

PLIEGO DE PRESCRIPCIONES TÉCNICAS QUE HA DE REGIR EL CONTRATO DE SERVICIOS DE CONSULTORÍA PARA LA REALIZACIÓN DEL PROYECTO DE IMPLEMENTACIÓN DE TÉCNICAS DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL Y OPTIMIZACIÓN PARA LA MEJORA DE LA EXPLOTACIÓN DE LOS BOMBEOS Y DEPÓSITOS DE LA RED DE ABASTECIMIENTO DE MIRAFLORES DE LA SIERRA (PROYECTO SABIA).

CONTRATO BASADO EN EL LOTE 1 DEL ACUERDO MARCO PARA LOS SERVICIOS DE ANÁLISIS BIGDATA E INTEGRACIÓN DE PROCESOS EN ENTORNOS CLOUD (247/2021)

PROCEDIMIENTO NO ARMONIZADO CON PLURALIDAD DE CRITERIOS

CONTRATO N.º: 59/2025

LICITACIÓN ELECTRÓNICA

MESA PERMANENTE DE CONTRATACIÓN

Área: Fomento de la Innovación

ÍNDICE

1.	OBJETO	4
2.	ANTECEDENTES	4
3.	ALCANCE DE LOS TRABAJOS	5
3.1	Recopilación y tratamiento de datos	6
3.2	Análisis e implementación de los modelos de inteligencia artificial y optimización	6
3.3	Resultados de contraste de operativa	6
4.	DESARROLLO GENERAL DE LOS TRABAJOS	6
4.1	Información disponible en Canal de Isabel II, S.A., M.P.	6
4.2	Información a recabar por parte del contratista.....	7
4.3	Trabajos previos: Recopilación, tratamiento y limpieza de datos.....	7
4.4	Análisis e implementación de los modelos de inteligencia artificial	7
4.5	Desarrollo del optimizador.	8
4.6	Resultados	8
4.7	Seguimiento del desarrollo del proyecto y entrega de resultados.....	9
5.	TECNOLOGÍAS Y PRODUCTOS.....	9
5.1	Azure.....	9
5.2	Python	10
5.3	Spark.....	10
5.4	Knitro	10
5.5	Herramientas y Entorno de Desarrollo.....	10
6.	ESPECIFICACION DE REQUISITOS.....	11
6.1	Requisitos funcionales	11
6.2	Requisitos no funcionales	12
6.3	Requisitos técnicos.....	13
6.4	Entregables.....	13
6.4.1	Planificación	13
6.4.2	Análisis de datos	13
6.4.3	Diseño y validación del modelo de inteligencia artificial	13
6.4.4	Diseño y validación del optimizador	14
6.4.5	Implementación y análisis de resultados	14
6.4.6	Traspaso	14
6.4.7	Mantenimiento en periodo de garantía	15
7.	DESARROLLO ESPECIFICO DE LOS TRABAJOS DE PREDICCIÓN DE CAUDALES MEDIANTE IA	15
7.1	Predicción del caudal registrado de los caudalímetros o contadores.....	15
7.2	Cálculo de caudales de entrada y salida de los depósitos	16
8.	DESARROLLO ESPECIFICO DE LOS TRABAJOS RELATIVOS AL OPTIMIZADOR	16
8.1	Descripción del optimizador	16
8.2	Características del optimizador:	18

8.3	Fases de desarrollo del optimizador:	19
8.3.1	Fase O1: Optimizador para el sistema constituido por un bombeo y un depósito:	19
8.3.2	Cythonización de funciones	24
8.4	Fase O2: Optimizador para el sistema completo de Miraflores:	25
8.5	[*] Programación número de pautas o consignas de bombeo	27
8.6	Programa de simulación hidráulica	27
8.7	Validación de modelos	29
8.8	Contraste de operativa optimizada versus operativa actual	29
8.9	Informe final de los trabajos realizado	30
8.10	Comentarios en programación	30
8.11	Entregables:	30
8.12	Datos estructurados de entrada al optimizador	31
8.13	Manual del optimizador y de los notebooks	32
9.	EQUIPO DE TRABAJO	33
9.1	Perfiles de Canal de Isabel II	33
9.1.1	Director de Contrato	33
9.1.2	Usuario Final	33
9.2	Perfiles de la empresa adjudicataria	33
9.2.1	Director de proyecto	33
9.2.2	Equipo de desarrollo	34
10.	PLAZOS DE EJECUCIÓN	36
10.1	Plazo de ejecución de los trabajos	36
10.2	Plazo máximo de ejecución del contrato	36
11.	FACTURACIÓN DE LOS TRABAJOS	38

1. OBJETO

El objeto del presente pliego es establecer las condiciones técnicas que han de regir el contrato de servicios de consultoría para la realización del proyecto de implementación de técnicas de inteligencia artificial y optimización para la mejora de la explotación de los bombeos y depósitos de la red de abastecimiento de Miraflores de la Sierra (proyecto SABIA).

El contrato se enmarca en el Lote 1 del *Acuerdo Marco Nº 247/2021 promovido por Canal de Isabel II, S.A. para la realización de análisis BigData e integración de procesos en entornos cloud*, en adelante, A.M. Nº 247/2021, enfocado a realizar trabajos de *BigData* e Inteligencia Artificial.

El proyecto contemplará las siguientes actividades principales:

- Análisis de la información disponible.
- Análisis e implementación de modelos de inteligencia artificial basados en redes neuronales que mejor predigan los caudales que medirían los caudalímetros o contadores involucrados en el abastecimiento de los sectores del municipio de Miraflores de la Sierra.
- Desarrollo de un modelo hidráulico de transformación de los caudales predichos para los caudalímetros o contadores involucrados en el abastecimiento de los sectores del municipio de Miraflores de la Sierra que sirva para poder determinar los caudales de entrada y salida de los depósitos.
- Desarrollo de programas de optimización que mediante las predicciones de caudales de los modelos de inteligencia artificial anteriormente referidos proporcionen las mejores consignas ante diferentes criterios de explotación, como por ejemplo la minimización del consumo energético en los bombeos o la minimización de los tiempos de permanencia en los depósitos, entre otros criterios implementables que posteriormente se desarrollan en este pliego.
- Desarrollo de informe de contraste de operativa en determinados periodos históricos, entre las consignas de bombeo que fueron ejecutadas y las que hubiese indicado el programa optimizador para diversos criterios de explotación, de modo que se pueda conocer las ventajas o desempeño de las consignas optimizadas frente a las que fueron ejecutadas si se hubiesen llegado a implementar en explotación para dichos periodos históricos.
- Visualización de todas las variables relevantes, tanto de los modelos predictores a desarrollar como de las que se deriven del programa optimizador: caudales consumidos por los sectores, caudales de entrada y de salida de los depósitos, consignas recomendadas de operación, tiempos de permanencia en depósitos e impulsiones, energía consumida, etc.

2. ANTECEDENTES

El desarrollo de este proyecto está alineado con diversos objetivos definidos en las siguientes líneas del Plan Estratégico 2018 - 2030:

- Línea Estratégica 1: Asegurar la garantía de suministro.
- Línea Estratégica 2: Garantizar la calidad del agua de consumo.
- Línea Estratégica 9: Liderar la innovación y el desarrollo.

Un objetivo del Área de Conservación Sistema Santillana ha sido, desde hace cierto tiempo, disponer de una herramienta de gestión que mejore o complemente la operativa habitual que se desarrolla a diario en el sistema hidráulico de bombeos y depósitos de Miraflores de la Sierra.

Esta mejora pretendida por el Área referida se centraba en intentar minimizar los tiempos de permanencia del agua en los depósitos e impulsiones.

Tras reuniones del Área de Conservación Sistema Santillana con la Subdirección de I+D+i, con objeto de enfocar dicho objetivo de intentar desarrollar una operativa de gestión que mejore la operativa habitual que se desarrolla a diario en el sistema hidráulico de bombeos y depósitos de Miraflores de la Sierra, la cual se centra en la actualidad en un sistema de llenado de los depósitos mediante consignas dependientes de los niveles en los depósitos: niveles máximos y mínimos (garantías de suministro de los depósitos), se procedió, desde el Área de Fomento de Innovación de la Subdirección de I+D+i, a efectuar un análisis el cual concluyó que no solo podría llegar a realizarse una operativa que minimizase tiempos de permanencia, sino que también se podría perseguir la minimización de costes de energía u otros criterios de explotación.

Esto podría conseguirse mediante el desarrollo de dos herramientas fundamentales que son la creación de los modelos de inteligencia artificial que sirvan para determinar los caudales de entrada y salida de los depósitos y de un programa de optimización que, en función de un determinado objetivo de explotación, genere las consignas que optimizan dichos objetivos: minimización de tiempos de permanencia, costes de energía, híbridos de los anteriores, etc.

Dichos antecedentes motivan la impulsión del presente contrato cuyo pliego de prescripciones técnicas se desarrolla en este documento.

El desarrollo del proyecto vinculado a la optimización del sistema hidráulico de bombeos y depósitos de Miraflores de la Sierra viene motivado por el profundo conocimiento que se tiene del sistema y por el gran número de elementos de instrumentación que dispone, que garantizan un elevado volumen de datos históricos, necesarios para desarrollar sistemas de gestión basados en tecnologías de inteligencia artificial.

