Carga máxima de corriente / Consumo	40 A _{DC} / 30 A _{DC}
Sobrecarga máxima permitida	25%
Precio por unidad (con impuestos)	200,00 €
Inversor	
Modelo y fabricante	Phoenix 24/375 / Victron Energy
Tensión nominal	24 V _{DC} (Rango 18,4 - 34,0 V _{DC})
Pico nominal de potencia	700 W
Eficiencia	90%
Precio por unidad (con impuestos)	125,00 €

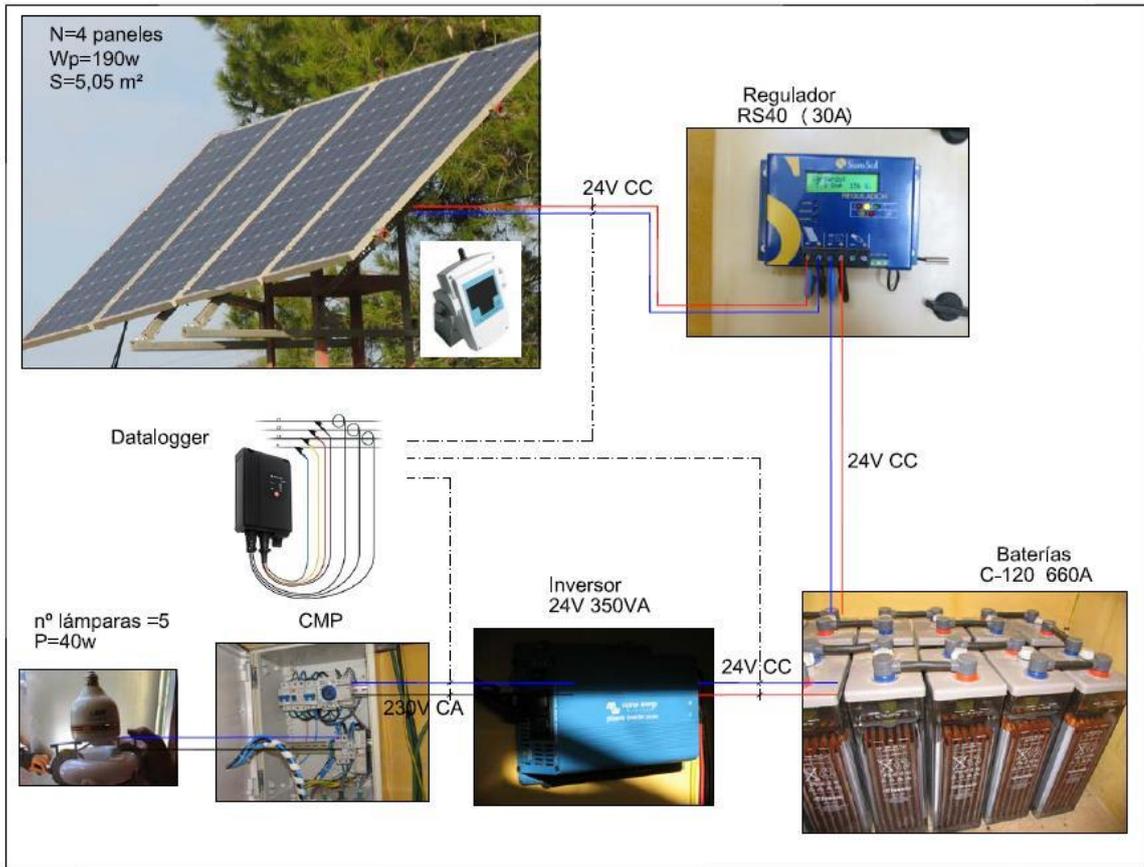


Figura 16. Esquema de instalación de prueba y equipo de monitoreo de datos
 Fuente: Elaboración propia (2021)

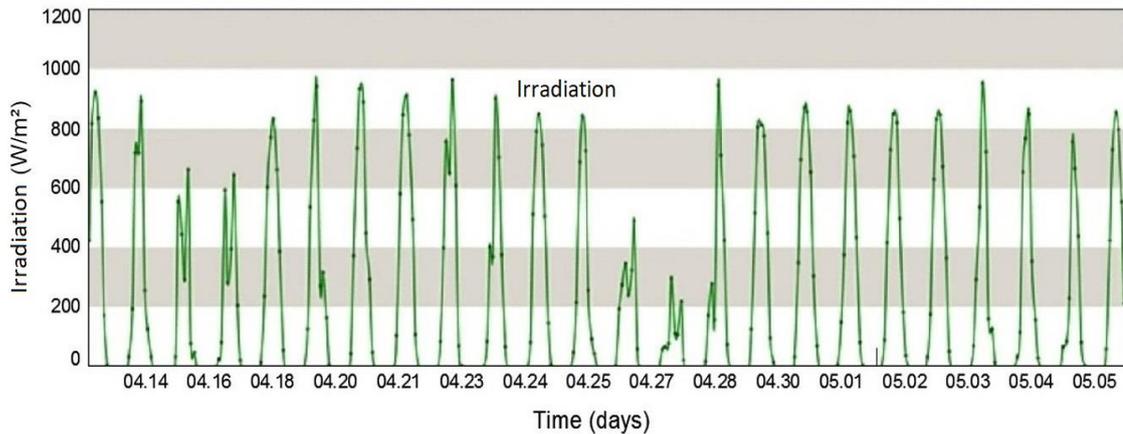


Figura 17. Radiación solar recibida en los paneles fotovoltaicos en el mes de abril
 Fuente: Elaboración propia (2021)

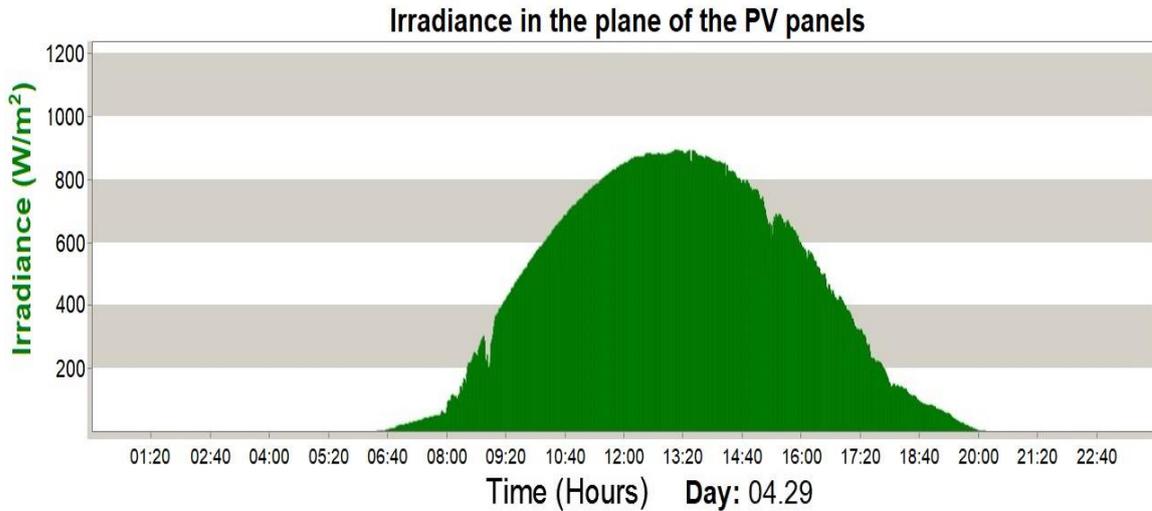


Figura 18. Radiación solar recibida en los paneles fotovoltaicos en un día soleado promedio de primavera. Fuente: Elaboración propia (2021)

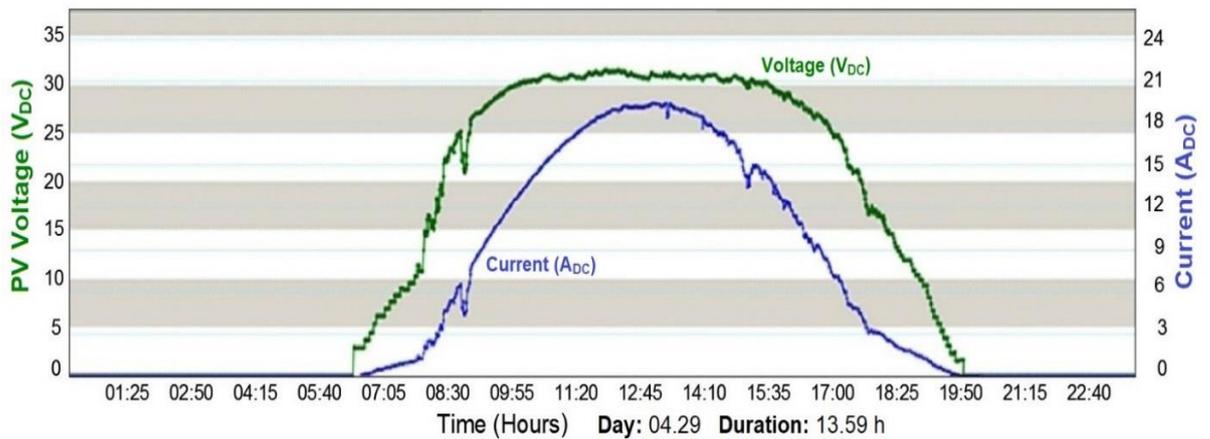


Figura 19. Radiación solar recibida en los paneles fotovoltaicos en un día soleado Fuente: Elaboración propia (2018)

Tabla 5. Energía producida por los paneles fotovoltaicos en un día soleado de primavera en la localización del Ayto. de Cártama. Fuente: Elaboración propia (2021)

Abril 29 th – Cártama (España) Dur. día: 13,59 horas	Global	Valores instantáneos	
	Suma [1 día]	Medio	Máximo
Irradiación	4,171.20 W.h/m ² .d	306.71 W/m ²	928.00 W/m ²
Temperatura en los paneles	-	24.67°C	43.80°C
Intensidad	90.36 A.d	6.64 A	20.12 A
Energía / Potencia	2,397.11 W.d	176.26 W	639.40 W

La Tabla 6 contiene los datos y valores obtenidos con las mediciones del rendimiento real del generador fotovoltaico medido en los meses de diciembre (peor caso) a marzo. Esta tabla indica la cantidad real de déficit o excedente de energía producida con respecto al consumo energético que requiere la instalación de alumbrado según lo establecido. Respecto al mes de diciembre, la instalación tiene un déficit total de energía de 2.996,35 A.h. Esto significa que, considerando que la energía total generada y almacenada en el mismo periodo es de 1.547,72 A.h, la instalación debería ser unas 3 veces mayor para evitar caídas repentinas en el rendimiento sin introducir ningún elemento nuevo de control u optimización.

Tabla 6. Generación de energía que resulta del sistema PVB en relación con los requerimientos de potencia de la instalación de iluminación (5 x 40 W)
Fuente: Elaboración propia (2021)

Consumo medio: 10.996 A	Diciembre	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo
Irradiación acumulada (W.h / m².mes)	69,190	69,440	88,200	141,515	141,000	149,420
Energía producida acumulada (A.h .mes)	1,547.52	1,805.44	2,125.76	2,940.29	3,950.00	4,513.60
Duración media de la noche para el mes (h)	13 h	13 h	12 h	11 h	10 h	9 h
Día a mitad de mes	20 min	5 min	13 min	2 min	52 min	51 min
	(13.33 h)	(13.08 h)	(12.22 h)	(11.03 h)	(10.87 h)	(9.85 h)
Consumo energético medio diario sin regulación (A.h.día)	146.58	143.83	134.37	121.29	119.53	108.31
Consumo de energía acumulado sin regulación (A.h.mes)	4,543.88	4,458.66	3,762.39	3,759.86	3,585.80'	3,357.63
Excedente / déficit (A.h.mes)	-2,996.35	-2,653.22	-1,636.63	-819.57	364.30	1,155.97
	↓↓	↓↓	↓↓	↓↓	↑↑	↑↑

Nota: ↓↓ Déficit de energía ↑↑ Excedente de energía

En base a los datos obtenidos en la prueba experimental del formato inicial de implantación de la instalación, se han realizado las siguientes modificaciones para solucionar este desfase energético, consiguiendo en este caso una reducción del 66% de los requerimientos energéticos y hacer que la instalación sea capaz de dar un servicio completo durante todo el año, sin incrementar el sistema de generación (número de paneles fotovoltaicos o celdas de batería):

- a) Modificación del tipo de bus de alimentación de 220/230 V_{AC} a un bus de corriente continua ajustado a la naturaleza de los generadores fotovoltaicos y al sistema de baterías utilizado (24 V_{DC}). Esta modificación induce dos acciones sobre la instalación:
 - Transformar el bus de línea de alimentación AC para luminarias en DC eliminando el inversor. El objetivo es mejorar la eficiencia del sistema

eliminando esta etapa de transformación energética y, al mismo tiempo, mejorar su robustez y coste.

- Reemplazar las lámparas de inducción de 40W por lámparas LED de 40W con un controlador de potencia DC-CC (Meanwell LDH-45®) adaptado a la entrada del sistema alimentado por batería (18 - 36 V_{DC}) y con una corriente de salida constante independiente de la señal de entrada (carga del sistema de almacenamiento). Esto permite:
 - Mejorar la calidad de la luz trabajando con un CRI mucho mayor (80) que facilita la percepción de los objetos tanto por el ojo humano como por las cámaras (Rahm & Johansson, 2016).
 - Mejorar la eficiencia de la fuente de luz, obteniendo valores superiores a 125 lm/W con equipos comerciales disponibles de forma genérica en el mercado de equipos de iluminación. Estos sistemas son más eficientes y robustos que los equipos alimentados por la red al simplificar en gran medida el sistema de alimentación auxiliar necesario, como el controlador LED (Gago-Calderón et al. 2018).

b) Arquitectura de control electrónico.