El sistema de abastecimiento de Miraflores de la Sierra está compuesto por varios bombeos encadenados, comenzando en una estación elevadora de agua potable, que recoge el recurso de la ETAP de Santillana y eleva el agua hasta un primer depósito.

Desde ahí se bombea el agua a un segundo depósito, que abastece a la red del municipio y desde el que se eleva el recurso hasta un tercer depósito. Este se encarga de abastecer a red urbana y de bombear el agua a un último depósito, que también suministra a la red del municipio.

El agua se almacena en los depósitos con el fin de ajustar la demanda de agua potable, por parte de los consumidores, al volumen real tratado por las ETAP. Además, estos depósitos tienen la capacidad de regulación del sistema garantizando el abastecimiento cuando existe alguna discontinuidad en los procesos de captación,

3. ALCANCE DE LOS TRABAJOS

El alcance de este contrato consistirá en las actividades necesarias para llevar a cabo la optimización del funcionamiento de la red de abastecimiento de Miraflores de la Sierra.

Este contrato se considera enmarcado como Proyecto dentro de las categorías que se establecen en el apartado 3 del pliego de prescripciones técnicas particulares del A.M. Nº 247/2021 en el que se definían las diferentes fases que podrían contemplar los contratos.

A continuación, se desarrollan de forma general las tareas, fases o secuencias que serán objeto de ejecución por parte del contratista que obtenga la adjudicación del contrato.

3.1 Recopilación y tratamiento de datos

- Definición de los datos necesarios y sus características, en función de la información de Canal de Isabel II disponible, para los modelos de inteligencia artificial.
- Tratamiento y análisis de los datos definidos en el punto anterior.

3.2 Análisis e implementación de los modelos de inteligencia artificial y optimización

- Determinación de las variables relevantes para los modelos de inteligencia artificial predictores de los caudales que medirían los caudalímetros o contadores involucrados en el abastecimiento de los sectores del municipio de Miraflores de la Sierra, en función de los datos aportados.
- Selección del tipo de modelo de inteligencia artificial que mejor se adecúe a la información disponible y mejores resultados proporcione. Justificación objetiva y con métricas estadísticas de esta selección.
- Desarrollo de un modelo hidráulico de transformación de los caudales predichos para los caudalímetros o contadores involucrados en el abastecimiento de los sectores del municipio de Miraflores de la Sierra que sirva para poder determinar los caudales de entrada y salida de los depósitos.
- Desarrollo de los modelos de cómputo del llenado de depósitos y del tiempo de permanencia en los depósitos y en las impulsiones del sistema de bombeos.
- Desarrollo del programa de optimización que determine las mejores consignas de explotación de los bombeos en función de diferentes criterios de operación: minimización de tiempos de permanencia, minimización de costes de energía, híbridos, etc.

3.3 Resultados de contraste de operativa

- Predicción de los caudales que medirían los caudalímetros o contadores involucrados en el abastecimiento de los sectores del municipio de Miraflores de la Sierra mediante redes neuronales. Los residuos (diferencia entre valores medidos y valores calculados) para el conjunto de datos de validación que el contratista seleccione, deberán ajustarse lo mejor posible a una distribución normal con media cero.
- Determinación de las mejores consignas de funcionamiento de las estaciones de bombeo en función de diferentes criterios de optimización, en determinados periodos históricos registrados por Canal de Isabel II, S.A., M.P. y su contraste con la operativa de consignas que fue efectuada por Canal de Isabel II, S.A., M.P. evaluando las mejoras obtenidas para cada criterio de explotación.

4. DESARROLLO GENERAL DE LOS TRABAJOS

4.1 Información disponible en Canal de Isabel II, S.A., M.P.

Canal de Isabel II, S.A., M.P. facilitará al adjudicatario la siguiente información, que se considera necesaria para la realización de los trabajos:

- Datos hidráulicos históricos del sistema de abastecimiento objeto de estudio: caudales registrados por caudalímetros y contadores, alturas de explotación de los depósitos, bombeos y todos aquellos que sean relevantes.
- Cartografía actualizada y croquis resumen del sistema de abastecimiento de Miraflores de la Sierra y de toda aquella que fuese necesaria para una mayor comprensión de su funcionamiento.

La entrega de estos datos no exime al adjudicatario de garantizar su calidad ni de completarlos en caso de ser necesario.

4.2 Información a recabar por parte del contratista

- Histórico completo de los datos meteorológicos (temperatura y pluviometría) en las tres estaciones de la AEMET más cercanas al municipio de Miraflores. El contratista asumirá el posible coste de la obtención de los datos referidos anteriormente, por lo que los deberá considerar a la hora de efectuar su oferta económica.

4.3 Trabajos previos: Recopilación, tratamiento y limpieza de datos

La fase inicial de los trabajos consistirá en la definición de los datos necesarios y sus características, en función de la información aportada por Canal de Isabel II, S.A., para los modelos de inteligencia artificial. Se incluirán, como mínimo, las siguientes variables explicativas como entradas a las redes neuronales:

- Caudales recogidos por los caudalímetros o contadores involucrados en el abastecimiento de los sectores del municipio de Miraflores de la Sierra.
- Fecha y hora en la que se registró el volumen anterior.
- Mes de la fecha anterior.
- Hora de la fecha anterior.
- Información sobre si un día es laborable, sábado o festivo.
- Temperaturas máxima, media, mínima y precipitación en una estación meteorológicas propuesta por el contratista y aprobada por el Director del contrato.

Al margen de las variables anteriores, y a propuesta del contratista, se podrán incorporar a la definición de las redes neuronales variables adicionales que mejoren su capacidad predictiva. Estas variables nuevas serán aprobadas por el Director del contrato.

Posteriormente, se llevará a cabo el tratamiento y análisis de los datos definidos en los párrafos anteriores. En esta etapa se eliminarán los datos irrelevantes o duplicados, se completarán aquellos que pudieran faltar y se ajustarán los errores para garantizar la calidad de los datos.

Se realizará un análisis para comprender su distribución, patrones, tendencias y relaciones entre variables. Se deberán emplear gráficos, tablas y estadísticas descriptivas para visualizar los datos.

Además, de la información aportada por Canal de Isabel II S.A., M.P., el adjudicatario se responsabilizará de recopilar, o solicitar a Canal de Isabel II, S.A., M.P., en caso de ser necesario, toda aquella información que considere imprescindible para desarrollar los modelos de inteligencia artificial.

Se podrán realizar, si se consideraran necesarias, visitas físicas al sistema de abastecimiento de Miraflores de la Sierra para llevar a cabo los trabajos con mayor grado de conocimiento.

4.4 Análisis e implementación de los modelos de inteligencia artificial

El objeto de esta fase será seleccionar o generar los modelos de inteligencia artificial encargados de predecir los caudales que medirían los caudalímetros o contadores involucrados en el abastecimiento de los sectores del municipio de Miraflores de la Sierra, así como el modelo hidráulico que transforma los caudales anteriores que sirva para poder determinar los caudales de entrada y salida de los depósitos.

El modelo de inteligencia artificial será aquel que mejor se adecúe a los datos disponibles. Para ello, será necesario determinar cuáles serán las variables más relevantes para el modelo.

En esta etapa se podrán crear nuevas variables a partir de los datos existentes. Esto podría implicar la normalización, la codificación de variables categóricas o la generación de características derivadas que puedan ser relevantes.

Se deberán aplicar técnicas de estadística o aprendizaje automático para extraer conocimientos significativos de los datos.

El tipo de modelo seleccionado estará construido utilizando algoritmos de inteligencia artificial. Se deberá justificar de manera objetiva y con métricas estadísticas esta selección. En particular, los residuos (diferencia entre valores medidos y valores calculados) para el conjunto de datos de validación que el contratista seleccione, deberán ajustarse lo mejor posible a una distribución normal con media cero. La prueba de ajuste será alguno de las usadas normalmente en estadística: Kolmogórov-Smirnov, Anderson-Darling, etc.

4.5 Desarrollo del optimizador.

El objeto de esta fase será realizar un programa efectuado en Python que será el encargado de determinar las pautas óptimas de bombeo en las elevadoras del sistema de Miraflores, de modo que se minimicen los tiempos de permanencia en los depósitos o se minimice el coste de la energía o de la potencia requerida, u otros metas que se podrán definir mediante diferentes funciones objetivo.

Dicho programa se denominará optimizador y funcionará empleando el solver de Knitro de la empresa Artelys:

- Knitro es una herramienta diseñada para resolver problemas de optimización no lineal a gran escala. Knitro puede manejar una amplia gama de problemas, desde optimización continua sin restricciones hasta programas no lineales mixtos con restricciones enteras (MINLP). Utiliza algoritmos sofisticados como métodos de punto interior y programación secuencial cuadrática para encontrar soluciones locales eficientes.

Canal de Isabel II pondrá a disposición una licencia de Knitro tipo servidor que será la empleada en la construcción y uso del optimizador.

El optimizador evaluará dichas consignas en función del criterio de optimización que se pretenda conseguir (optimización de coste de energía, de tiempos de permanencia, etc.), de las variables iniciales de estado de los depósitos (volúmenes iniciales y tiempos de permanencia), de las restricciones sobre las variables de los depósitos y bombeos (volúmenes mínimos y máximos no superables, rangos de caudales de bombeo admisibles, etc.) y de los caudales previstos que entren o salgan de los depósitos y que se determinarán en función de los caudales predichos por los modelos referidos en el anterior apartado, o bien de datos históricos cuando se desarrollen los trabajos de contraste.