Los sistemas de iluminación exterior, avalados por las exigencias de la normativa de eficiencia energética en este tipo de instalaciones, especifican que la calidad de su luz está especialmente relacionada con garantizar la suficiente uniformidad lumínica. No es tan importante garantizar altos niveles de iluminación, que pueden reducirse a medida que avanza la noche, siempre que sean lo suficientemente altos para controlar y monitorear el entorno. Por ello, se propone la incorporación de un sistema de autoajuste para supervisar y gestionar el control de la luminosidad de las lámparas LED. El funcionamiento del sistema propuesto se basa en la detección del nivel de tensión de las baterías y ajustar el consumo de los LEDs a la disponibilidad de energía en las baterías. La idea es mantener la máxima intensidad de encendido durante toda la noche si la energía disponible lo permite, pero generará un patrón de atenuación de intensidad si el sistema encuentra que no tiene suficiente capacidad de almacenamiento para cubrir el consumo de energía. De esta manera, en los meses de déficit energético, la instalación seguirá funcionando todas las horas necesarias, aunque con un patrón de flujo de luz reducido.

Se plantea un sistema de control basado en el principio de diseño de minimizar el hardware necesario para ajustar la funcionalidad a las necesidades específicas de la instalación de iluminación, pero permitiendo cierta capacidad de configuración. Está formado por:

- 1.- Una unidad central de gestión ubicada en la estación fotovoltaica con el banco de baterías y tiene dos funciones: Primero, controlar el nivel de carga del rango de baterías. Esto permite establecer uno o más puntos de acción en los que reducir el consumo de las lámparas para ampliar la disponibilidad energética. En segundo lugar, para comandar el bus de comunicaciones. Estas dos tareas están

programadas en el firmware cargado en un microcontrolador que comanda esta CPU.

El algoritmo de control de descarga de la instalación de alumbrado exterior para decidir cuándo es necesario empezar a regular la luz para prolongar la autonomía se construyó en base a la medida de la tensión de rango de la batería mientras está cargada. El voltaje de salida de las baterías varía significativamente cuando el sistema está en modo abierto o con cargas, y diferentes valores de los requisitos de corriente también cambian ese valor. Así, en los casos en que el requerimiento de potencia asignada a la red varíe en el tiempo, la lectura de este parámetro no podrá dar una estimación precisa del nivel de carga. Sin embargo, si la carga es constante, como en nuestra instalación, este sistema es preciso.

2.- Un Bus de Comunicaciones. Para simplificar, se genera una arquitectura Maestro-Esclavo con el conjunto permanente de datos activos en el bus. Esta información indica a las lámparas el estado de funcionamiento que deben tener en cada momento.

3.- Un conjunto de unidades de control de lámparas colocadas en cada luminaria y conectadas a sus drivers de potencia. Tienen la misión de recibir la información de la placa de gestión y convertirla en una señal de atenuación para modificar el modo de funcionamiento del controlador. Con esta modificación se puede controlar la variación de la corriente de salida que se introduce en la matriz LED y, por tanto, la cantidad de luz producida. Estas unidades de control incluyen un bloque de micro interruptores de configuración que permite configurarlas manualmente para cada estado de funcionamiento ordenado por la placa de gestión para definir el porcentaje de nivel de luz que debe emitir la luminaria.

Configuración del conjunto de hardware:

Unidad de control maestra:

Se utiliza un microcontrolador de muy baja potencia (MSP430F2002 de Texas Instruments) con los siguientes módulos de conexión/contacto con su entorno externo acoplados. Ver Figura 20:

A. Entrada de energía. Recibido directamente de las baterías. La central dispone de un regulador de tensión que adapta las alimentaciones a los circuitos integrados Vcc (3,3V)

B. Lectura de voltaje de la batería: 2 líneas (V_{bat} y GND) para estimar el estado de carga de la batería. Se requiere un divisor de voltaje de resistencia para adaptar el valor medido dentro del rango de operación de la unidad de conversión AD de los microcontroladores (V_{cc} y GND)

C. Bus de comunicaciones: n líneas (GND y 'n' * líneas DATUM). Los circuitos integrados MOSFET permiten que el procesador genere dos estados diferentes en el bus y, por lo tanto, generar una codificación de información binaria: circuito abierto ('1')

y circuito cerrado ('0'). Aumentar el número de líneas DATUM permite más combinaciones posibles que pueden comunicar $2n$ estados de trabajo diferentes.

Unidad de control esclava de la lámpara:

El mismo PCB con un microcontrolador más simple (MSP430F2001 sin módulo ADC) se utiliza en esta UCP con los siguientes módulos de conexión/contacto con su entorno externo (ver Figura 20):

A. Entrada de energía. De forma idéntica a la unidad de control maestra.

B. Bus de comunicaciones: Cada unidad de control de lámparas incluye una resistencia *pull-up* V_{cc} que establece un valor estable en las líneas de DATOS mientras el controlador maestro mantiene el MOSFET como un circuito abierto. Es importante que la conexión del bus de datos respete siempre la polaridad de los cables. No se puede mezclar DATA con GND en ninguna luminaria ya que, en este caso, el bus estaría permanentemente en estado '1'.

C. Señal de control del Driver DC-CC de la Luminaria. Ejecuta una señal PWM con una frecuencia de 2 KHz que regula en el rango 100%-0% del ancho de pulso activo para configurar la corriente de salida emitida por un Driver Meanwell LDH-45B-700W que alimenta los LEDs de la lámpara.

Esta unidad de control debe instalarse con una distancia de cableado lo más corta y directa posible. La tarea del conductor es establecer una fuente de alimentación fija y constante para los LEDs de la lámpara, independientemente del cambio de voltaje de las baterías (y los paneles fotovoltaicos, si corresponde).

Tanto las unidades de control maestras como las esclavas pueden generarse sobre una misma Placa de Circuito Impreso (PCP) soldando los componentes necesarios para cada caso. La solución lograda se puede compactar en una base de 55 x 27 mm. La Figura 21 presenta la implementación de un sistema maestro preparado para comandar el máximo de 3 líneas DATUM (8 etapas de regulación diferentes) para las que está preparado.

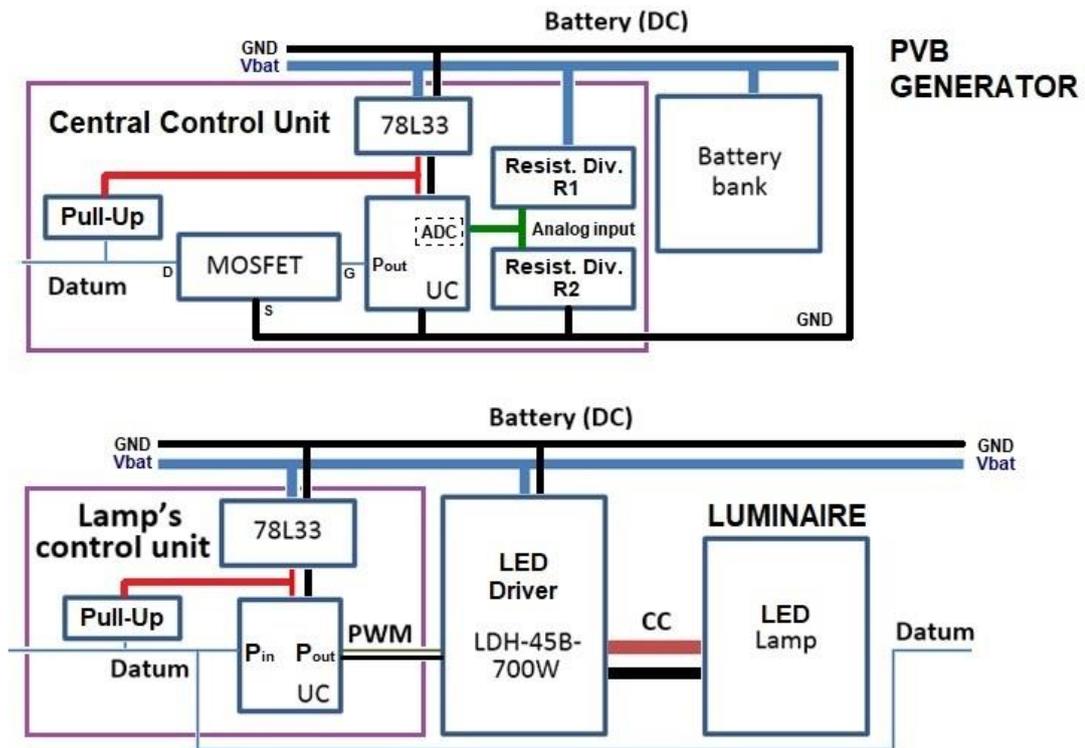


Figura 20. Esquemas de las unidades electrónicas de control de supervisión y regulación. Fuente: Elaboración propia (2021)

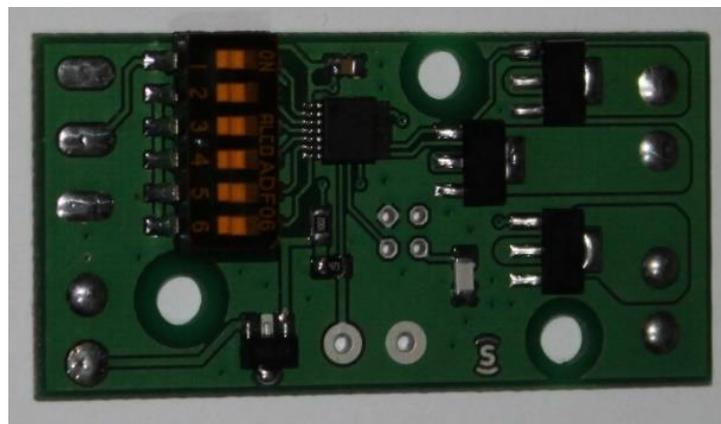


Figura 21. Fotografía de la PCB montada como unidad maestra de control de supervisión y regulación. Fuente: Elaboración propia (2021)

Bus de comunicaciones

Este bus se basa en un sistema multihilo de comunicación estática donde se utiliza un hilo GND que iguala las referencias de tensión del bus de datos y tantos hilos como sean necesarios para marcar los diferentes estados. 1 línea DATUM: 2 estados. 2 líneas DATUM: 4 estados. 3 líneas DATUM: 8 estados, etc. Estos hilos conectan un procesador de lámparas de clavija de entrada digital de capa y tienen una resistencia

pull-up que mantiene el bus en un estado natural en un '1' lógico ($3,3 V_{CC}$ como suministro del microcontrolador).

La placa de gestión dispone de transistores MOSFET con los que se pueden conmutar los hilos de datos con el hilo de tierra para que, si el circuito está abierto en el bus, se lea un '1' gracias a todos los *pull-ups* de las luminarias; cuando está en cortocircuito, el hilo de referencia se establece en '0'.

De esta forma, un número binario con tanta resolución como líneas DATUM puede mantenerse estático en el bus de datos. Así, no hay ruido electromagnético ni interferencias en ningún momento al tratarse de un sistema con alimentación DC y un bus de comunicaciones donde las transiciones solo se producen cuando las necesidades de consumo cambian puntualmente. El requerimiento de energía del bus es mínimo y puede implementarse utilizando cables de tan solo $0,25 \text{ mm}^2$ y no se requiere blindaje.

Este sistema es menos complejo y requiere menos costos de instalación y mantenimiento que otros sistemas utilizados para el control en este tipo de instalaciones (Park et al., 2018).

Procedimiento de ensayo para la mejora de la instalación:

Con el banco de baterías totalmente cargado, se conecta la red eléctrica encendiendo las luminarias, funcionando a plena potencia constantemente. Las lámparas funcionan encendidas con el PV desconectado hasta que la energía dentro del equipo de almacenamiento alcanza el nivel de descarga total. En esta instalación la carga de las 5 luminarias con lámparas LED es exactamente constante ya que el driver incluido en las luminarias mantiene constante el consumo de energía independientemente de las variaciones de voltaje del rango de baterías.

Durante el experimento se registró la variación en el tiempo del voltaje de carga de la batería. Este comportamiento se muestra en la Figura 22. El valor de voltaje medido disminuye bruscamente las primeras 10 horas y luego traza una disminución lineal que vuelve a caer bruscamente solo unas pocas horas antes de alcanzar el nivel de corte ($22,0 V_{DC}$) cuando la batería El controlador apagó el sistema, 75 horas después del inicio. Esto supone un importante incremento de tiempo a partir de los criterios de diseño de capacidad para alimentar la instalación durante 3 noches sin recargar que genera el paso de una red AC a DC y eliminar todos los elementos de conversión. Este experimento se repitió 3 veces obteniendo un comportamiento idéntico en la curva de descarga. El voltaje, tras desconectar la red, sube inmediatamente mostrando el valor de circuito abierto para esta batería al nivel de carga instantáneo.

Tras este primer experimento, se repitió la experiencia integrando los sistemas electrónicos de regulación programados con un solo paso de regulación. Se programó una regulación del nivel de brillo del 70% para que se active al alcanzar un valor de voltaje de batería de $24 V_{DC}$. Este valor supone, aproximadamente, un 50% de la energía total que se puede almacenar. Con esta configuración el sistema ha aguantado 105 horas antes de volver a alcanzar la profundidad de descarga de las

baterías (ver Figura 23), esto es un 40% más de tiempo de operación activa respecto a la experiencia anterior sin la arquitectura de control.