4.6 Resultados

La empresa adjudicataria entregará los siguientes productos finales al término del contrato:

- Modelos de inteligencia artificial predictores de caudales recogidos por los caudalímetros involucrados en el abastecimiento de los sectores del municipio de Miraflores de la Sierra.
- Modelo de transformación de caudales predichos para los caudalímetros o contadores involucrados en el abastecimiento de los sectores del municipio de Miraflores de la Sierra que sirva para poder determinar los caudales de entrada y salida de los depósitos.
- Programa optimizador que permita generar las consignas de bombeo en función de diferentes criterios de optimización para la explotación.

- Herramienta de visualización o notebooks (Databricks o Jupyter) de las consignas de operación óptimas y de todas las variables relevantes, tanto de los modelos desarrollados, como de operación del sistema analizado.
- Informes del proceso de contraste de operativa.
- Informe final que recogerá la justificación de la selección de los modelos desarrollados y una descripción detallada de los trabajos realizados.

4.7 Seguimiento del desarrollo del proyecto y entrega de resultados

- El seguimiento del contrato se realizará mediante reuniones periódicas, en general semanales, donde se revisarán las tareas realizadas y se planificarán las actividades a realizar.
- Reuniones extraordinarias a convocar por cualquiera de las partes del contrato (Canal de Isabel II S.A., M.P., o contratista) en función del desarrollo del proyecto.
- La ejecución del proyecto se materializará con la entrega de informes parciales o finales, cuadernos o *notebooks*, librerías y código fuente desarrollado.
- Presentación de los resultados finales de los desarrollos de los modelos de inteligencia artificial y de los programas de optimización realizados, mediante los notebooks de cálculo y visualización.
- Presentación de informes finales de resultados y de contraste de operativa.
- Transferencia de conocimiento para los usuarios finales que utilizarán las herramientas desarrolladas: modelos de inteligencia artificial predictores de caudales, programa de optimización, notebooks y librerías efectuados.

5. TECNOLOGÍAS Y PRODUCTOS

Durante el desarrollo de los trabajos se utilizarán diversas tecnologías y productos que aseguren la eficiencia, seguridad y calidad del producto final.

Se detalla a continuación la descripción de las principales tecnologías, productos y lenguajes de programación que son susceptibles de ser empleados.

5.1 Azure

- Descripción: plataforma de servicios en la nube de Microsoft que proporciona una amplia gama de servicios de computación en la nube, almacenamiento, bases de datos, redes, análisis, inteligencia artificial, internet de las cosas (IoT), desarrollo y gestión de aplicaciones.
- Componentes principales requeridos:
 - Azure Databricks: Plataforma de análisis colaborativo basada en Apache Spark, que facilita la integración de Big Data, análisis avanzado y Machine Learning. Permite a los equipos de datos y análisis trabajar juntos en tiempo real, proporcionando un entorno optimizado para la ejecución de trabajos de análisis de grandes volúmenes de datos.
 - Azure Data Lake Storage Gen2: Servicio de almacenamiento diseñado específicamente para Big Data, que combina las capacidades de escalabilidad de un Data Lake con las características avanzadas de un sistema de archivos. Permite almacenar y analizar grandes cantidades de datos

estructurados y no estructurados de manera eficiente, proporcionando alta escalabilidad, rendimiento optimizado y soporte para acceso jerárquico a datos.

- Uso principal:
 - Hospedar aplicaciones
 - Gestionar bases de datos
 - Realizar análisis de datos
 - Desarrollar y probar software
 - Implementar aplicaciones de inteligencia artificial
 - Asegurar redes y datos

5.2 Python

- Descripción: lenguaje multiparadigma con amplia biblioteca estándar y un ecosistema de paquetes externos que permiten a los desarrolladores abordar, desde desarrollo web y automatización de scripts, hasta análisis de datos y desarrollo de inteligencia artificial.
- Uso Principal: se empleará para analizar, tratar y visualizar los datos que proporcione Canal de Isabel II, S.A., M.P., para desarrollar los modelos de inteligencia artificial predictores de los consumos en los sectores de Miraflores de la Sierra, así como para desarrollar el programa, librerías y notebooks precisos para la optimización de consignas de los bombeos del sistema de Miraflores de la Sierra.

5.3 Spark

- Descripción: marco de trabajo para procesamiento de datos a gran escala. Admite múltiples lenguajes de programación y está optimizado para trabajar en clusters distribuidos, permitiendo el procesamiento paralelo de grandes conjuntos de datos.
- Uso Principal: Procesamiento distribuido de datos en Databricks.

5.4 Knitro

- Descripción: Knitro es una herramienta diseñada para resolver problemas de optimización no lineal a gran escala. Knitro puede manejar una amplia gama de problemas, desde optimización continua sin restricciones hasta programas no lineales mixtos con restricciones enteras (MINLP). Utiliza algoritmos sofisticados como métodos de punto interior y programación secuencial cuadrática para encontrar soluciones locales eficientes.
- Uso Principal: Construcción y uso del optimizador. El uso de Knitro se acometerá como una librería a importar en el código Python del programa o cuadernos a desarrollar para el optimizador.

5.5 Herramientas y Entorno de Desarrollo

El desarrollo de todos los programas se efectuará en una máquina virtual, alojada en Azure, que configurará Canal de Isabel II y a la que se dará acceso al contratista.

Dicha máquina virtual correrá en sistema operativo Windows 11 y tendrá cargado Visual Studio Code para el desarrollo de la programación en Python, así como las librerías y licencia correspondiente de Knitro.

Sobre dicha máquina, Canal de Isabel II configurará el entorno virtual para trabajar con los notebooks a desarrollar.

El equipo de desarrollo trabajará en la infraestructura proporcionada por su empresa, garantizando unas buenas condiciones de conexión a internet e interacción con la máquina virtual configurada por Canal de Isabel II, S.A., M.P.

6. ESPECIFICACION DE REQUISITOS

En este apartado se especifican los requisitos necesarios para el desarrollo del proyecto y que serán considerados en la generación de los entregables que se definen en los apartados 7 y 8 de este pliego.

Todos los desarrollos Python se realizarán con una versión del interprete igual o posterior a la 3.12.

6.1 Requisitos funcionales

En esta sección se detallan las capacidades y funciones específicas mínimas que serán exigidas en los entregables. Estos requisitos deberán permitir a los usuarios finales interactuar con la información, visualizar los datos de forma clara y obtener conclusiones relevantes sobre los valores de los modelos de predicción y sobre las consignas generadas por el optimizador:

- **RF-001 – Formato y estructura de los Notebooks:** cada notebook deberá incluir secciones bien definidas que expliquen su objetivo, el flujo de trabajo y los resultados obtenidos. Deben tener títulos, subtítulos y comentarios que faciliten su comprensión.
- **RF-002 – Reproducibilidad:** los notebooks deben ser completamente reproducibles, es decir, cualquier usuario con acceso a los datos y entorno de ejecución debe poder ejecutar todas las celdas sin errores y obtener los mismos resultados.
- **RF-003 – Librerías compatibles con Databricks:** deberán emplearse librerías estándar y compatibles con Databricks como SparkML, MLlib, PySpark, Pandas y otras de machine learning compatibles con Apache Spark.
- **RF-004 – Gestión de Dependencias:** los notebooks deberán incluir una lista de todas las dependencias (librerías, versiones específicas, etc.), preferiblemente utilizando archivos de entorno, para facilitar la instalación y replicabilidad.
- **RF-005 – Preprocesamiento de Datos:** los notebooks deben aprovechar las capacidades de procesamiento distribuido de Spark para manejar grandes volúmenes de datos, incluyendo limpieza, normalización y transformación de características.
- **RF-006 – Visualización de datos:** los notebooks deben incluir visualizaciones, como gráficos interactivos y dashboards integrados, que permitan interpretar patrones y relaciones en los datos de manera efectiva.
- **RF-007 – Análisis estadístico:** implementar análisis estadístico utilizando SparkML o PySpark para garantizar que el procesamiento de datos sea escalable y eficiente, incluso con grandes conjuntos de datos.
- **RF-008 – Evaluación de los modelos de inteligencia artificial en Databricks:** cada notebook debe incluir una sección para la evaluación de los modelos de inteligencia artificial utilizando métricas adecuadas y comparar el rendimiento de diferentes modelos o versiones del modelo en Databricks.
- **RF-009 – Evaluación del optimizador en los cuadernos o notebooks:** cada notebook debe incluir una sección para la evaluación del comportamiento del optimizador, a nivel de tiempos de computación,

códigos generados por el solver de Knitro, tratamiento de errores, métricas de convergencia hacia mínimos absolutos, u otras que pudiese proponer el contratista.

- **RF-010 – Comentarios detallados y resumen de resultados:** El código en los notebooks debe estar bien comentado, explicando el propósito de cada bloque, especialmente en las celdas críticas o complejas. Además, deben concluir con un resumen de los resultados obtenidos, las conclusiones derivadas de los análisis y posibles áreas de mejora o iteraciones futuras.
- **RF-011 – Visualizaciones y gráficos:** los notebooks incluirán secciones o bloques de visualización de los datos tanto de los modelos de inteligencia artificial, del modelo de transformación, de los más relevantes del sistema de abastecimiento, tales como altura de agua en el depósito, arranque y parada de las bombas, etc., o de las consignas de optimización, u otros resultados relevantes que se precisen a determinación del Director del contrato.
- **RF-012 – Exportación de datos:** los notebooks de programación deberán disponer de secciones en las que se disponga la exportación de los datos referentes a cálculos intermedios, resultados finales, así como registros de los solver de los modelos de inteligencia artificial y de optimización.
- **RF-013 – Paquetes Python:** el desarrollo de los paquetes Python se realizará de forma que garantice el correcto funcionamiento del código y facilite su lectura.
 - Se incluirá un sistema de trazas que permita registrar las incidencias durante la ejecución del código. Este sistema deberá incluir, como mínimo, tres tipos de trazas: registro de errores, trazas de desarrollo y traza informativas.
 - Se intentará evitar que el código falle de forma silenciosa. Ante cualquier situación anómala de debe escribir una traza. Cuando se considera necesario se incluirán, aseveraciones (asserts) en el código para comprobar que se está ejecutando de forma correcta.
 - En la medida de lo posible, el diseño de los programas deberá ser seguir un modelo orientado al objeto.
 - El código deberá seguir las normas aceptadas por la comunidad de programadores en Python y que se recogen en el documento “PEP 8 – Style Guide for Python Code”.
 - Todos los paquetes, módulos, clases y funciones deberán estar documentados mediante “docstrings” siguiendo las recomendaciones recogidas en el documento “PEP 257 – Docstring Conventions”.
 - Se deberán incluir “type hints” para todos los elementos (clases, funciones, variables, etc) que formen los programas (PEP 484 – Type Hints).
 - El código deberá revisarse con un “linter” (p. ejem. Pylint). El Director del Proyecto establecerá que advertencias, de la generadas por el “linter”, es necesario corregir.
 - Una vez que los programas funcionen correctamente se realizará un refactorizado del código para mejorar su mantenimiento.

6.2 Requisitos no funcionales

En este apartado se recogen los requisitos mínimos no funcionales que establecen los criterios de los principales atributos de calidad que deberán cumplir el modelo y el visualizador.

- **RNF-001 – Escalabilidad:** los notebooks deben estar diseñados para escalar eficientemente en los clusters de Databricks, aprovechando la capacidad de procesamiento paralelo y distribuido.
- **RNF-002 – Rendimiento:** se deberá priorizar la eficiencia en la ejecución del código, minimizando la latencia y reduciendo el tiempo de ejecución.

- **RNF-003 – Acceso:** los notebooks deberán estar protegidos mediante controles de acceso adecuados, asegurando que solo usuarios autorizados puedan visualizar o modificar el contenido, utilizando las funcionalidades de control de acceso de Azure.
- **RNF-004 – Facilidad de actualización:** los notebooks deben ser diseñados para permitir actualizaciones sencillas, facilitando la incorporación de nuevas funcionalidades o mejoras en el rendimiento sin necesidad de realizar cambios disruptivos.
- **RNF-005 – Interoperabilidad:** los notebooks deben estar integrados con sistemas de control de versiones como Git en Azure DevOps, asegurando que puedan ser fácilmente compartidos, revisados y versionados.
- **RNF-006 – Integridad:** se deberá garantizar la integridad de los datos y la coherencia entre los mostrados en el visualizador y los de origen.

6.3 Requisitos técnicos

En este apartado se especifican los requisitos mínimos a nivel técnico necesarios para el desarrollo de los trabajos.

- **RT-001 – Infraestructura:** El equipo de desarrollo de la empresa adjudicataria desarrollará el modelo en una máquina virtual alojada en Azure y configurada por Canal de Isabel II, S.A., M.P., conectándose desde la infraestructura proporcionada por su propia empresa, garantizando condiciones óptimas de conexión a internet e interacción fluida con la máquina virtual.
- **RT-002 – Tecnología:** el modelo de inteligencia artificial y el optimizador se desarrollarán utilizando las tecnologías indicadas en el apartado 5 del presente pliego.

6.4 Entregables

En esta sección se incluye información adicional sobre los entregables. Todos los elementos mencionados en este apartado serán validados por el Director del Contrato de Canal de Isabel II, S.A., M.P. y tratados como requisitos de cara a la aceptación formal de las prestaciones del objeto del contrato.

6.4.1 Planificación

- **Cronograma:** se elaborará un documento detallado que especifique el calendario de todas las actividades y tareas fundamentales del proyecto, incluyendo fechas de inicio y fin, así como hitos importantes.

6.4.2 Análisis de datos

- **Informe de análisis de datos:** se redactará un documento que detalle el análisis de los datos, incluyendo un resumen de la calidad de los datos, las transformaciones necesarias y visualizaciones y estadísticas descriptivas que resuman las relaciones entre las variables principales y las posibles tendencias o patrones.
- **Notebooks de trabajo:** se entregarán los notebooks desarrollados para realizar el preprocesamiento de datos y el análisis exploratorio.

6.4.3 Diseño y validación del modelo de inteligencia artificial

- **Análisis comparativo de los tipos de modelos analizados y especificación del modelo seleccionado con métricas:** comparación detallada de los distintos modelos de inteligencia artificial, incluyendo métricas de rendimiento y justificación del modelo seleccionado. Deberá destacar ventajas y desventajas de cada enfoque y el motivo de la elección final.

- **Informe de validación de los modelos ajustados:** documento que incluye la validación final de los modelos ajustados utilizando un conjunto de datos de prueba independiente, con una descripción de las métricas de rendimiento obtenidas. Debe incluir también cualquier ajuste final realizado antes de la implementación.
- **Informe de validación del modelo de transformación:** documento que desarrolle la validación del modelo hidráulico de conversión de caudales previstos por los modelos de inteligencia artificial a los caudales de entrada y salida de los depósitos.

6.4.4 Diseño y validación del optimizador

- **Análisis de validación de modelos hidráulicos:** evaluación de los modelos de llenado de los depósitos, modelos de tiempo de permanencia en los depósitos, modelos de tiempo de permanencia en impulsiones, modelos de funcionamiento hidráulico de los bombeos y comparación de los resultados predichos por estos con los registrados al someterlos a datos históricos.
- **Análisis y validación del optimizador:** evaluación del funcionamiento de las librerías y notebooks de optimización a desarrollar para cada función objetivo o criterio de optimización que se requieren en el apartado 8 de este pliego.

6.4.5 Implementación y análisis de resultados

- **Plan de implementación en Databricks:** un documento detallado que describa los pasos necesarios para desplegar el modelo de inteligencia artificial en el entorno de Databricks, incluyendo la configuración del entorno, la integración del modelo y la programación de tareas automatizadas para su ejecución.
- **Cuadernos o notebooks con los resultados de los modelos de inteligencia artificial y variables más relevantes:** cuadernos con información tabular y gráfica que presentan los resultados de los modelos de inteligencia artificial, así como del modelo de transformación de caudales, junto con las variables más relevantes del sistema de abastecimiento.
- **Cuadernos o notebooks con los resultados del optimizador:** cuadernos o notebooks a desarrollar para cada criterio de optimización requerido en el apartado 8 de este pliego [funciones objetivo de optimización]. Se incluyen aquí todos los cuadernos precisos para desarrollar los informes de resultados requeridos en el apartado 8.

6.4.6 Traspaso

- **Manual de usuario:** se redactará un documento que contenga las instrucciones detalladas sobre cómo utilizar los programas, librerías y notebooks que se desarrollen.
- **Programa y planificación de la transferencia de conocimiento:** se elaborará un plan que describa los contenidos y duración de las sesiones de formación y transferencia de conocimiento al personal de Canal de Isabel II, S.A., M.P.
- **Transferencia de conocimiento:** se mantendrán sesiones de capacitación y traspaso del conocimiento sobre los programas, librerías y notebooks desarrollados, incluyendo grabaciones de las sesiones conforme al programa establecido.

6.4.7 Mantenimiento en periodo de garantía

- **Correcciones:** se llevarán a cabo las posibles correcciones de posibles errores detectados, realizando actualizaciones puntuales.
- **Actualización de la documentación:** se revisará y actualizarán todos los documentos relevantes para reflejar los cambios realizados durante el mantenimiento correctivo.

7. DESARROLLO ESPECIFICO DE LOS TRABAJOS DE PREDICCIÓN DE CAUDALES MEDIANTE IA

El objetivo último de las tareas descritas en este apartado es el cálculo del caudal de entrada y salida de los depósitos de la red de abastecimiento de Miraflores de la Sierra. El trabajo se divide en dos partes; en la primera se estima los caudales predichos por los caudalímetros o contadores involucrados en el abastecimiento de los sectores del municipio de Miraflores de la Sierra mediante modelos de inteligencia artificial (IA). En la segunda, se desarrollará un modelo hidráulico de transformación de los caudales referidos con anterioridad, a caudales de entrada y salida de los depósitos.

Cada una de las dos partes en las que se divide el trabajo quedará implementada en un paquete Python. El código de chequeo y validación de los dos paquetes se entregará en cuadernos o notebooks tipo Jupyter o Databricks.

Se entregará un informe parcial al finalizar el desarrollo del módulo de inteligencia artificial y un informe final al terminar los trabajos. Éste último deberá incluir una manual de usuario de los dos paquetes Python de cálculo de caudales.

El almacenamiento de datos y resultados se realizará en una base de datos relacional. La estructura de la base de datos será propuesta por el contratista y aprobada por la Dirección del Contrato.