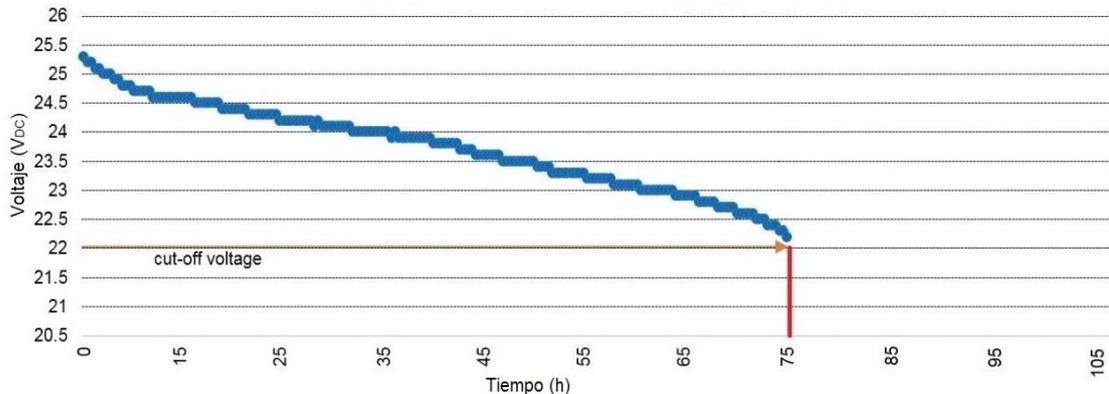


Figura 22. Curva de descarga de la batería sin ningún sistema de regulación de carga
Fuente: Elaboración propia (2021)

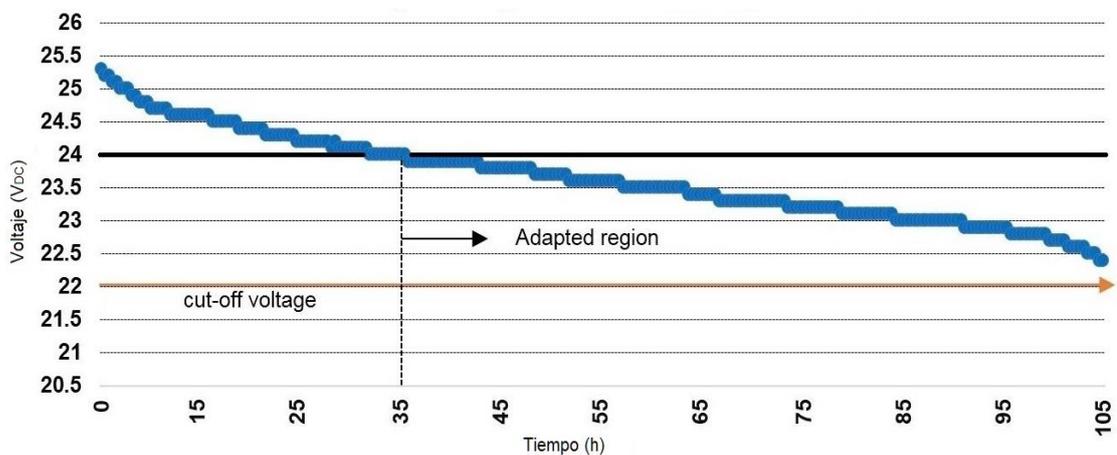


Figura 23. Curva de descarga de la batería mediante un sistema de control de atenuación en función de la disponibilidad de energía
Fuente: Elaboración propia (2021)

4.3 Investigación 3: Instalación experimental de alumbrado público alimentado por turbina hidráulica instalada en la red de abastecimiento de agua

Siguiendo con el objetivo marcado por la presente tesis, se desarrolla en esta línea de investigación, un estudio novedoso para obtener energía a partir de recursos renovables, aprovechando las válvulas reductoras de presión existentes en las redes de distribución de agua potable (Corcoran et al. 2013).

La caída de presión que producen las válvulas reductoras supone una disipación de la energía de presión que contiene el agua y que se traduce en el desgaste de los elementos que componen la válvula, en vibraciones y energía mecánica. Esta energía de presión es la que podría aprovecharse para la generación de energía eléctrica renovable. Esta conversión de energía disminuye la presión operativa promedio dentro de un sistema, lo que, a su vez, reduce las pérdidas de agua por fugas en el sistema (Pérez-Sánchez et al., 2017). Desde luego, esta generación de energía se tiene que

llevar a cabo sin alterar las condiciones de calidad del suministro de agua a la población. Esto es, si modificaciones significativas de la presión y caudal de suministro regular.

En este trabajo se desarrolló un estudio experimental para evaluar la viabilidad técnica, económica y ambiental de la generación de electricidad con Turbinas de Recuperación de Energía (ERT) para alimentar una instalación específica dentro del mismo contexto municipal, la instalación de alumbrado público exterior. Se eligió una ubicación apropiada para el ERT, dentro de una red de distribución de agua potable existente, y su tamaño se basó en maximizar la energía recuperada y permitir una infraestructura de red más resistente.

Este estudio también considera el análisis de programar el flujo de líquido para sincronizar el desplazamiento de agua requerido de los embalses de la red de distribución de agua con los periodos donde se requería energía en la carga conectada (Telci & Aral, 2018). En nuestro caso se maximizó la generación de energía por la noche sin alterar el normal funcionamiento de la instalación por la naturaleza de la instalación que se alimentaba. Así, podría utilizarse al mismo tiempo que se genera, minimizando la necesidad de almacenamiento para alimentar una instalación de alumbrado público exterior. En general, este es un enfoque global innovador para el tema de la recuperación de energía de las redes de distribución de agua con ERT, que involucra el equipo de generación, pero también la programación del agua que fluye en la red hacia el ERT para sincronizar la generación de energía con su demanda de puntos de luz, que no habían sido suficientemente desarrollados en la literatura científica.

Esta capacidad de coordinación existente entre la recuperación de energía para las redes de distribución de agua y el alumbrado exterior es todavía un campo de estudio poco desarrollado en la literatura frente a las extensas investigaciones sobre el uso de generadores eólicos y solares para luminarias autónomas, que por sí solos no pueden garantizar la fiabilidad del servicio.

Debido a que no de los principales inconvenientes de los proyectos micro hidroeléctricos con turbinas tradicionales son su alto coste de capital inicial (puede llegar al 25% de la instalación), los costes de mantenimiento y la disponibilidad de repuestos (Alberizzi et al., 2018), hemos utilizado en el desarrollo del presente trabajo, una bomba trabajando como turbina (PAT). Estos dispositivos permiten captar la energía hidráulica del agua mediante un movimiento rotacional inverso para convertirla en energía eléctrica. El interés en las PAT se basa en *“su capacidad para operar en condiciones de operación que las turbinas hidráulicas convencionales apenas pueden cubrir (es decir, caudales que van de 10 1800 m³/h y una altura de 10 a 100 m³) (Stefanizzi et al., 2020).*

Las principales ventajas del uso de estas micro turbinas hidráulicas es su bajo coste, ya que se aprovecha la producción masiva de bombas a nivel mundial y permiten ofrecer una amplia gama de soluciones hidráulicas (Satish et al., 2021). Además, no requieren de operadores cualificados, y la reducción de eficiencia respecto a turbinas

tradicionales o específicas se compensa con los menores costes de instalación y mantenimiento (Fontanella et al., 2020).

Si bien la iluminación solar fotovoltaica es una gran alternativa para reducir los gastos de electricidad de los municipios, esta tecnología está siendo ampliamente promovida y desarrollada por sus unidades de gobierno. Según la Agencia Internacional de Energía (AIE), en 2019, China fue el mercado más grande en la región APAC para la implementación de soluciones de sistemas de iluminación solar y representó una participación del 42,8% en el mercado de capacidad fotovoltaica solar global (Solar Power Europe, 2021).

Así, y con esa misma finalidad, la generación de energía a partir de la presión del agua residual y del consumo puede ubicarse muy cerca de las instalaciones de alumbrado y aprovecharse para alimentarlas de una forma diferente pero aún más sostenible. Esto se debe a que comparten ubicaciones en las calles del municipio y se puede programar la generación de energía en el momento en que se necesita durante la noche, desplazando adecuadamente los periodos de recarga de los depósitos municipales. Esto elimina la necesidad de almacenar la energía que se genera, o al menos una parte importante de ella, antes de usarla. Por lo tanto, este enfoque puede resolver el principal inconveniente de la opción más extendida para combinar energías renovables e iluminación, es decir, las luminarias fotovoltaicas.

Por lo tanto, y siguiendo con la forma de trabajo de la presente tesis, se realizó un estudio experimental mediante la instalación, con obra civil, de un ERT colocado en paralelo con una válvula reguladora de presión (PRV) dentro de la red de agua del municipio de Cártama, Málaga (España) [$36^{\circ} 40' 59,47''\text{N}$ y $4^{\circ} 35' 36,76''\text{O}$]. Este municipio está situado en un valle en la cuenca de un río flanqueado por dos relieves geográficos moderados (montañas) en sus laderas laterales que generan desniveles de cierto valor en su territorio. Esto influye en su red de distribución de agua, ya que la diferencia de altura entre el embalse principal y varios puntos de consumo de agua genera una energía potencial importante, que era la que se quería recuperar. Los resultados obtenidos son extrapolables a cualquier otro municipio con condiciones topográficas similares e incluyendo un desnivel entre depósitos de agua (depósito principal y tren) para hacer posible la distribución diaria programada de agua. Este es un escenario muy común, no sólo en nuestra región concreta (sur de España, Europa) (Rodríguez-Pérez et al., 2021), sino en cualquier lugar donde se encuentren sierras regulares y ríos cercanos a los municipios. La instalación fue monitoreada inicialmente durante 12 meses para evaluar la energía disponible en esta red municipal de distribución de agua entre el depósito principal y un depósito de tren a lo largo de todo un año natural, obteniendo valores de generación de energía y valorando las fortalezas y debilidades del sistema. La red municipal de distribución de agua del municipio de Cártama se detalla en la Figura 24, indicándose los puntos de captación de agua y los depósitos principales, los núcleos de población y el depósito de cola con la válvula reductora de presión donde se quiere recuperar energía. La Figura 25 presenta su esquema sinóptico detallando los diferentes componentes de la red y los canales de distribución de agua entre ellos.

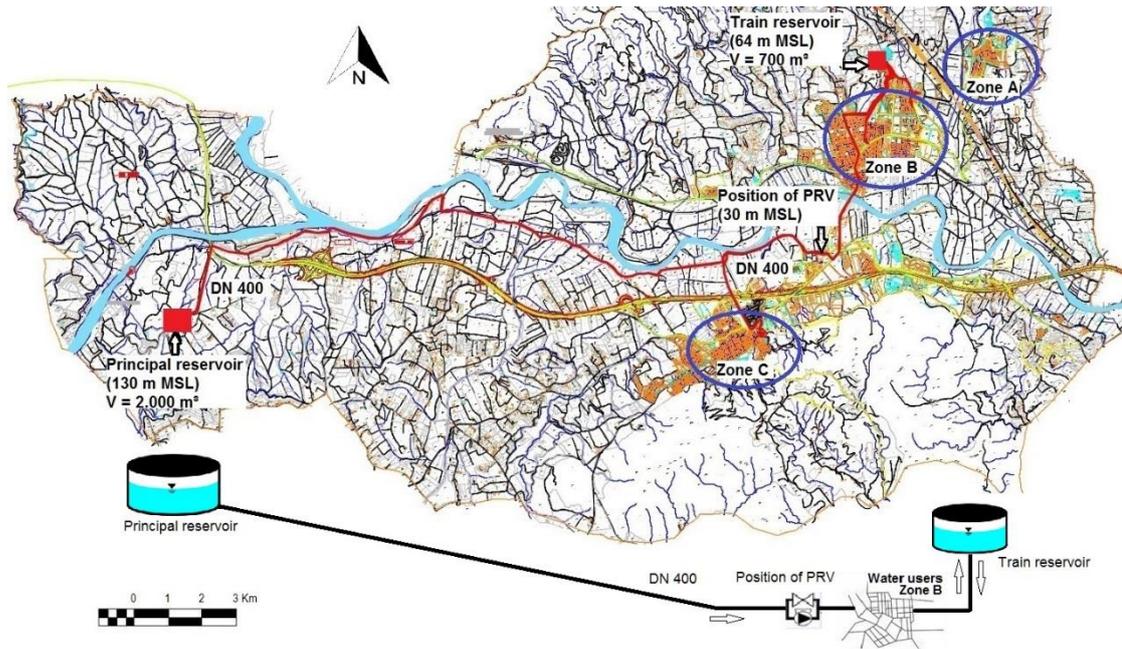


Figura 24. Distribución geográfica de la red de agua potable en Cártama (España)
 Fuente: Elaboración propia (2022)

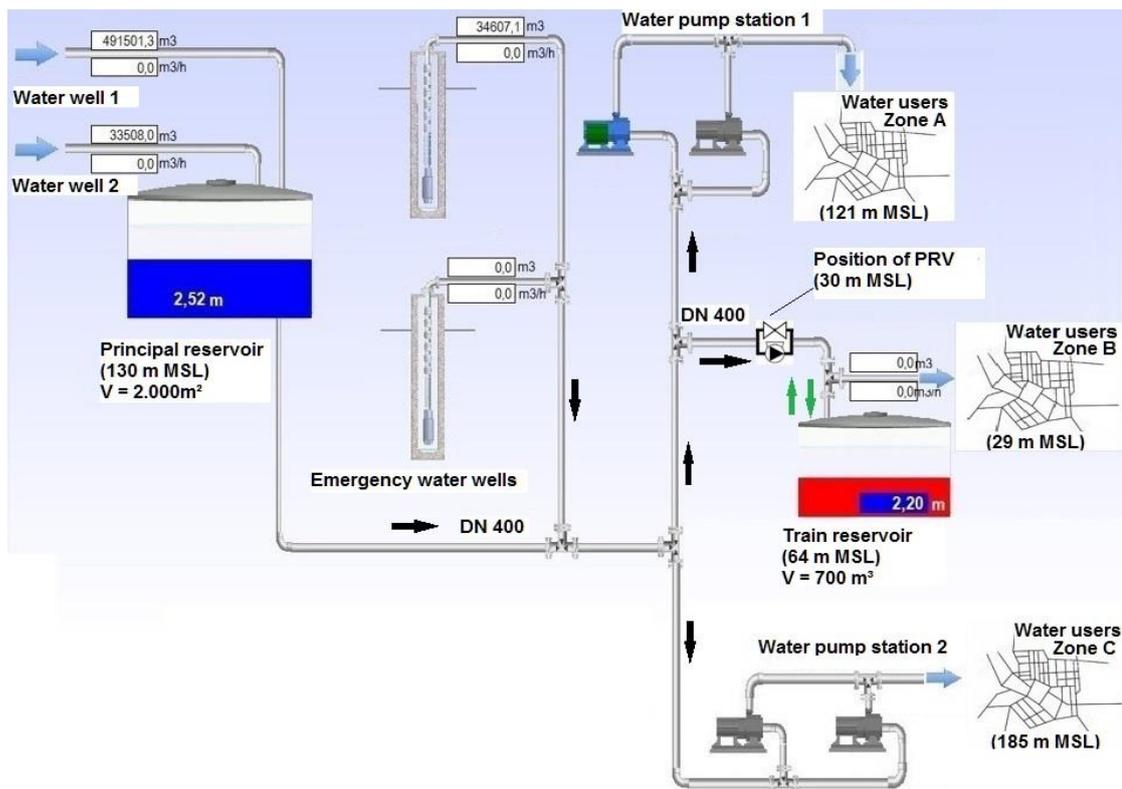


Figura 25. Diagrama sinóptico de la red de agua potable en Cártama (España)
 Fuente: Elaboración propia (2022)

La ubicación del ERT debía permitir la obtención de energía eléctrica durante el mayor tiempo posible de funcionamiento. Se decidió aprovechar una PRV existente en la arteria principal del sistema que abastecía directamente al depósito en el área poblada

de la zona B (ver esquema de distribución de agua en la Figura 24) por dos motivos: minimizar la obra civil y la infraestructura para realizar el estudio y por la disponibilidad de acceso a varias líneas de alumbrado público en las inmediaciones. Además, al contar con un depósito de cola garantizaba la continuidad del flujo de agua durante el período nocturno, cuando se necesitaba la energía para alimentar las luminarias. Se monitoreó y evaluó el caudal que circulaba previo a la instalación del ERT. Se verificó que el agua fluyó sin interrupciones las 24 h del día a través del PVR y, debido al modo de control de la instalación, alcanzó sus valores máximos durante la noche.

De esta forma, incluso sin modificaciones en la programación actual del sistema de distribución, el periodo de máxima generación de energía ya se producía durante la oscuridad, lo que reducía la capacidad de las baterías necesarias para el almacenamiento de energía y, por tanto, el coste económico global de la instalación frente a la fotovoltaica.

Se ha utilizado una unidad de micro turbina (Modelo PAT: 050-B0; Fabricante: Tecnoturbines SL) y válvulas de control y sensores que se instalaron en modo bypass con la PRV seleccionada para desviar parte del flujo total de agua hacia la turbina. Se diseñó de tal forma que una posible rotura o mal funcionamiento de la instalación experimental no perjudicara la funcionalidad ni bloqueara el servicio de abastecimiento de agua a la población.

El ERT montado en este estudio era de una potencia nominal menor respecto al máximo equipamiento posible para recuperar la energía disponible de la red. Así, todo el caudal de agua de la tubería no circulaba por el generador.

El objetivo era sacar conclusiones preliminares sin necesidad de grandes inversiones económicas, tanto en obra civil como en equipamiento. El esquema de la instalación generada se presenta en la Figura 26:

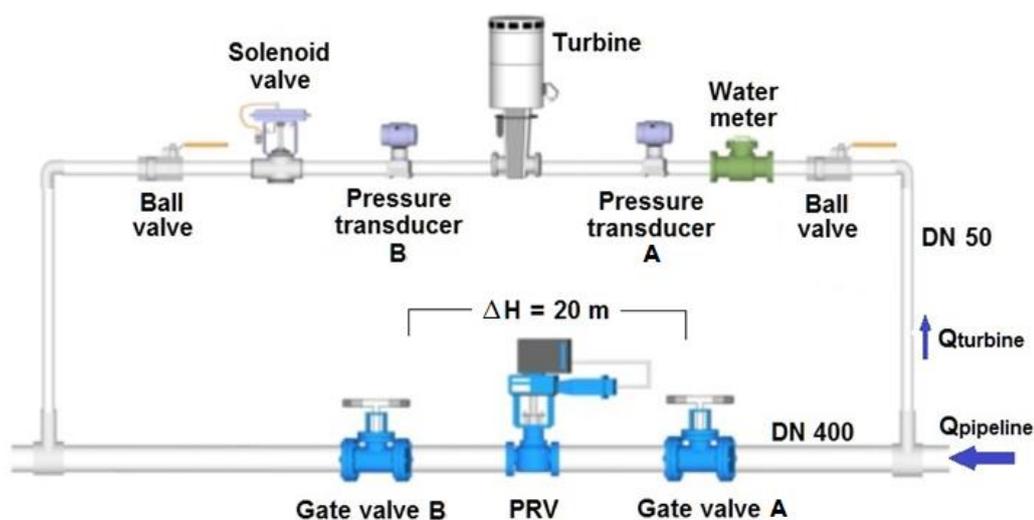


Figura 26. Esquema del bypass ERT instalado en la PRV existente
Fuente: Elaboración propia (2022)

Se seleccionó un diseño PAT hidráulico de eje vertical. Incluía dos conexiones embridadas de entrada/salida DN50 con una presión máxima permitida de 16 bar. El equipo fue diseñado para trabajar en modo turbina, con un control electrónico adjunto para regular el sistema en función de la potencia eléctrica generada.

El punto de operación nominal se logró con un caudal de 13,5 L/s y una caída de presión de 20,00 m_{H2O}. En este punto de trabajo suministraría 1,60 kW de potencia nominal teórica.

Las curvas características del equipo, trabajando como turbina, se presentan en la Figura 27.

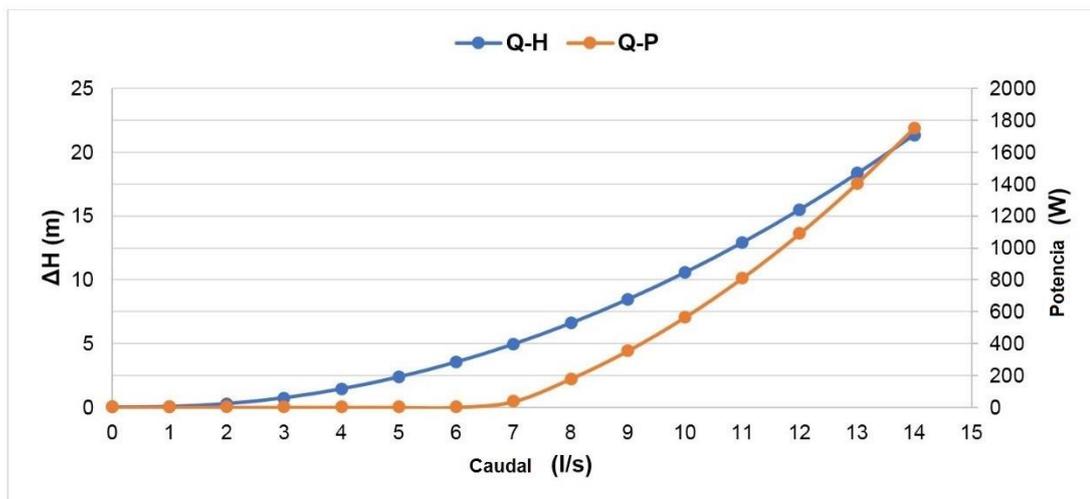


Figura 27. Curvas características de funcionamiento de la micro turbina 050-B0 obtenidas en banco de prueba por el fabricante (Tecnoturbines SL)
Fuente: Elaboración propia (2022)

En el bypass se montaron dos válvulas de bola de cierre (para facilitar la instalación y el mantenimiento), dos sensores de presión, un sensor de caudal y una electroválvula de 3 pulgadas. El último elemento permitía aumentar o reducir de forma remota el caudal que pasa por la turbina, en función de la señal recibida del regulador o unidad controladora de la instalación. En un compartimento aparte, para mantenerlo aislado de posibles fugas o entrada de agua, se instalaron los siguientes elementos:

- Un banco de baterías con una tensión nominal de 24 V_{DC} y una capacidad de 220 Ah. Se combina 2 unidades de bloques AGM de ciclo profundo de 12 V_{DC} 220 Ah libres de mantenimiento.
- Un inversor monofásico de 230 VAC/50 Hz. Permite utilizar la energía almacenada o generada para alimentar la red de alumbrado público.
- Un centro de control integrado en una caja metálica 600x600x210 mm IP66 que incluye:
 - Un regulador de carga de baterías, que se encargaba de proteger las baterías de descargas profundas, en caso de ser necesario, desconectando la carga. Además, era capaz de enviar una señal a la electroválvula para regular el caudal que circulaba por el ERT cuando

el banco de baterías estaba cargado y no había consumo en ese momento.

- Un piloto indicador de marcha y un selector de modo de funcionamiento automático/run/stop.

La Figura 28 presenta la ubicación de la PRV y todos los elementos constructivos desarrollados para instalar la ERT con sus complementos y tablero de control. La Figura 29 muestra, en detalle, la disposición física de los componentes integrados en la instalación experimental.



Figura 28. Ubicación del sistema experimental: Válvula reductora abajo a la izquierda, ERT arriba a la izquierda y panel de almacenamiento y control energía a la derecha
Fuente: Elaboración propia (2022)



Figura 29. Ubicación del sistema experimental: Válvula reductora abajo a la izquierda, ERT arriba a la izquierda y panel de almacenamiento y control energía a la derecha
Fuente: Elaboración propia (2022)

En la Tabla 7 se detalla los parámetros técnicos y coste de los componentes:

Tabla 7. Parámetros técnicos y coste de los equipos utilizados en el sistema generador
Fuente: Elaboración propia (2022)

Turbina hidráulica de eje vertical (x1)	
Modelo y fabricante	050-B0 // Tecnoturbines S.L.
Potencia nominal	1,6 kW
Diámetro de entrada y salida	50 mm
Material del cuerpo y del impulsor	Fundición gris
Caudal y presión nominal	13.5 l/s // 20,0 m _{H2O}
Eficiencia del generador	85 %
Precio por unidad (incluidos impuestos)	2.173,14 €
Módulo de batería (x2)	
Modelo y fabricante	Meba-12/20//Bornay
Tecnología	AGM
Voltaje nominal	12 VDC
Capacidad nominal (C ₁₀)	220 Ah
Capacidad útil (80% descarga)	176 Ah
Precio por unidad (incluidos impuestos)	410,00 €
Panel control ERT (x1)	
Modelo y fabricante	SN HE 000 // Tecnoturbines S.L.
Voltaje máximo	3 x 142 V
Voltaje de la batería	24 V _{DC}
Intensidad máxima de la batería	100 A
Precio por unidad (incluidos impuestos)	2.803,57 €
Inversor (x1)	
Modelo y fabricante	Phoenix 24/1600 // Victron Energy
Voltaje de entrada	24 V _{DC} (Range 19-33 V _{DC})
Voltaje de salida	230 V _{AC} - 50 Hz
Eficiencia	94%
Precio por unidad (incluidos impuestos)	813,00 €
Válvula solenoide (x1)	
Modelo y fabricante	GGG40//Hidroconta
Voltaje de entrada	12 V _{DC}
Presión nominal	0,16 Pa
Precio por unidad (incluidos impuestos)	813,00 €

Para el sistema de medida y monitorización se utilizó un registrador de datos alimentado por batería Nemos LP GPRS de Microcom con GPRS para la recogida de datos. Tiene ocho entradas digitales, cuatro entradas analógicas (configurable como estándares de 0- V_{DC}, 0-10 V_{DC} ó 4/20 mA) y cuatro fuentes de alimentación de bajo voltaje con salidas a 12/24 V_{DC}, para alimentar sondas y sensores analógicos y digitales.

Los siguientes elementos de medición se conectaron a este sistema:

- Dos transductores de presión colocados en la entrada y salida de la turbina para medir la caída de presión neta en la turbina en tiempo real.
- Un contador de pulsos (10 L/pulso) para medir el caudal impulsado por la turbina.
- Un medidor de potencia con sensor de intensidad 4/20 mA para conocer la potencia eléctrica que se está generando.

Se utilizó la aplicación web “Zeus Synoptic Builder” para supervisar la estación Nemos LP desde un navegador web. La Figura 30 incluye un diagrama del sistema ERT, como se muestra en la interfaz visual de la plataforma, que incluye todos los elementos descritos anteriormente.

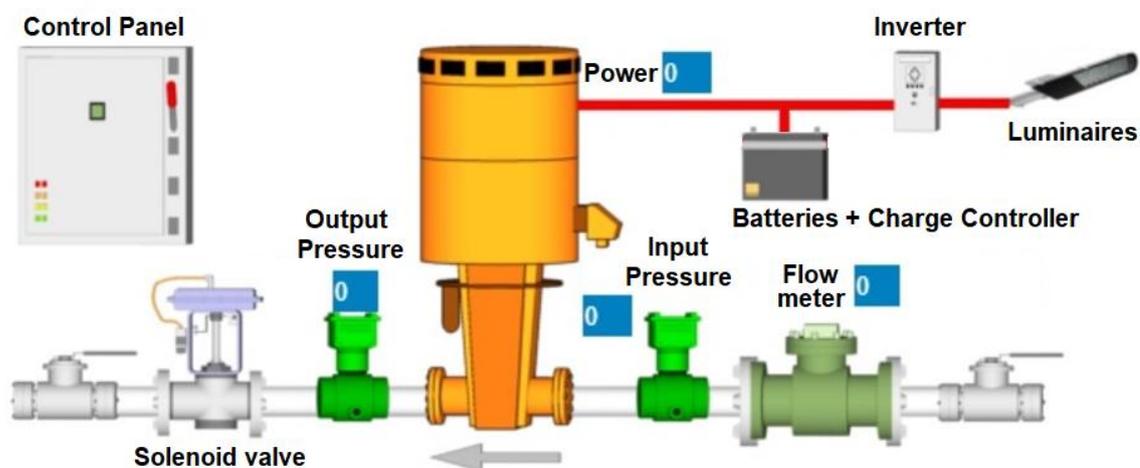


Figura 30. Esquema visual del sistema de monitorización de alumbrado público
Fuente: Elaboración propia (2022)

Se conectó una línea de alumbrado público con un trazado independiente al inversor de la instalación del cuadro de control de la micro turbina. Esto incluyó 10 luminarias LED, cada una de ellas con un consumo nominal de 40 W. Este tipo de equipos no incluían ningún tipo de sistema de atenuación programado, por lo tanto, la carga era constante y con un mismo patrón de consumo.