7.1 Predicción del caudal registrado de los caudalímetros o contadores

Se construirá una red neuronal del tipo "Recurrent Neural Network" para cada uno de los siete equipos de medida de caudal instalados en la red de abastecimiento del municipio de Miraflores de la Sierra. Estas redes neuronales deberán poder estimar el caudal en cada uno de los equipos para 24 horas en el futuro. El intervalo entre caudales predichos será de una hora. Cada una de las redes neuronales será independiente de las demás.

La arquitectura detallada de la red (Bidirectional Recurrent Neural Networks, Long Short Term Memory, etc.) será propuesta por el contratista y aprobada por el Director del contrato.

Se incluirán, como mínimo, las siguientes variables explicativas como entradas a las redes neuronales:

- Histórico de caudal en cada uno de los equipos de medida de caudal.
- Fecha y hora en la que se registró el caudal en cada uno de los equipos de medida de caudal.
- Mes de la fecha y hora en la que se registró el caudal en cada uno de los equipos de medida de caudal.
- Hora de la fecha y hora en la que se registró el caudal en cada uno de los equipos de medida de caudal.
- Información sobre si un día es laborable (según los calendarios oficiales publicados por la Comunidad de Madrid y el Ayuntamiento de Miraflores de la Sierra), sábado o festivo.
- Temperatura máxima, temperatura media, temperatura mínima y precipitación en una estación meteorológicas propuesta por el contratista y aprobada por el Director del contrato.

Al margen de las variables anteriores, y a propuesta del contratista, se podrán incorporar a la definición de las redes variables adicionales que mejoren su capacidad predictiva. Estas variables nuevas serán aprobadas por el Director del contrato.

Las salidas de las redes neuronal serán las predicciones del caudal en cada uno de los equipos de medida de caudal

Las redes neuronales se construirán a partir de un máximo de cinco años de datos con un intervalo entre cada dato de una hora. La división de estos datos entre conjunto de entrenamiento y conjunto de prueba queda a juicio del contratista.

El contratista realizará todas las tareas relacionadas con la preparación y limpieza de datos.

La calidad de las predicciones se valorará analizando el comportamiento de las diferencias entre los valores medidos y los calculados, es decir, los residuos. La distribución de dichos residuos deberá ser lo más parecida posible a una distribución normal con media cero; lo que en estadística se conoce como ruido blanco. La comprobación de normalidad se realizará con alguna prueba analítica estándar tal como Kolmogórov-Smirnov o Anderson-Darling.

Para comparar el desempeño de las redes neuronales con otros enfoques "más tradicionales" se desarrollará un modelo de serie temporal clásico para cada uno de los equipos de medida de caudal. La distribución de residuos de estos modelos clásicos deberá ser, también, lo más parecida posible a una distribución normal con media cero.

Además de las dos comprobaciones anteriores, el contratista podrá utilizar cualquier otra métrica que considere adecuada para garantizar el buen desempeño de las redes neuronales.

Canal de Isabel II S.A., M.P. pondrá a disposición del contratista los datos de los que dispone en sus bases de datos corporativas y que sean necesarios para el desarrollo de los trabajos. Cuando la información necesaria no esté en posesión de Canal S.A., M.P. y sea necesario recurrir a otras fuentes, los posibles costes de adquisición de la información correrán a cargo del contratista.

Con vistas a la posible puesta en producción de las redes neuronales, estas deberán contar con un mecanismo que monitorice la calidad de las predicciones de forma que, si en algún momento la red neural deja de funcionar de forma correcta, se genere una alarma de forma automática.

El entrenamiento y ejecución de las redes neuronales se realizará en Databricks.

7.2 Cálculo de caudales de entrada y salida de los depósitos

A partir de los caudales de cada uno de los equipos de medida de caudal se desarrollará un modelo hidráulico de transformación que calculará el caudal de entrada y salida de cada uno de los depósitos. Dicho cálculo se basará en sumar o restar las lecturas, históricas o predichas, de los equipos de medida de caudal, además de los caudales impulsados desde las estaciones elevadoras del sistema de Miraflores de la Sierra.

8. DESARROLLO ESPECÍFICO DE LOS TRABAJOS RELATIVOS AL OPTIMIZADOR

8.1 Descripción del optimizador

El optimizador será un programa desarrollado en Python que servirá para evaluar las *mejores* consignas de bombeo de cada elevadora del Sistema Miraflores de la Sierra, para un determinado periodo temporal, en función de:

- El objetivo de optimización que se pretenda, el cual vendrá determinado por la función objetivo a optimizar.
- Los caudales predichos por los modelos de inteligencia artificial, descritos en el apartado anterior, para los equipos de medida de caudal de la red de abastecimiento de Miraflores de la Sierra.
- Los estados iniciales de los que parta la optimización:
 - Volúmenes iniciales en los depósitos
 - Tiempos de permanencia iniciales en los depósitos.
 - Secuencia de caudales bombeados anteriores al periodo a optimizar.
 - Secuencia de tiempos de permanencia en los depósitos anteriores al periodo a optimizar.

Las consignas de bombeo se refieren a los caudales que deberán impulsar las bombas para cumplir con determinados objetivos. Para cada bombeo serán, en caso de resolución a escala diaria y discretización horaria, los 24

caudales correspondientes a cada una de las horas del día objeto de optimización. [*] [véase apartado: Programación número de pautas o consignas de bombeo]

El optimizador determinará las consignas referidas de modo que minimicen el valor de una determinada función objetivo que se desee procesar.

El optimizador incluirá las siguientes funciones objetivo en su programación:

- El coste de la energía consumida.
- El coste de la potencia consumida.
- El coste eléctrico incurrido.
- El tiempo de permanencia en los depósitos
- El tiempo de permanencia por el volumen.
- Híbridas como combinación de las anteriores.
- Otras a aprobar por la Dirección del contrato.

El solver de optimización que se encargará de resolver el problema de mínimo de la función objetivo, será Knitro de la empresa Artelys.

Dicho solver de optimización se importará como una librería desde el programa optimizador para el cómputo de las consignas, las cuales serán las soluciones o incógnitas al problema de mínimo que se pretenda ejecutar.

El optimizador determinará las consignas de modo que estas obtengan el mínimo de las funciones objetivo a procesar, teniendo en cuenta las restricciones correspondientes.

Las restricciones se aplicarán a:

- Los valores de los volúmenes en los depósitos.
- Los valores de caudales de bombeo para cada elevadora.
- Otras opcionales que podrá elegir el usuario:
 - Restricción al tiempo de permanencia máximo admisible en cada depósito.
 - Restricción relativa al volumen correspondiente a la hora final del día objeto de optimización: 23:00-24:00, en caso de resolución a escala diaria y discretización horaria. [*] [véase apartado: Programación número de pautas o consignas de bombeo]
 - Restricción relativa al tiempo de permanencia de la hora final del día objeto de optimización: 23:00-24:00, en caso de resolución a escala diaria y discretización horaria. [*] [véase apartado: Programación número de pautas o consignas de bombeo]

El optimizador tendrá la capacidad de realizar diferentes evaluaciones de la obtención de los caudales en las elevadoras, mediante la prueba de diferentes puntos de arranque o puntos iniciales de estimación de las soluciones.

De este modo, el optimizador podrá detectar diferentes mínimos locales que satisfagan las restricciones a procesar. El objetivo último es obtener la solución que proporcione el menor valor de la función objetivo a procesar para todas las evaluaciones realizadas; en última instancia ese menor valor podrá llegar a coincidir con el mínimo absoluto, lo que representaría el mejor de los escenarios posibles en relación con la resolución del problema: *obtención de las consignas de bombeo que haga mínimo el valor de la función objetivo seleccionada cumpliéndose las restricciones.*

Dicho mínimo absoluto podrá o no aparecer dentro del número de evaluaciones que se efectúe. En principio, a mayor número de evaluaciones mayor probabilidad existirá de obtener el mínimo absoluto, pero más tiempo de cómputo se precisará.

Como la obtención de dicho mínimo absoluto no está garantizada, el optimizador trabajará con un cierto número de evaluaciones óptimo y escogerá, como solución, la que aporte el menor de los mínimos obtenidos de la función objetivo en dicho número de evaluaciones o simulaciones [pauta óptima de bombeo].

La determinación del número de evaluaciones óptimo será uno de los trabajos que se precisará realizar, por parte del contratista, para configurar adecuadamente el optimizador. Este aspecto se trata más adelante en este pliego.

8.2 Características del optimizador:

El optimizador deberá tener las siguientes cualidades:

- Robusto:

Su programación deberá prever cualquier excepción o fallo que desborde su ejecución. A tal efecto se realizarán las correspondientes pruebas.

- Enfocado al rendimiento:

La algoritmia deberá desarrollarse de modo que proporcione funciones o procedimientos que minimicen los tiempos de ejecución y reduzcan cuellos de botella en su ejecución secuencial.

- Susceptible de ser productivizado:

El optimizador deberá ser programado de tal modo que pueda ser susceptible de ser productivizado tras la conclusión del contrato, en una etapa posterior. Dicha productivización no es objeto de este contrato.

Deberá ser concebido, estructurado y programado como un elemento que permita su implementación en servidores o máquinas de Canal funcionando bajo entorno Windows.