El caudal de agua que circula por la arteria principal donde se ubica la PRV (en la que posteriormente se realizó el bypass con la instalación de la ERT), fue monitoreada durante un año para valorar los cambios de comportamientos del flujo de agua de la red con las variaciones estacionales. Las curvas dadas en las Figuras 31 y 32 muestran cómo el ciclo de consumo de agua es periódico, repetido todos los días de manera similar. Se observa un aumento del consumo de agua en los meses de verano, alcanzándose los valores máximos absolutos en agosto (+15% sobre la media anual). Los valores más bajos se encontraron, por el contrario, en los meses de invierno, con el mínimo en enero, pero con una diferencia menor respecto a la media mensual anual (-7%). En general, el valor de caudal medio de la instalación se podría representar tomando como mes de referencia el mes de septiembre (+1% sobre la media del año).

EXPOSICIÓN DE LA INVESTIGACIÓN REALIZADA

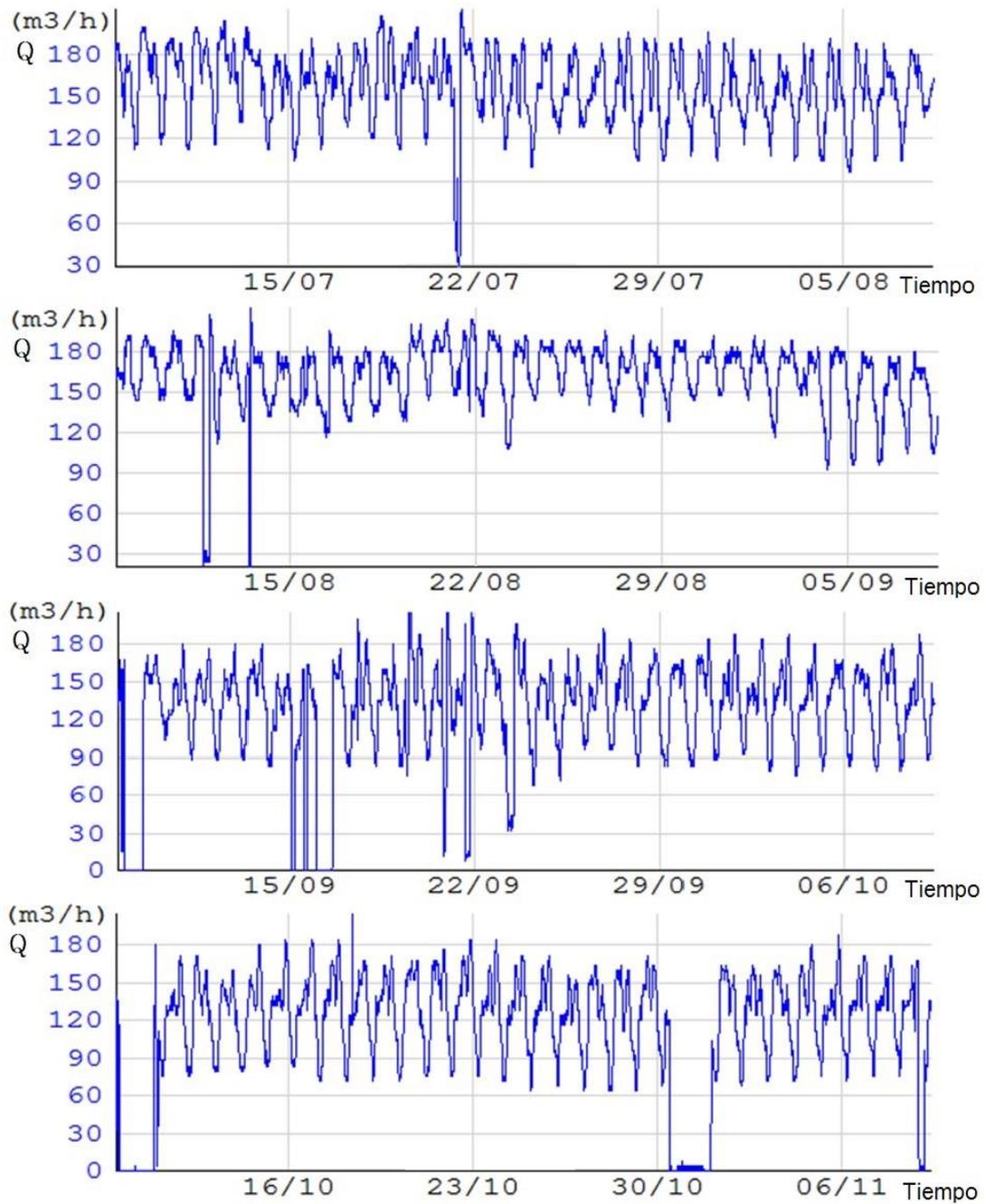


Figura 31. Curvas de caudal medidas en la PRV en los meses de julio (arriba), agosto (segundo desde arriba), septiembre (tercero desde arriba) y octubre (abajo)

Fuente: Elaboración propia (2022)



Figura 32. Detalle de la fluctuación de caudales durante el mes de septiembre.
Fuente: Elaboración propia (2022)

La Figura 33 fue creada con los datos obtenidos durante el período de caracterización, referente a una semana promedio típica. Se puede observar que el caudal efectivo de agua que circula por la turbina osciló entre los 3,0 L/s y 10,0 L/s.

Estos valores siempre fueron inferiores al caudal nominal del ERT hidráulico utilizado (13,5 L/s). El generador se instaló en un bypass con la PRV, utilizando una tubería de 50 mm de diámetro, y esta es significativamente menor que la sección de la tubería principal, con un diámetro de 400 mm.

Este flujo de agua para la recuperación de energía podría ajustarse aumentando el diámetro de la derivación; sin embargo, el experimento se realizó de esta forma para interferir lo menos posible en la confiabilidad y calidad del servicio de abastecimiento de agua a la población.

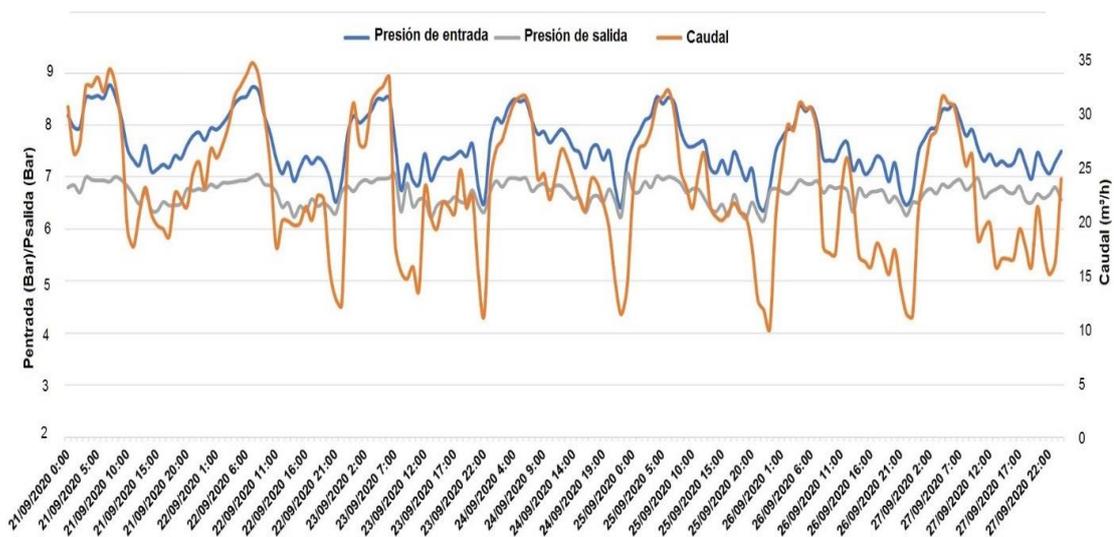


Figura 33: Detalle de la fluctuación de caudales durante una semana de septiembre.
Fuente: Elaboración propia (2022)

La información obtenida permitió presentar la energía producida en cada periodo de tiempo. Estos valores se analizan y comparan con los requisitos y los patrones de consumo de energía de la instalación de alumbrado público. Para el día de referencia elegido, la energía total producida fue de 11.176,81 W.h/d y, por otro lado, la energía total consumida por la instalación propuesta fue de 6.333,33 W.h/d. para mantener las luminarias asignadas encendidas toda la noche usado como referencia de cálculo del estudio. Ver Figura 34.

Así, Los cálculos realizados para la evaluación y dimensionamiento de la instalación de recuperación energética se han planteado utilizando un periodo diario de uso de las luminarias de 14,5 h. Esto es un poco más que la duración de la noche más larga durante el solsticio de invierno en el lugar de estudio (lo que supone el peor caso por ser el máximo consumo de energía posible generado por las luminarias). De esta forma, se analizó un caso con mayor requerimiento energético para todo el año. El consumo efectivo total medido a la salida del inversor de la instalación de alumbrado fue de 440,42 W.



Figura 34. Energía producida y consumida en un día medio de septiembre (con un consumo teórico de 14,5 h de funcionamiento del alumbrado, con la noche más larga del año como peor escenario). Fuente: Elaboración propia (2022)

5. DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS

5.1 Investigación 1: Mejora de la eficiencia energética en la red de alumbrado público basada en la conmutación de pulsos de línea eléctrica.

La instalación de prueba de campo se ha mantenido durante 2 meses, realizando periódicamente varios cambios de programa en cada una de las líneas para probar la funcionalidad, fiabilidad y duración. La Figura 12 también presenta un registro de consumo de energía de una noche de invierno donde las líneas 1 y 2 siguen un programa que tiene 5 segmentos de atenuación adaptados a la estación indicada: segmento inicial de 30 minutos al 75% de potencia, seguido de 4.5 horas al 100%, 2 horas al 75 %, 4,5 horas al 50 % y el resto del tiempo hasta el apagado al 75 %. La línea 3 se cargó con un perfil que mantiene la salida de luz en valor nominal (100%) durante toda la noche. No se ha notado ningún incidente de uso durante el tiempo que la instalación de prueba estuvo operativa.

El precio de comercialización de esta arquitectura considerando los siguientes aspectos:

- El coste de la unidad de control (componentes electrónicos, PCB y costes de montaje y cableado y embalaje de 1.000 unidades lote de producción).
- Una parte proporcional de los equipos a instalar en los cuadros eléctricos (contadores de consumo y centralita de comunicaciones) y un servidor web.
- Costes indirectos.
- Beneficio de la empresa del 40%.

No supera el valor 25,00 €/luminaria (con planes de producción mayores se puede reducir este valor).

Otra ventaja del sistema propuesto es la reducción de los costes recurrentes necesarios. Esto sucede porque la cantidad de datos de comunicación para ejecutar algunos cambios de perfiles a lo largo del año es mucho menor en comparación con los requisitos de un esquema de control y supervisión punto a punto (el software tiene menos requisitos de mantenimiento). Por ello, los costes recurrentes pueden valorarse en 5,00 €/mes x N° de Cuadros Eléctricos. Este segundo tipo de reducción de costes tiene una mayor capacidad de ahorro que la obtenida con el hardware. En un período de expectativa de vida útil de 20 años, la reducción del costo del hardware es de 25,00 €/luminaria, mientras que el valor relacionado con los costos recurrentes es de (180,00 €/año/50 luminarias - 60,00 €/año/50 luminarias) x 20 años = 48,00 €/luminaria.

Para cubrir el peor de los casos, estudiamos el período de ROI de esta solución en la Tabla 8 considerando un precio unitario de 30 € configurado en las mismas condiciones que la instalación de referencia utilizada para soluciones de RF o PLC. En ambos casos, las unidades de control RF/PLC o el circuito propuesto se conectan al controlador a través de un puerto de atenuación de 0-10V. El período de retorno de la inversión se reduce de 13,3 años a 4,34 años (aproximadamente 3 veces menos y esta diferencia se puede mejorar con lotes de producción más grandes para reducir

costos). Este nuevo periodo obtenido está en el mismo rango que el que da una tecnología de iluminación convencional a las inversiones de renovación LED punto a punto haciendo que ambas inversiones sean igualmente rentables.

Tabla 8. Cálculo del ROI de la arquitectura de comunicación de conmutación de potencia de alumbrado público y eliminando la factura recurrente.

Fuente: Elaboración propia (2022)

Reducción del consumo eléctrico		Prolongación de la esperanza de vida	
Horas de trabajo equivalentes a través de la regulación	3.100 h/año		(1- (3.100h/año) / (4.300h/año)) x 125
AHORROS	((4.300h-3,1=00h) x 50W x 0,11 €/kWh) / 1.000 =	AHORROS	€/luminaria =
	6,60 €/año y luminaria		= 34,88 € en 23 años →
			1,51 €/año y luminaria
AHORROS TOTALES		6,60 + 1,51 = 8,11 €/año y luminaria	
ROI		30 € por luminaria / (8,11 €/año	
Costo de hardware / (Ahorros + Costos recurrentes)		por luminaria - 60 €/año / 50 luminarias)	4,34 años

Por último, cabe señalar que la arquitectura de este sistema permite su instalación en un modo *stand-alone*, sin ningún tipo de control externo o centralizado, en lugar de las CPU electrónicas de las luminarias. La configuración Los pulsos de potencia pueden ejecutarse manualmente con un reloj o un cronómetro por un operador humano que se ha desplazado al cuadro eléctrico para un cambio de perfil de temporada o una actuación especial. En este caso, la funcionalidad se mantiene sin control telemático, lo que reduce significativamente el costo del hardware y eliminando la factura recurrente.

5.2 Investigación 2: Adaptación de una instalación de alumbrado exterior fotovoltaico centralizado aislado para mejorar la garantía del servicio en latitudes tropicales altas.