Con tal objetivo, el programa optimizador sería, básicamente, como una *gran función* escrita en Python, que recoja de manera estructurada las variables de entradas o *inputs* necesarios para poder realizar los cálculos de optimización, incluya los modelos de llenado de depósitos y tiempos de permanencia en depósitos e impulsiones, desarrolle la programación de las funciones objetivo, configure la optimización con el solver de Knitro y que tenga como salida principal, la pauta de caudales bombeados óptima, en cada bombeo, en función de una determinada función objetivo seleccionada, así como los resultados de las diferentes evaluaciones o simulaciones requeridas para llegar a obtener dicha pauta óptima.

Dicha *gran función* sería llamada y ejecutada como una *librería de optimización* desde los entornos de programación o desarrollo y en el futuro desde los entornos de producción. En sendos entornos se habría instalado la correspondiente licencia de Knitro.

Esta *gran función* será llamada a ejecución desde el entorno de programación o desde cuadernos de programación notebooks tipo Databricks o Jupyter, durante la ejecución del contrato, o bien, desde los entornos de producción tras la conclusión del contrato.

En adelante, en este pliego, el término *notebook* se refiere a un cuaderno de programación de Databricks o Jupyter. Los notebooks a desarrollar podrán efectuarse en uno u otro sistema. La decisión de realizar cada notebook preciso, en uno u otro sistema, se tomará por la Dirección del Contrato, asesorada por el contratista, cuando se inicie el contrato.

- Configurable por el usuario:

Las optimizaciones a realizar por el programa optimizador podrán ser parcialmente configuradas por el usuario, en ciertos parámetros.

El usuario será aquel que invoque al programa optimizador desde, por ejemplo, los notebooks que habrá que realizar, en este contrato, para procesar o posprocesar las simulaciones, o en la fase de productivización, posterior a este contrato, aquel que tenga la responsabilidad desde el centro de telecontrol de invocar la ejecución del optimizador.

En este sentido, los datos estructurados que constituyan las variables de entrada del programa optimizador incluirán las variables susceptibles de ser elegidas por el usuario. Estas podrán ser, entre otras, por ejemplo:

- Elección de la función objetivo y sus posibles variables que la definan.
- Elección de restricciones opcionales y sus posibles variables que las definan.
- Elección del número de consignas de bombeo o incógnitas objeto de optimización, en función de la escala de resolución que se desee implementar; por ejemplo: 24 consignas horarias [periodo de optimización diario].
- Elección de la discretización de la duración de cada consigna de bombeo: por ejemplo: 1 hora [horaria].

8.3 Fases de desarrollo del optimizador:

El desarrollo del optimizador se realizará en dos etapas o fases diferentes:

- Fase O1: Optimizador para el sistema constituido por un bombeo y un depósito
- Fase O2: Optimizador para el sistema integral del Miraflores.

El motivo de efectuar una primera fase simplificada como la de un sistema constituido únicamente por un bombeo y un depósito es que permitirá implementar, prácticamente, todos los modelos hidráulicos, funciones clave, así como establecer la configuración del solver [Knitro], a una escala reducida suficiente para poder desarrollar, estructurar, evaluar y analizar, con perspectiva, la base de programación que luego se habrá de extender a los 4 bombeos y 4 depósitos que constituyen el sistema integral de Miraflores que se pretende optimizar.

8.3.1 Fase O1: Optimizador para el sistema constituido por un bombeo y un depósito:

La primera etapa consistirá en generar un programa completo escrito en Python que sirva para obtener las consignas de un bombeo que eleva las aguas a un depósito del cual derivan los caudales para los sectores abastecidos desde este.

El bombeo y el depósito podrá ser cualquiera de los incluidos en el sistema de Miraflores y que determine el Director del contrato, al principio de la fase. Los mismos, podrán ser incluso ficticios o hipotéticos pues el objeto de esta fase, como se ha referido anteriormente, es construir la base y estructura general de programación para su escalado posterior a la implementación completa para el sistema real de Miraflores [Fase O2]. En esta fase, los caudales de derivación del depósito podrán ser los determinados por el predictor, o bien, caudales de prueba arbitrarios.

El programa del optimizador incluirá las funciones de cálculo de:

- Determinación de los caudales entrantes y salientes del depósito en función de los caudales predichos por los modelos de inteligencia artificial para los equipos de medida de caudal y en función de los caudales de bombeo objeto de optimización.
- Evolución del volumen en un depósito en función del volumen inicial de este y de los caudales de entrada y salida.
- Evolución del tiempo de permanencia en un depósito en función del volumen inicial, del tiempo de permanencia inicial en el depósito, del tiempo de permanencia del caudal de entrada al depósito procedente de la impulsión y de los caudales de entrada y salida del depósito.
- Evolución del tiempo de permanencia en una impulsión, el cual evaluará el tiempo de permanencia del agua, en un cierto instante, que llega al depósito procedente del conducto o impulsión desde el bombeo.

La evolución del tiempo de permanencia del agua que llega a un depósito, procedente de una impulsión, depende del régimen de bombeo del día o días anteriores y de los tiempos de permanencia en el depósito desde el que se impulsa el agua acaecidos en el día o días anteriores.

Debido a ello, el optimizador deberá poder ser alimentado con las series horarias previas de días anteriores de los caudales bombeados en las elevadoras y con las series horarias previas de días anteriores de los tiempos de permanencia en los depósitos.

La dependencia del número de días anteriores es función de la longitud de la impulsión y del régimen de velocidades o caudales que se registra en ella. Por dar una pauta aproximativa, para el sistema de Miraflores se deberá cargar al optimizador al menos 3 días previos de las citadas series. Los días previos a cargar de las citadas series serán determinados durante los trabajos del contrato.

- Las funciones objetivo referidas ya en este pliego y que se desarrollan más en profundidad seguidamente.

El optimizador incluirá las siguientes funciones objetivo en su programación.

- El coste de la energía consumida:

El coste de la energía será el correspondiente al incurrido por las bombas en los periodos de impulsión de cada una de las elevadoras.

El programa optimizador tendrá como entrada la lista de los costes horarios de la energía eléctrica para el día o periodo objeto de optimización.

La función del coste de energía requerirá para su cómputo, la función de la altura manométrica de las bombas en relación con el caudal elevado, así como la función del rendimiento de las bombas en relación también con el caudal elevado, con objeto de poder evaluar la energía consumida y por ende el coste de dicha energía.

La función del coste de energía dependerá de los caudales bombeados [pautas o consignas objeto de la optimización: las incógnitas del proceso de optimización], de las alturas manométricas y de los rendimientos de las bombas en virtud de los caudales bombeados, así como de los costes horarios de la energía.

La altura manométrica en las bombas quedará determinada mediante una función que será exclusiva para cada elevadora y que dependerá del valor del caudal bombeado. Dicha función podrá ser computada, previsiblemente, mediante funciones de interpolación de una serie de puntos suficientes que definan con precisión la curva de rendimiento integral de la elevadora: *splines de interpolación* o análogos.

Análogamente, el rendimiento de las bombas quedará determinado mediante una función que será exclusiva para cada elevadora y que dependerá del valor del caudal bombeado. Dicha función podrá ser computada, previsiblemente, mediante funciones de interpolación de una serie de puntos suficientes que definan con precisión la curva de rendimiento integral de la elevadora: *splines de interpolación* o análogos.

El coste de la potencia contratable.

La finalidad de esta función objetivo es llegar a poder determinar las potencias requeridas óptimas a contratar para cada tramo de tarificación tipo [valle, llano y punta] de modo que se minimice el coste por potencia consumida.

La potencia requerida a contratar para cada tramo se corresponderá con el máximo de las potencias requeridas para impulsar cada uno de los caudales bombeados [pautas o consignas objeto de la optimización: las incógnitas del proceso de optimización] que se sucedan en cada tramo.

La función objetivo será la suma de la potencia máxima requerida para cada tramo en función de los caudales bombeados para cada tramo tipo, multiplicado por el coste horario de la potencia en función de cada tramo tipo y por el número de horas de cada tramo tipo para el día o periodo objeto de optimización.

El programa optimizador tendrá como entrada, la lista de los costes horarios de potencia eléctrica para el periodo objeto de optimización, así como la definición de la lista de las horas que constituyen los tramos tipos de facturación [valle, llano y punta].

La función del coste de la potencia consumida requerirá para su cómputo, la función de la altura manométrica de las bombas en relación con el caudal elevado, así como la función del rendimiento de las bombas en relación también con el caudal elevado, con objeto de poder evaluar la potencia requerida y por ende el coste de dicha potencia.

La función del coste de la potencia consumida dependerá de los caudales bombeados [pautas o consignas objeto de la optimización: las incógnitas del proceso de optimización], de las alturas manométricas y de los rendimientos de las bombas en virtud de los caudales bombeados, así como de los costes horarios de la potencia.

La altura manométrica en las bombas quedará determinada mediante una función que será exclusiva para cada elevadora y que dependerá del valor del caudal bombeado. Dicha función podrá ser computada, previsiblemente, mediante funciones de interpolación de una serie de puntos suficientes que definan con precisión la curva de rendimiento integral de la elevadora: *splines de interpolación* o análogos.

Análogamente, el rendimiento de las bombas quedará determinado mediante una función que será exclusiva para cada elevadora y que dependerá del valor del caudal bombeado. Dicha función podrá ser computada, previsiblemente, mediante funciones de interpolación de una serie de puntos suficientes que definan con precisión la curva de rendimiento integral de la elevadora: *splines de interpolación* o análogos.