Esta instalación se ha montado y probado exhaustivamente su comportamiento real durante seis meses (diciembre y marzo), abarcando las temporadas de invierno y primavera para ver las discrepancias de la situación real con el cálculo estimado. Se encontró un rendimiento efectivo inferior al esperado, lo que ahondaba aún más en el déficit energético de la instalación.

Se han expuestos dos líneas de trabajo para cubrir el déficit energético. El primero se basa en mejorar la eficiencia global del sistema haciendo que todo el sistema funcione en SELV, reduciendo el número de componentes (el inversor) y las pérdidas en las conversiones eléctricas. En esta situación, un equipo de iluminación autónomo con sistemas fotovoltaicos no es fiable en los meses de invierno, lo que provoca el apagado repentino del sistema durante la noche.

En este trabajo se ha evaluado el dimensionamiento teórico de una instalación, no para el peor de los casos (invierno) sino para la situación media de los equinoccios de primavera/otoño.

Además, en este caso, y sin entrar en valorar una posible mejora de la eficiencia de las cargas (como un cambio a tecnología LED), se puede conseguir una mejora de la eficiencia del 15% aumentando parcialmente la sección de parte del cableado.

Tras este primer experimento se repitió con una segunda línea de trabajo, mediante la integración de los sistemas electrónicos de regulación programados con un sólo paso de regulación. Se programó una regulación del nivel de brillo del 70% para que se active al alcanzar un valor de voltaje de batería de 24 V_{DC}. Este valor supone, aproximadamente, un 50% de la energía total que se puede almacenar. Con esta configuración el sistema ha aguantado 105 horas antes de volver a alcanzar la profundidad de descarga de las baterías (ver Figura 23), esto es un 40% más de tiempo de operación activa respecto a la experiencia anterior sin la arquitectura de control.

5.3 Investigación 3: Instalación experimental de alumbrado público alimentado por turbina hidráulica instalada en la red de abastecimiento de agua

Con base en los datos generados, se establecieron como valores promedio de operación de la red de distribución de agua los medidos el 21 de septiembre de 2020. Bajo esta premisa de evaluación, se discutirán los siguientes aspectos del experimento: la eficiencia de conversión de energía alcanzada y la evaluación de la idoneidad de la instalación experimental; cálculo de la carga máxima que se puede alimentar con confiabilidad bajo las premisas de esta obra y la capacidad de batería requerida; la comparación de la instalación propuesta con su equivalente alimentada con módulos fotovoltaicos, prestando especial atención a las necesidades adicionales de capacidad de almacenamiento de energía para dar garantía del servicio y los costes asociados que implica y, finalmente, los resultados de extrapolar toda la energía recuperable de la instalación de distribución de agua si el flujo total de la tubería principal se deriva de la PRV y se conduce a la ERT.

Los cálculos realizados para la evaluación y dimensionamiento de la instalación de valorización energética se han realizado utilizando un periodo diario de uso de las luminarias de 14,5 h. Esto es un poco más que la duración de la noche más larga durante el solsticio de invierno en el lugar de estudio (peor caso). De esta forma, se analizó un caso con mayor requerimiento energético para todo el año. El consumo efectivo total medido a la salida del inversor de la instalación de alumbrado fue de 440,42 W.

La energía producida en la instalación se obtiene de la ecuación 3:

$$P = \eta x (\rho x g x \Delta H) x Q \quad (3)$$

P: Potencia generada [W]

η : Rendimiento global del sistema. $\eta = \eta_{\text{eléctrico}} \times \eta_{\text{hidráulico}}$

ρ : Densidad el agua $\rho = 1.000 \text{ [kg/m}^3\text{]}$

g : Gravedad $g = 9.81 \text{ [m/s}^2\text{]}$

ΔH : Salto de presión en la turbina o caída de presión en la PRV [m]

Q : Caudal de agua que atraviesa la turbina [m^3/s]

El valor real promedio del rendimiento global obtenido para la fecha de referencia fue del 58 % (inferior al 59,5% indicado por el fabricante). Esto se debe a que la ERT estaba trabajando con un caudal de agua inferior al valor nominal de la turbina.

Para establecer el número máximo de luminarias que se podían alimentar con una determinada instalación ERT, era necesario conocer la energía máxima que se podía generar con el caudal diario de agua. Con la información obtenida de la Figura 35, igualando el área de la energía producida con la potencia demandada multiplicada por un periodo de 14 h 30 min (que fue el periodo máximo de funcionamiento de la instalación de alumbrado para hacer un diseño de cálculo conservador para el peor de los casos escenario), se podría obtener un valor equivalente a la potencia media generada por hora de uso. En nuestro caso el valor obtenido fue de 770.81 W (Ver Ecuación (4)), teniendo en cuenta que las cargas de iluminación fueron un valor constante.

$$\begin{aligned} \Sigma E_{generada} &= P_{m\acute{a}xima} \times t_{encendido} \rightarrow P_{m\acute{a}xima} = 11.176,81 \text{ W} \cdot h / 14,5 \text{ h} \\ &= 770,81 \text{ W}. \end{aligned} \quad (4)$$

En este punto se puede realizar el cálculo de la capacidad del rack de baterías necesario. Se tuvo en cuenta la necesidad de establecer un balance neto de los consumos totales y la capacidad de generación en el sistema para tener energía disponible para el requerimiento total de las luminarias durante su periodo de iluminación. Para realizar este cálculo se utilizó un método gráfico basado en el cálculo de volúmenes de almacenamiento.

En un gráfico se detalla la energía acumulada consumida y generada a lo largo del tiempo en el periodo de cálculo, y se establecieron todos los puntos de máximo déficit y máximo excedente de energía. El volumen de almacenamiento es la suma de los valores absolutos de todos estos máximos, según la Ecuación (5).



Figura 35. Energía producida y consumida en el día medio de generación y cálculo de la transposición de toda la energía generada a las horas nocturnas de uso
Fuente: Elaboración propia (2022)

Se instaló una capacidad de batería de 220,0 Ah. Para trabajar con suficiente margen de seguridad (+60%) para días de baja generación de energía y para usar modelos de baterías comerciales estandarizados. Nunca se registró una avería del sistema por falta de energía en la instalación con esta puesta en marcha durante un periodo de control de 12 meses de funcionamiento del sistema.

$$Capacidad\ batería = \sum_{i=1}^n E_{m\acute{a}x.excentte} + \sum_{j=1}^m E_{m\acute{a}x.d\acute{e}ficit} \quad (5)$$

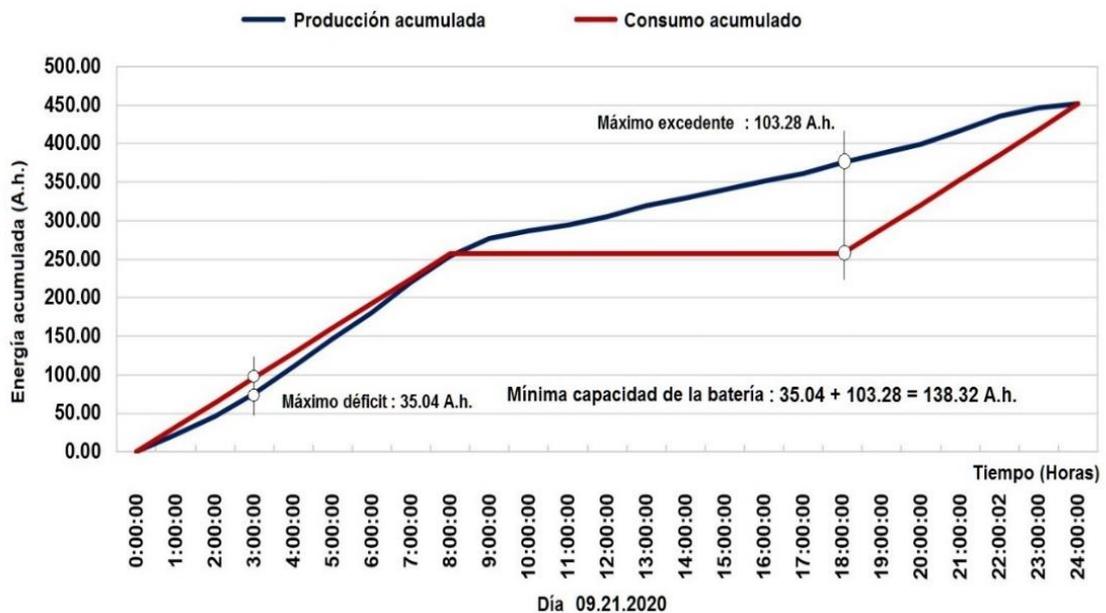


Figura 36. Balance de energía neta disponible (generada vs. consumida) y aporte de energía suplementaria almacenada en baterías para un balance siempre positivo
Fuente: Elaboración propia (2022)

De este modo, se obtuvo la capacidad de almacenamiento de energía utilizando una ERT ajustada al caudal promedio de la instalación de distribución de agua utilizada. Si planteamos, para las mismas necesidades de consumo, una instalación fotovoltaica autónoma con una potencia equivalente, podemos comparar los diferentes requisitos resultantes.

El método utilizado para establecer estas necesidades de capacidad de los acumuladores para atender a la misma instalación de alumbrado objetivo se basó en el cálculo de las necesidades energéticas totales de las cargas de la instalación para luego establecer el número de paneles fotovoltaicos y celdas de batería con capacidad para mantener un funcionamiento pleno durante un número de días de autonomía, determinado por la estacionalidad. condiciones requeridas en el diseño. En nuestra localidad, 3 días de autonomía aseguraban un mínimo suficiente de confiabilidad del servicio, considerando posibles adversidades climáticas. Los datos de cálculo, las ecuaciones de referencia y los resultados obtenidos, considerando que toda la energía consumida necesaria debe ser almacenada, fueron los siguientes:

$$P_{\text{cargas}} = 770,81 \text{ W}; t_{\text{encendido}} = 14,50 \text{ h/d}; V_{\text{almacenamiento}} = 24 \text{ V}_{\text{DC}}; \eta_{\text{inversor}} = 0,9; \eta_{\text{conductores}} = 0,98; \eta_{\text{baterías}} = 0,9$$

$$E_{\text{consumida}} = (P_{\text{cargas}} \times t_{\text{cargas}} / V_{\text{almacenamiento}}) \times \eta_{\text{inversor}} = (770,81 \text{ W} \times 14,5 \text{ h} / 24 \text{ V}_{\text{DC}}) \times 0,9 = 517,44 \text{ Ah/d}$$

$$E_{\text{corregida}} = E_{\text{consumida}} / (\eta_{\text{conductores}} \times \eta_{\text{baterías}}) = 517,44 \text{ Ah/d} / (0,98 \times 0,90) = 586,67 \text{ Ah/d}$$

$$\text{Capacidad de la batería} = (N^{\circ} \text{ días} \times E_{\text{corregida}}) / (\text{Prof. Máx. de descarga} \times T_{\text{factor de corrección}})$$

$$\text{Capacidad de la batería} = (3 \text{ d} \times 586,67 \text{ Ah/d}) / (0,85 \times 0,80) = 2588,24 \text{ Ah}$$

Así, los criterios de diseño indicados, se requieren 2 ramas paralelas en paralelo, con 12 baterías en serie de 12 V_{DC} y C220 Ah, lo que hizo un total de 24 baterías (22 unidades más que ERT). La comparativa de los requisitos de sistemas de energía para los dos tipos de soluciones se presenta en la Tabla 9.

Tabla 9. Ahorro económico en costes de capacidad de almacenamiento de energía para generadores ERT y FV equivalentes para instalaciones de alumbrado público

Sistema de generación de energía	Requisitos de almacenamiento de energía (24 V _{DC})	Módulos de batería C220 Ah (12 V _{DC})	Coste total de las baterías
ERT	138,32 Ah	2 unidades	820,00 €
Módulos FV	2588,24 Ah*	24 unidades	9.840,00 €
	Ahorro económico		9.20,00€

* Capacidad necesaria para operar durante tres días sin generación de energía. Considerando Carga = 770,81 W; Tiempo de funcionamiento diario: 14,5 h; Precio Batería (1módulo C220 Ah 12 V_{DC}): 410€.

A partir de los datos obtenidos se realizó una extrapolación de los valores de un equipo de recuperación equivalente dimensionado para recuperar la máxima cantidad de energía eléctrica.

Para llevar a cabo este proceso se aplicaron las siguientes consideraciones:

- Utilizar el caudal medio total de agua de la tubería principal donde está instalado el PVR (sección de 400 mm de diámetro) de los datos medidos para el mes de septiembre.
- Se elige un equipo ERT apropiado para esta cantidad de flujo, que funcione con un rendimiento óptimo con una caída de presión de $\Delta H = 20 \text{ m}_{\text{H}_2\text{O}}$. Esto significa una turbina con una $P_{\text{nominal}}=6,00 \text{ kW}$.
- Evaluar la energía máxima recuperable y estimar los costos de instalación tanto de la turbina (junta a la PVR) como de los módulos para el control de la instalación y el almacenamiento de la energía.
- Estimar costos de obras civiles y de construcción.
- Incluir un período de 3,33 años de renovación de las baterías, tras el cual es necesario su recambio preventivo
- Costes anuales de mantenimiento.
- Obtención del *Payback* y Tasa Interna de Retorno a 10 años (TIR).

Estos resultados se presentan en la Tabla 10.

Tabla 10. Desarrollo de la instalación ERT para recuperar toda la energía reducida en la PRV de la red de agua estudiada. Fuente: Elaboración propia (2022)

Inversión inicial	
Equipamiento (ERT + baterías + caja de control e impuestos)	8.800,00 €
Instalación hidráulica	1.500,00 €
Conexión eléctrica	1.200,00 €
Obras civiles	5.000,00 €
Puesta en marcha	1.000,00 €
Datos técnicos y económicos	
Potencia nominal	6,00 kW
Producción (horas/año)	8.322,00 horas
Energía anual producida	49.932,00 kW.h
Precio de la energía (Red CA)	0,13 €/kW.h
Ahorro anual (Electricidad)	6.491,16 €
Período de renovación de las baterías	3,33 años
Coste de mantenimiento anual	390,00 €
Rentabilidad del proyecto	
Incremento anual de los precios	2%
<i>Payback</i>	3,79 años
Tasa Interna de Retorno (10 años)	24%

6. CONCLUSIONES

CONCLUSIONES PRIMERA LÍNEA DE INVESTIGACIÓN:

De la primera línea de investigación concluimos con la mejora de la eficiencia energética en las instalaciones de alumbrado público. Las Administraciones Públicas están realizando grandes inversiones en la renovación de sus instalaciones de alumbrado exterior para mejorar su rendimiento y, en mayor medida, obtener importantes ahorros energéticos. Así, buscan optimizar la sostenibilidad económica y social de las nuevas implementaciones. Cambiar luminarias antiguas por nuevos puntos de luz basados en tecnologías energéticamente eficientes como los LEDs es la propuesta de actuación en curso más extendida. Sin embargo, proyectar sistemas de control ayuda a conseguir un mayor ahorro energético y mejorar la capacidad de gestión y la funcionalidad de regulación. Las arquitecturas de control más comunes que se encuentran en el mercado requieren de un sistema de transmisión de datos punto a punto. Ofrecen grandes posibilidades de control, pero también son complejos y costosos, aumentando significativamente el coste económico total del proyecto, incluida su implementación, con grandes ROI que reducen la rentabilidad de la inversión (aprox. 13,3 años). En consecuencia, no son una opción de inversión sostenible y sólo las instalaciones significativas y de gran relevancia social son aptas para ser adaptadas con este tipo de sistemas, donde la mejora de la funcionalidad prima sobre criterios de sostenibilidad energética o económica.

Por otro lado, en este trabajo hemos presentado una arquitectura que ofrece la posibilidad de generar y modificar el comportamiento de una instalación de iluminación con diferentes perfiles de regulación de regulación seleccionables entre varias opciones precargadas sin un bus de comunicación específico o capa física de comunicación. Esta solución ofrece una solución flexible que permite cambios significativos en el perfil de regulación para adaptar la instalación a cambios de estación, cambios de horario, festividades o eventos sociales especiales, que no pueden ser tratados adecuadamente con controladores con perfiles de regulación predefinidos o sistemas de salida de iluminación constante (CLO).

Esta arquitectura solo requiere que se agregue a las luminarias un circuito electrónico digital simple que sea capaz de contar el tiempo y generar una entrada de control de controlador de luminaria estándar (es decir, 0-10 V_{DC}). Esta solución de bajo costo permite su implementación sin aumentar el ROI de la inversión de renovación de la instalación de iluminación (aprox. 4,3 años), y es adecuada para el sector urbano o rural, donde no se requiere un control específico punto a punto (la mayoría de los casos).

Se presenta una propuesta de implementación indicando las limitaciones técnicas encontradas para optimizar su desempeño. Esta es una solución muy robusta, ya que no requiere ningún condensador electrolítico ni ningún otro componente de vida útil limitada. Se ha montado y analizado una instalación de campo que muestra el ahorro

energético conseguido con esta técnica junto con la flexibilidad para adaptar el perfil de regulación de esta instalación a cualquier requerimiento puntual.

Hay lugar para la mejora de la capacidad de comunicación de la arquitectura utilizando varios ciclos de potencia consecutivos para codificar datos que pueden ampliar el tipo de información distribuida: direcciones para transmisión de datos de luminarias individuales, rutinas para modificar perfiles una vez que las luminarias ya están instaladas.

CONCLUSIONES SEGUNDA LÍNEA DE INVESTIGACIÓN

De la segunda línea de investigación se defiende la integración de un sistema de gestión electrónico para regular el consumo de las luminarias en los casos en que la energía almacenada descienda a niveles que puedan comprometer la parada de la instalación. Esto permite mejorar el tiempo de funcionamiento de una instalación de iluminación aislada con varios puntos de luz al reducir el consumo energético de las cargas a altas horas de la noche. Esta reducción se ha realizado de forma progresiva para que el ojo humano no perciba fácilmente el proceso de oscurecimiento.

Este sistema permite generar un comportamiento no lineal del sistema, encendiendo las luminarias a máxima intensidad en verano obteniendo la máxima disponibilidad energética y regulando la luminosidad de las lámparas en invierno con la mínima capacidad de captación de radiación solar. Los resultados de la prueba mostraron que el controlador diseñado funciona según lo diseñado. Las horas de funcionamiento del sistema de nuevo diseño, en comparación con el sistema convencional, implementa un solo paso de atenuación. La implementación de instalaciones de alumbrado autónomo basadas en generación fotovoltaica en latitudes alejadas del ecuador son costosas y complejas debido a la necesidad de usar baterías para sostener el consumo durante la noche y, también, a la alta discrepancia entre la duración del día y la noche en verano e invierno que repercute no sólo en la energía que se puede generar sino también en el aumento del consumo energético que supone el mayor número de horas nocturnas. En realidad, un sistema que no falla en las condiciones más adversas necesita ser sobredimensionado hasta casi triplicar los costos de una instalación equivalente ubicada en el ecuador. Se ha analizado de forma particular el porcentaje del peso de las baterías en nuestro modelo de instalación, alcanzando un valor en torno al 70%.

CONCLUSIONES TERCERA LÍNEA DE INVESTIGACIÓN

En la tercera línea de trabajo se ha justificado y probado un sistema de generación de energía eléctrica renovable, mediante la recuperación de energía que se pierden en las válvulas reguladores de presión (PRV), para alimentar una instalación de alumbrado público.

Para demostrar y evaluar la viabilidad y eficacia del sistema, el caudal de agua disponible en una arteria de la red de abastecimiento de agua potable, fue monitoreado y analizado en profundidad durante más de un año. Luego se instaló una ERT en una

CONCLUSIONES

de las PRV de la red, mediante un *by-pass* con la micro turbina hidráulica, con objeto de no alterar las condiciones normales de explotación de la red.

Se instaló, además, un sistema de control, un módulo de batería y un inversor para alimentar una línea eléctrica de luminarias. Esta instalación experimental demostró que se requiere poco espacio físico para llevarla a cabo, y que la obra civil tiene escasa entidad constructiva. Se ha detallado una valoración económica de todas las partidas de obras requeridas.

Esta metodología se adapta de forma óptima a las conducciones de las redes de abastecimiento de agua donde se utilizan depósitos de cola, ya que se garantiza un caudal de agua continuo, que permite generar energía las 24 h del día, sin períodos muertos (salvo posibles fallos de la red general de agua). Además, es posible concentrar la mayor parte del transporte de agua, y por tanto la generación de energía, de forma programada durante la noche, que es cuando se requiere la energía eléctrica para la instalación de alumbrado público.

Todas estas posibilidades reducen significativamente la necesidad de dispositivos de almacenamiento de energía con un sistema ERT, que requiere, comparativamente, un 1200 % menos de capacidad de almacenamiento de energía que una solución equivalente basada en generadores fotovoltaicos. Esto implica consecuentemente grandes reducciones en el presupuesto económico, consiguiendo soluciones viables con periodos de recuperación inferiores a 4 años.

Desde el punto de vista de la sostenibilidad, el sistema propuesto recupera energía con una eficiencia superior al 58% de una fuente que se está desperdiciando totalmente de forma recurrente en la mayoría de las instalaciones de agua de todo el mundo, creando una fuente renovable muy constante, fiable y, a priori, inagotable.

El sistema ha estado operando durante 12 meses sin presentar ningún tiempo de inactividad, ya sea por falla de componentes o por falta de energía para atender la demanda de la línea de luminarias involucradas en la prueba. Por lo tanto, este estudio a largo plazo ha generado evidencia de la viabilidad técnica y económica y la confiabilidad de la implementación de ERT. Además de esto, el procedimiento desarrollado proporciona a los administradores municipales y de servicios públicos de agua una base mejor informada para la gestión de la presión y la toma de decisiones de recuperación de energía

CONCLUSIONES GENERALES Y APORTACIONES DE LA TESIS DOCTORAL:

El incremento de la eficiencia energética es determinante para conseguir una reducción del consumo de energía que contribuya alcanzar los objetivos de la Unión Europea de reducción del consumo de energía y de emisiones.

Para conseguir la descarbonización del sistema energético es necesario aumentar su electrificación, mediante la generación de energía eléctrica a partir de fuentes renovables. Es necesario aprovechar nuestro potencial renovable autóctono y aumentar así el grado de autoabastecimiento. Hemos demostrado que con la

participación activa de Gobiernos Locales se puede avanzar hacia ciudades más sostenibles (objetivos ODS).

Para ello las Administraciones Públicas tienen que desempeñar un papel importante, de modo que incidan en modelos de generación de energía eléctrica y modos de consumo que mejoren la eficiencia energética en sus infraestructuras, favoreciendo así la reducción del consumo de energía y de emisiones.

El objetivo que nos propusimos en el inicio de esta tesis, de mejorar la eficiencia energética y generar energía eléctrica renovable en infraestructuras municipales, se ha logrado. Se ha establecido propuestas, verificadas experimentalmente desde el punto de vista de la capacidad de generación, eficiencia, robustez y fiabilidad, que pueden reproducirse o adaptarse a otros municipios para avanzar en el objetivo global de conseguir o acercar la existencia de Administraciones locales con consumo energético (casi) nulo.

7. LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN FUTURAS

Como en cualquier otro trabajo de investigación que contribuye a aportar conocimiento sobre el tema que trata, este genera, de manera simultánea durante el desarrollo del mismo, nuevas líneas de investigación para futuros estudios.

En este apartado se exponen las posibles líneas de trabajo que pueden continuar el desarrollo de los objetivos desarrollados y que suscitan un interés más relevante a juicio tanto del doctorando como de los tutores de esta tesis. De manera resumida, estas líneas son:

- 1) Desarrollo del estudio técnico y económico de implantación de celdas microbianas de electrólisis en las estaciones depuradoras de agua municipales. Esta alternativa debe permitir generar energía eléctrica, continua y con una tasa muy de rendimiento muy constante de manera eficiente a partir de los procesos de depuración de las aguas residuales que se generan en la vida cotidiana de un ayuntamiento y sus núcleos poblacionales. Esta es otra de las instalaciones comunes de núcleos urbanos que, siendo a priori centros puros de consumo de energía, de cara a satisfacer necesidades de la población, pueden convertirse en instalaciones autosuficientes e, incluso, de balance energético positivo. Esto puede demostrarse como otra etapa en el camino hacia una administración de consumo cero, con las perspectivas, al igual que la generación a partir del excedente de presión del agua, una fuente poco fluctuante a diferencia de la mayoría de fuentes renovables.
- 2) Estudio de generación distribuida de energía eléctrica a escala local, mediante fuentes de energías renovables. En estas dependencias de carácter municipal es posible establecer procedimientos técnicos estandarizados de evaluación de rendimiento, financiación e instalación de diferentes instalaciones: placas fotovoltaicas; instalación de turbinas hidráulicas en los distintos de entrada de la red de abastecimiento de agua potable y en las salidas de aguas residuales grises; implantación de plantas de biomasa, aerogeneradores, Cada una de estas fuentes de energías se localizarían en los puntos óptimos y, en caso de ser necesarios, distribuidas a lo largo de la geografía del municipio y de la geometría propia de cada edificio. La energía eléctrica obtenida se usaría directamente a las infraestructuras municipales (edificios, alumbrado, etc.), en lugar de inyectarla en la red general de distribución, de manera local o mediante la generación y uso de red locales propias de distribución entre estos puntos de generación de energía y los puntos de consumo (banco de baterías, otras infraestructuras municipales).
- 3) Incluir la implantación de generadores de energías desde fuentes renovables en los nuevos procesos de desarrollo urbanístico de los municipios mediante la ampliación de las atribuciones de la Entidades de Conservación Urbanísticas que les permita constituirse o actuar como comunidades energéticas. Esto se

puede hacer fácilmente, incluyendo en los instrumentos urbanísticos la obligación de disponer de suelos dotacionales que permita implantar energías renovables.

Para ello sería necesario la modificación del Real Decreto 2159/1978, de 23 de junio, por el que se aprueba el Reglamento de Planeamiento para el desarrollo y aplicación de la Ley sobre Régimen del Suelo y Ordenación Urbana.

También es preciso la modificación de la actual Ley 7/2021, de 1 de diciembre, de impulso para la sostenibilidad del territorio de Andalucía (LISTA).

- 4) Con el objetivo de lograr el compromiso de Emisiones Cero, es imprescindible conocer el impacto ambiental generado por la implantación de las medidas de ahorro energético y energías renovables. Por lo tanto, se propone como otra línea de investigación, la realización de dicho Impacto Ambiental, en términos de kilogramos de dióxido de carbono equivalente ($\text{Kg CO}_2 \text{eq}$).