- El coste eléctrico incurrido.

Esta función objetivo computará el coste total incurrido o facturable por la energía consumida. Será la suma de las dos anteriores funciones, es decir, la suma del coste de la energía consumida más el coste de la potencia requerida.

- El tiempo de permanencia en el depósito

La función objetivo podrá ser una métrica sobre los 24 valores horarios de los tiempos de permanencia, en el depósito que se evalúe, en función de los valores de las consignas de bombeo; 24 valores en caso de resolución a escala diaria y discretización horaria. ^[*] [véase apartado: Programación número de pautas o consignas de bombeo]

En este sentido, podrán establecerse métricas como la suma de dichos tiempos [norma L_1], o la suma de sus cuadrados [norma L_2] o la norma infinito [L_∞], es decir, el máximo de los 24 valores de tiempo de permanencia en el depósito; 24 valores en caso de resolución a escala diaria y discretización horaria. ^[*] [véase apartado: Programación número de pautas o consignas de bombeo]

- El tiempo de permanencia multiplicado por el volumen.

Otra métrica a implementar será una nueva variable que se computará como el tiempo de permanencia en el depósito multiplicado por el volumen de agua en el depósito. La función objetivo se construirá sobre la base de las métricas indicadas en el anterior punto: [L_1 , L_2 , L_∞], para esta nueva variable.

- Híbridas formadas como combinación de las anteriores.

Definidas las anteriores funciones objetivo podrán configurarse funciones objetivo híbridas que sean combinaciones lineales de las anteriores, como por ejemplo, una híbrida que pondere la función objetivo coste energía mediante un cierto coeficiente de peso, alfa, cuyos valores estén entre 0 y 1 y que pondere, por ejemplo, la función objetivo del tiempo de permanencia: $\alpha \cdot f_{obj_CE} + (1-\alpha) \cdot f_{obj_TP}$.

El contratista ofrecerá a la Dirección del contrato hasta 4 posibles configuraciones de funciones híbridas. La Dirección del contrato determinará cuáles se implementan, finalmente, para su programación en el optimizador y, por tanto, para la posible elección del usuario.

El Director del contrato podrá indicar cualquier otra función objetivo que en el curso del desarrollo del contrato se estime como conveniente, debido al mayor conocimiento que ofrecerá el desarrollo de los trabajos y la asesoría especializada del contratista.

Las funciones objetivo podrán requerir la normalización de sus valores para que sus valores estén dentro del intervalo [0,1]. Este aspecto se trata más adelante en este pliego.

El optimizador desarrollará la descripción matemática y de algoritmia de las restricciones.

- Restricciones a los volúmenes de modo que el agua contenida en un depósito no pueda bajar de un cierto volumen mínimo a modo de garantía específica, ni exceder un volumen máximo o capacidad de este.

El volumen mínimo de un depósito se determinará como el volumen resultante del producto del caudal medio previsto de consumo derivado del depósito para el día o periodo a optimizar multiplicado por las horas que se consideren suficientes para garantizar el suministro ante una incidencia grave [garantía de suministro]. Dicho número de horas será un parámetro a elegir por el usuario.

- Restricciones a los valores de los caudales bombeados, definiendo las bandas o dominios de sus valores en función del número de bombas en funcionamiento y de la regulación de sus caudales nominales, conseguida mediante el uso de variadores de frecuencia.

- Otras restricciones a programar y que podrán ser seleccionadas como opción por el usuario para las simulaciones de optimización serán:

- Restricciones a los tiempos de permanencia en el depósito de modo que no se exceda el tiempo de permanencia de un cierto umbral máximo tolerable.

- Restricción relativa a que el volumen correspondiente a la hora 23:00-24:00 del día siguiente, sea igual o se sitúe en una cierta horquilla respecto del volumen inicial a las 0:00-1:00 [registrado o previsto], o que se sitúe en una cierta horquilla sobre un

cierto valor arbitrario que determine el usuario, por ejemplo, el volumen medio en el depósito más menos una cierta cantidad; caso de resolución a escala diaria y discretización horaria. [*] [véase apartado: Programación número de pautas o consignas de bombeo]

- Restricción relativa a que el tiempo de permanencia de la hora 23:00-24:00 del día siguiente, sea igual o se sitúe en una cierta horquilla respecto del tiempo de permanencia inicial a las 0:00-1:00 [registrado o previsto], o que se sitúe en una cierta horquilla sobre un cierto valor arbitrario que determine el usuario, por ejemplo, la mitad del tiempo de permanencia máximo admisible en el depósito más menos una cierta cantidad; caso de resolución a escala diaria y discretización horaria. [*] [véase apartado: Programación número de pautas o consignas de bombeo]

El Director del contrato podrá indicar cualquier otra restricción que se determine como conveniente en el curso de los trabajos, la cual deberá ser programada en el optimizador.

La formulación o establecimiento de restricciones podría precisar la **implementación de funciones interpolantes suaves** que sirvan para establecer o caracterizar dominios complejos en los que haya que restringir una determinada variable como, por ejemplo, los caudales de bombeo de una elevadora, en los que los valores dependerán del número de bombas activadas y de la regulación de caudal de cada una de ellas, lo que se traduce a que el dominio de caudales pueda quedar constreñido a ciertas bandas o rangos de caudales, en vez de quedar constreñido a un único intervalo.

A estos efectos, el contratista deberá estudiar el mejor procedimiento de declaración de las restricciones, aportando un informe [*informe 01*] en el que se detalle su definición y se justifique que estas constituyen el mejor modo de declarar las restricciones.

En esta primera etapa se analizará y en su caso implementará, cuando sea posible, el uso de **derivadas exactas**, de las restricciones y de la función objetivo, como son los gradientes y hessianos.

La obtención de derivadas exactas redundará en menor tiempo computacional para la obtención del mínimo y mayor estabilidad numérica facilitando la convergencia hacia la solución o mínimo.

El contratista deberá desarrollar un informe explícito [*informe 02*] en el que se indique en qué casos fue posible implementar dichas derivadas y en qué casos no fue posible justificando dicha imposibilidad, relacionando las derivadas obtenidas.

El programa optimizador acotará el dominio de los valores de las variables que forman parte de la solución que debe proporcionar el optimizador: las 24 consignas horarias de bombeo o caudales a bombear, en caso de resolución a escala diaria y discretización horaria. [*] [véase apartado: Programación número de pautas o consignas de bombeo]

El contratista deberá efectuar un análisis para dirimir la conveniencia de efectuar **normalización de variables** con objeto de, potencialmente, mejorar la convergencia, reducir la sensibilidad de escala entre las diferentes variables o mejorar la estabilidad numérica.

El análisis se basará en diversas simulaciones que compararán la situación entre simulaciones sin normalización y con normalización.

El término simulación se refiere a la obtención de las consignas de bombeo para una cierta función objetivo y determinadas restricciones, realizando diferentes evaluaciones para diferentes puntos iniciales o de arranque de la solución: por ejemplo: 100 evaluaciones diferentes. En cada evaluación se podrá obtener una solución válida o viable, o una solución inviable, siendo la solución o pauta óptima de consignas la que provea el menor de los valores de la función objetivo de cada una de las evaluaciones válidas.

El estudio se hará incrementalmente incluyendo, en las simulaciones, cada vez más variables normalizadas de modo, que se determine, finalmente, qué variables han de ser normalizadas, si finalmente se concluyese su conveniencia.

El proceso concluirá con la redacción de un informe [*informe 03*] que resumirá el proceso seguido, los beneficios obtenidos en cada etapa de implementación y la justificación de la elección final de las variables que deban ser objeto de normalización.

Por otra parte, podría ser necesario la formulación o establecimiento de **funciones de interpolación o de suavizado** para, por ejemplo, el tiempo de permanencia en los depósitos para su uso en el modelo de tiempo de permanencia en impulsiones o para otro tipo de evaluaciones clave, todo ello con objeto de mejorar la convergencia o robustez del optimizador.

Otra de las cuestiones que deberán dilucidarse tras haber completado los pasos anteriores, será qué algoritmo es idóneo para la resolución del problema de optimización de las funciones objetivo.

Deberán efectuarse las correspondientes pruebas para ello determinando si conviene explicitar el algoritmo o bien que sea el propio solver [Knitro] quien decida automáticamente el mejor algoritmo a implementar.

Así mismo, deberán analizarse las opciones de configuración de las simulaciones, como pueden ser restricciones de tiempo de cálculo por evaluación, precisiones o tolerancias explícitas de convergencia, iteraciones hasta la convergencia, evaluación de las derivadas mediante métodos numéricos, etc.

En esta primera fase en la que se construye el optimizador para un bombeo y un depósito, con objeto de adquirir conocimiento para su implementación y escalado al sistema final de 4 bombeos y 4 depósitos de Miraflores, se determinará qué parámetros conviene o no ajustar en esta etapa, a sabiendas que el ajuste fino [*fine-tuning*] de los mismos podrá verse, en mayor perspectiva y quedará determinado, completamente, en la etapa final [Fase O2].

El contratista aportará informe de configuración final [*informe 04*] en el que se justificará el algoritmo de elección, los parámetros de ajuste de este, los parámetros de configuración de las simulaciones y se detallará la necesidad de implementar funciones de interpolación o de suavizado, entre otros aspectos.