8. BIBLIOGRAFÍA

1. Alberizzi, J.C.; Renzi, M.; Nigro, A.; Rossi, M. (2018). Study of a Pumps-as-Turbina (PaT) speed control for a Water Distribution Network (WDN) in South-Tyrol subjected to high variable water flow rates. *Energy Procedia*(148), 226-233. doi:<https://doi.org/10.1016/j.egypro.2018.08.072>
2. Bacha, S.; Picault, D.; Burger, B.; Etxeberria-Otadui, I.; Martins, J. (2015). Photovoltaics in Microgrids: An Overview of Grid Integration and Energy Management Aspects. *IEEE Ind. Electron. Mag.*(9), 33-46.
3. Baregheh, A., Rowley, J., & Sambrook, S. (2009). Towards a multidisciplinary definition of innovation. *Management decision*, 47(8), 1323-1339. doi:<https://doi.org/10.1108/00251740910984578>
4. Beccali, M.; Bonomolo, M.; Ciulla, G.; Galatioto, A.; Lo Brano, V. (2015). Improvement of Energy Efficiency and Quality of Street Lighting in South Italy as an Action of Sustainable Energy Action Plans, The Case Study of Comiso (RG). *Energy J.*(92), 394-408.
5. Bronomano, A.; Calise, F.; Viadomini, M. (2016). Desing, Simulation and Experimental Investigation of a Solar Based on PV Panels and PVT Collectors. *Energies*(9), 497.
6. Corcoran, L.; Coughaland, P.; McNabola, A. (2013). Energy recovery potential using micro hydropower in water supply networks in the UK and Ireland. *Water Sci. Tech. Water Supply*(13), 552-560. doi:<https://doi.org/10.3390/w9020097>
7. Cucchiella, F.; D'Adamo, I.; Gastaldi, M. (2016). Photovoltaic energy systems with battery storage for residential areas: An economic analysis. *J. Clean. Prod.*(131), 460-474.
8. Daely, P.T.; Bajju, S.G.; Kim, J.W.; Jang, Y.; Kim, D.P.; Shin, S.Y. (2017). Wireless LED Streelight Platform with Wather Monitoring and Color Temperature Control System. *J. Korean Inst. Commun. Inf. Sci.*(42), 1038-1046.
9. (2017). *Energy Technology Perspectives*. International Energy Agency. Recuperado el 20 de Agosto de 2021, de http://dx.doi.org/10.1787/energy_tech-2017-en
10. European Comission. (2018). Recuperado el 30 de Diciembre de 2020, de https://ec.europa.eu/jcr/sites/jrcsh/files/pv_status_report_2018_online.pdf
11. European Commission. (2019). Recuperado el 19 de Agosto de 2021, de Clean Energy for all Europeans Package: https://ec.europa.eu/energy/topics/energy-strategy/clean-energy-all-europeans_en
12. Faranda, R.; Hafezi, H.; Leva, S.; Mussetta, M.; Ogliari, E. (2015). The Optimum PV Plant for a Giver Solar DC/AC Converter. *Energies*(8), 4853-4870.
13. Fontanella, S.; Fecarotta, O.; Molino, B.; Cozzolino, L; Della Morte, R. (2020). A Performance Prediction Model for Pumps as Turbines (PATs). *Water*(12), 1175. doi:<https://doi.org/10.3390/w12041175>
14. *Fundación Bioplanet París*. (2015). Obtenido de <https://paris2015cop21.org/que-son-bonos-carbono/>

15. Gaffney, O., & Steffen, W. (April de 2017). The Anthropocene equation. *The Anthropocene Review*, 4, 53-61. doi:doi.org/10.1177/2053019616688022
16. Gago-Calderón, A.; Orejón-Sánchez, R.D.; Hermoso-Orzáez, M.J. (2018). DC Network Indoor and Outdoor LED Lighting,. *Chapter Metrics Overview*. doi:10.5772/intechopen.74974
17. (2021). Global Market Outlook For Solar Power 2021-2025. Brussels, Belgium.
18. Group, N. (2015). Global LED and Smart Street Lighting: Market Forecast (2015-2025). Northeast Group, Washington, DC, USA.
19. Gutiérrez-Escolar, A.; Castillo-Martínez, A.; Gómez-Pulido, J.M.; Gutiérrez-Martínez, J.M.; Stacic, Z.; Medina-Merodio, J.A. (2015). A Study to Improve the Quality of Street Lighting in Spain. *Energies*(8), 976-994.
20. Howard, T. J., Culley, S., & Dekoninck, E. (2008). Describing the creative design process by the integration of engineering design and cognitive psychology literature. *Design studies*, 29(2), 160-180. doi:https://doi.org/10.1016/j.destud.2008.01.001
21. Huang, B.J.; Wu, M.S.; Hsu, P.C.; Chen, J.W.; Chen, K.Y. (2010). Development of high-performance solar LED lighting system. *Energy Convers. Manag.*(51), 1669-1675.
22. Inés Sánchez de Madariaga y Javier Benayas del Álamo. (2020). *REDS 2020. Los ODS en 100 ciudades españolas*.
23. Jagerbrand, A. (2016). LED (Light-Emitting Diode) Road Lighting in Practice: An Evaluation of Compliance with Regulations and Improvements for Further Energy Savings. *Energies*(9), 357.
24. Kiwan, S.; Abo Mosali, A.; Al-Ghasem, A. (2018). Smart Solar-Powered LED Outdoor Lighting System Based on the Energy Storage Level in Batteries. *Buildings*(8), 119.
25. Kovacs, A.; Batai, R.; Csaji, B.C.; Dudas, P.; Hay, B.; Pedone, G.; Revesz, T.; Vaneza, J. (2016). Intelligent control for energy-positive street lighting. *Energy J.*(114), 40-51.
26. Kuhlman, T., & Farrington, J. (2010). What is sustainability? *Sustainability*, 2(11), 3436-3448. doi:https://doi.org/10.3390/su2113436
27. Mahoor, M.; Salmasi, F.R.; Najafabadi, T.A. (2017). A Hierarchical Smart Street Lighting System with Brute-Force Energy Optimization. *IEEE Sens. J.*(17), 2871-2879.
28. National Aeronautics and Space Administration. (2017). Obtenido de <https://www.giss.nasa.gov/research/news/20170118/>
29. Ozadowicz, A.; Grela, J. (2017). Energy saving in teh street lighting control system-a new approach based on teh EN-15232 standard. *Energy Effic.*(10), 563-576.
30. Park, S.; Kang, B; Choi, M.; Jeon, S.; Park, S. (2018). A micro-distributed ESS-based smart LED streetlight system for intelligent demand management of the micro grid. *Sustain. Cities Soc.*(39), 801-813.
31. Pena-Bello, A.; Barbour, E.; González, M.C.; Patel, M.K.; Parra, D. (2019). Optimized PV-coupled battery systems for combining applications: Impact of battery and geography. *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 112, 978-900.
32. Pérez-Rodríguez, J.; Lumbreras, J. (6 de Enero de 2020). ¿Cuanta energía producen y consumen las ciudades? *The Conversation*.

BIBLIOGRAFÍA

33. Pérez-Sánchez, M.; Sánchez-Romero, F.J.; Ramos, H.M.; López-Jiménez, P.A. (2017). Energy recovery in existing water networks: Towards greater sustainability. *Water*(9), 97. doi:<https://doi.org/10.3390/w9020097>
34. Rahm, J; Johansson, M. (2016). Walking after dark-A systematic literature review of pedestrians´ response to outdoor lighting. *Environment Psychology Monographs*.
35. Red Española para el Desarrollo Sostenible. (2020). REDS, 2020. Los ODS en 100 ciudades españolas. 2ª Edición.
36. Renovables, F. d. (2014). Ciudades del futuro. Necesidad y oportunidad de un sistema energético sostenible. Madrid.
37. Rodríguez-Pérez, A.M.; Pérez-Calañas, C.; Pulido-Calvo, I. (2021). Energy Recovery in Pressurized Hydraulic Networks. *Water Resour. Manag.*(35), 1977-1990. doi:<https://doi.org/10.1007/s11269-021-02824-4>
38. Sancho Ávila, J.M.; Riesco Martín, J.; Jiménez Alonso, C.; Sánchez de Cos, M.D.C.; Montero Cadalso, J.; López Bartolomé, M. (2012). *Atlas de Radiación Solar en España Utilizando datos del SAF de EUMETSAT*. AEMET. Recuperado el 28 de Enero de 2021, de http://www.aemet.es/documentos/es/serviciosclimaticos/datosclimatologicos/atlas_radiacion_solar_24042012.pdf
39. Satish, D.; Doshi, A.; Bade, M. (2021). Review on Pumps as Turbine Application in Water Distribution Networks for Power Generation. *In AIP Conference Proceedings*. 2341, pág. 030035. Melville, NY, USA: AIP Publishing LLC. doi:<https://doi.org/10.1063/5.0050115>.
40. Say, K.; John, M.; Dargaville, R. (2019). Power to the people: Evolutionary market pressures from residential PV battery investments in Australia. *Energy Policy*(134), 110977.
41. Sedziwy, A.; Kotulski, L. (s.f.). Towards Highly Energy-Efficient Roadway Lighting. *Energies* 2016, 9, 263, 9(263). doi:doi.org/10.3390/en9040263
42. Stefanizzi, M.; Capurso, T.; Balacco, G.; Binetti, M.; Camporeale, S.M.; Torresi, M. (2020). Selection, control and techno-economic feasibility of Pumps as Turbinas in Water Distribution Networks. *Renew. Energy*(162), 1296-1306. doi:<https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.08.108>
43. Telci, I.T.; Aral, M.M. (2018). Optimal energy recovery from water distribution systems using smart operation scheduling. *Water*(10), 1464. doi:<https://doi.org/10.3390/w10101464>
44. Valentová, M.; Quicheron, M.; Bertoldi, P. (2015). LED projects and economic test cases in Europe. *Int. J. Green Energy*(12), 843-851.
45. Winder, S. (2017). Power Supplies for LED Driving. *Elseviere*(ISBN 9780081009253).
46. Wojnicki, I.; Ernst, S.; Kotulski, L. (2016). Economic Impact of Intelligent Dynamic Control in Urban Outdoor Lighting. *Energies*(9), 314.

9. COMPENDIO DE PUBLICACIONES

I. Ocana-Miguel, A.; Andres-Diaz, J.R.; Hermoso-Orzáez, M., E.; Gago-Calderon, A. (2018). Analysis of the Viability of Street Light Programmign Using Commutation Cycles in the Power Line. *Sustainability* 2018, 10, 4043. <https://doi.org/10.3390/su10114043>

Science Citation Index Expanded (SCIE) - ENVIRONMENTAL SCIENCES

JCR category rank [2018]: Q2 (105/251)

Impact Factor [2018]: 2.592

Abstract: Nowadays, control systems for lighting installations are used, among other functionality, to improve energy efficiency and to set different lighting outputs of the luminaires according to punctual requirements. This allows increasing energy efficiency by adapting the installation to environmental needs. Current control systems are mainly oriented to point-2-point architectures, which in most cases, are complex and expensive. As an alternative, we present the viability analysis of a sustainable control architecture for lighting installations to improve those drawbacks. This control system uses a communication technique based on controlled power-on/off sequences in the power line of the luminaires to configure different dimming profile schedules. An implementation for LED equipment with the design of an electronic CPU based on a microcontroller is described along with a study of its configuration capability. In addition, we present the set of results obtained using this system in a real outdoor public lighting installation. Furthermore, an economic amortization study of power line communication (PLC) or radio frequency (RF) control architectures versus the results of this proposal are detailed. The analysis presents the proposal as a simple but more robust and sustainable solution compared to current point-2-point systems used with streetlights: The return on investment (ROI) period is reduced allowing all the basic functionality expected—in—field output light dimming profiles selection.

Keywords: sustainable lighting; economic and social sustainability; lighting control; data bus; dimming profile

II. Ocana-Miguel, A.; Andres-Diaz, J.R.; Navarrete-de Galvez, E.; Gago-Calderon, A. (2021). Adaptation of an Insulated Centralized Photovoltaic Outdoor Lighting Installation with Electronic Control System to Improve Service Guarantee in Tropical Latitudes. *Sustainability* 2021, 13, 1925. <https://doi.org/10.3390/su13041925>

Science Citation Index Expanded (SCIE) - ENVIRONMENTAL SCIENCES

JCR category rank [2020]: Q2 (124/274)

Impact Factor [2020]: 3.251

Abstract: Sustainability and energy prices make the energy production from renewable sources necessary and photovoltaic energy is ideal on an urban scale and on isolated facilities. However, when the demand for energy is at night, as in lighting installation, the use of accumulative systems is necessary. The use of batteries can account for more than 70% of the budget of these systems and have a critical impact in the project. This problem increases when the installation's location moves away from the equator, as the variation between the duration of days and nights increases. This implies that the system must be oversized to almost triple its generation and storage capacity to guarantee operation. This paper proposes the use of a robust and affordable electronic centralized management system that can regulate the consumption based on the energy available in the batteries. To test this system, a real case of outdoor lighting nanogrid has been used. The facility has been powered by a grouped photovoltaic battery system dimensioned for the average year solar conditions with and without consumption management. When used without regulation, in winter or cloudy days, there have been repetitive crashes of the system. On the other hand, with the use of the electronic control proposed, the shutdowns have been avoided, regulating the lighting level when necessary. Thus, more efficient and economically affordable systems can be designed which can help to spread the installation of isolated photovoltaic lighting.

Keywords: solar photovoltaic energy; solar energy storage; nanogrid; LED outdoor light; adaptive lighting control

III. Ocana-Miguel, A.; Gago-Calderon, A.; Andres-Diaz, J.R. (2022). Experimental Outdoor Public Lighting Installation Powered by a Hydraulic Turbine Installed in the Municipal. Water Supply Network. *Water* 2022, 14, 710. <https://doi.org/10.3390/w14050710>.

Science Citation Index Expanded (SCIE) – WATER RESOURCES

JCR category rank [2020]: Q2 (39/98)

Impact Factor [2020]: 3.103

Abstract: Sustainability and energy prices make the use of energy obtained from renewable sources on an urban scale and for isolated local facilities necessary for municipal authorities. Moreover, when the demand of energy is at night, as for street lighting installations, the use of accumulative systems is necessary, which means a major drawback due to a short lifetime expectancy and high cost. The use of batteries can require more than 70% of the budget of these lighting systems and has a critical impact in the project. The problem to solve is finding different renewable energy sources that can produce energy throughout the day, especially during the night, at the same time at which it is consumed. As one of the competences of municipal authorities is water supply networks, this paper analyzes the use of energy recovery turbines within these installations as an alternative to photovoltaic generators. To study the viability and effectiveness of this alternative, the water flows available in the network of a medium-size municipality were monitored and analyzed in depth to assess the amount of recoverable energy. In addition, an energy recovery turbine (ERT) station was set up, installing a bypass around one of the pressure-reducing valves (PRV) of the installation where energy is dissipated without practical use. The results obtained imply that the system proposed has economical and technical viability, is reliable and guarantees full service in all the seasons' conditions. Moreover, the needs of the energy storage capacity are much lower (~8%) than with solar panels.

Keywords: hydraulic micro turbines; pressure reducing valves; electricity generation; outdoor public lighting