Desarrollados todos estos trabajos se estará en condiciones de someter a **fase de pruebas** al optimizador realizando diferentes simulaciones consistentes en múltiples evaluaciones para diferentes puntos de inicio o soluciones iniciales. Cada una de las evaluaciones concluirá, bien con que el solver de optimización ha encontrado una solución viable que cumple las restricciones, o bien con que no ha sido capaz de encontrar una solución viable.

El optimizador deberá ser capaz de generar archivos .csv en el que se guardarán las evaluaciones realizadas con su identificador, las listas de solución [listas de 24 componentes que contienen los caudales óptimos en distribución horaria, en caso de resolución a escala diaria y discretización horaria ^[*] [véase apartado: Programación número de pautas o consignas de bombeo]], los resultados de las evaluaciones [*status* de la evaluación: [viables, inviables, etc.] y métricas], así como las variables que sirvieron para realizar la simulación: volúmenes iniciales, tiempos de permanencia iniciales, series de bombeo y tiempos de permanencia de los días previos, etc.

Con objeto de poder analizar debidamente los resultados de estas simulaciones, se desarrollará un notebook para la ejecución y visualización de las simulaciones:

El notebook será susceptible de ejecutar la simulación, llamando a la librería programada de la función objetivo a optimizar. El notebook deberá preparar la carga de la estructura de los datos a ingresar en la función correspondiente de la librería referida.

Alternativamente, podrá cargar los resultados de una cierta simulación que se podría haber ejecutado directamente desde el programa optimizador.

El notebook cargará o importará los archivos .csv de resultados de la simulación y mostrará la tabla o dataframe de simulaciones ordenada por *status*, de viable a inviable y por el valor de la función objetivo ordenado de menor a mayor valor.

El notebook solicitará el identificador de la simulación que se desea visualizar de las contenidas en la tabla, extrayendo la solución de optimización.

El notebook tendrá que contener las funciones ya programadas en el optimizador, que se refieren al cálculo del volumen en un depósito, cálculo del tiempo de permanencia en un depósito y cálculo de los tiempos de permanencia del agua procedentes de las impulsiones.

De este modo podrá posprocesar y efectuar las representaciones correspondientes a las consignas de bombeo, evolución de los volúmenes en los depósitos, evolución del tiempo de permanencia en los depósitos, evolución de los tiempos de permanencia en el agua procedentes de las impulsiones.

El notebook mostrará también los caudales previstos por los modelos de inteligencia artificial relacionados con el depósito y de los caudales de entrada y salida de los depósitos.

El notebook desarrollará también métricas en relación con las simulaciones, como pueden ser tiempos de computación total, tiempos medios y máximos de computación por cada punto evaluado, número de evaluaciones con *status* viable, con *status* inviable, etc.

El objeto de estas métricas será extraer conclusiones sobre el rendimiento que experimenta el programa optimizador en una cierta simulación.

En esta fase pruebas se efectuará un análisis de las partes del código programado que consume más tiempo, cuantificando tiempos en las diversas funciones más demandantes computacionalmente, y determinando posibles cuellos de botella. Para este fin se empleará algún programa diseñado para este fin normalmente denominados “profiler”

Dichos trabajos deberán generar una serie de propuestas de mejora del código o de los algoritmos implementados, de las funciones de evaluación de tiempos de permanencia en los depósitos o impulsiones, o de las funciones implementadas para la definición de las restricciones, entre otros posibles aspectos.

Todo ello con objeto de que el programa del optimizador sea lo más robusto posible y genere soluciones tratando de minimizar los tiempos computacionales que se precisan para ello.

La conclusión de esta fase terminará con la entrega de un informe [informe 05] en el que se aborde todo lo indicado anteriormente y en el que se propongan las correspondientes mejoras.

Tras el análisis del informe referido, el Director del contrato determinará la conveniencia de las mejoras propuestas, pudiendo sugerir posibles mejoras no contempladas por el contratista. En dicho caso, el contratista estudiará la viabilidad de estas y las incluirá en una segunda versión del informe.

Recibido el informe, el Director del contrato determinará, finalmente, las mejoras a implementar y ordenará el inicio de su implementación.

El contratista implementará las mejoras y repetirá los análisis referidos para la fase de pruebas preliminar [análisis de las simulaciones y evaluación de tiempos de cómputo del código], efectuando un informe [informe 06] en el que detallará y cuantificará las mejoras en tiempos de cómputo y en el número de evaluaciones precisas.

Concluida esta fase se dispondrá de un optimizador con las mejores características en relación con los algoritmos de evaluación de modelos de tiempos de permanencia, de restricciones, etc.

8.3.2 Cythonización de funciones

La siguiente etapa a realizar por parte del contratista es el análisis de la parte del código que podría ser *cythonizado*, en especial funciones clave de alto consumo de tiempo computacional, las cuales ya habrán sido localizadas en la etapa anterior.

Bajo el término de *cythonización* nos referimos a la reprogramación en Cython y creación de librerías para las funciones del optimizador que tienen un alto consumo de tiempo computacional: por ejemplo, podría precisarse para el tiempo de permanencia en las impulsiones, tiempo de permanencia en depósitos, etc.

La *cythonización* de estas funciones, al conseguir que se ejecuten directamente en C, puede reducir notablemente los tiempos requeridos para las simulaciones y esto es clave dado que habrá que escalar el optimizador

para su uso a 4 bombes y 4 depósitos que son los que componen el sistema hidráulico de elevadoras de Miraflores de la Sierra.

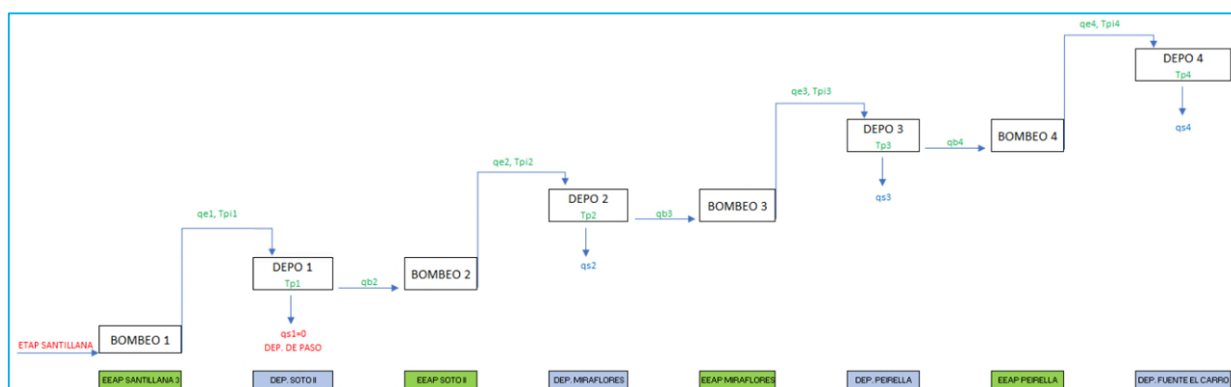
El contratista deberá efectuar un estudio de las funciones o partes del código que se proponga *cythonizar* y elaborará un informe de propuesta de cythonización [informe 07] para su aprobación por parte del Director del contrato, en el que se detallará las mejoras esperadas con base en la experiencia del contratista.

La propuesta de implementación de la *cythonización* será aprobada por el Director del contrato de forma parcial o de forma total.

Tras la conclusión de la *cythonización* se realizarán pruebas de rendimiento, y se elaborará un informe [informe 08] que cuantificará las mejoras obtenidas.

8.4 Fase O2: Optimizador para el sistema completo de Miraflores:

Tras el desarrollo de la primera fase [Fase O1] que se ciñe a la construcción de un optimizador para un bombeo y un depósito, se procederá a desarrollar un optimizador para el sistema integral de bombes y depósitos de Miraflores, el cual consiste en 4 bombes y 4 depósitos interconectados en serie.



Esquema simplificado del sistema hidráulico de depósitos y bombes de Miraflores de la Sierra.

Básicamente, gran parte del trabajo habrá sido desarrollada en la primera fase, sobre todo la construcción de las funciones que describen los modelos de llenado de un depósito, de evolución del tiempo de permanencia en un depósito y del tiempo de permanencia en una impulsión.

No obstante, el optimizador integral deberá desarrollar:

- La modificación de la programación de las funciones objetivo, pues ahora:
 - Serán funciones que dependerán e integrarán cada una de las funciones objetivo individuales para cada estación de bombeo o depósito.
 - Dependerán de los valores de los caudales que se precisa optimizar para cada una de las estaciones de bombeo: 24 valores horarios de caudal bombeado en cada una de las estaciones de bombeo, es decir se tendrán 24·4 incógnitas [96 incógnitas], en caso de resolución a escala diaria y discretización horaria. [*] [véase apartado: Programación número de pautas o consignas de bombeo]
- La programación de los caudales entrantes y salientes de cada depósito en función de los caudales predichos por los modelos de inteligencia artificial para los equipos de medida de caudal relacionados con cada depósito y en función de los caudales de bombeo objeto de optimización implicados para cada depósito
- La programación de las nuevas restricciones que atañen a los 4 depósitos en relación con sus volúmenes mínimos y máximos, así como a los valores umbrales admisibles del tiempo de permanencia en ellos.

Deberán definirse las restricciones correspondientes a las bandas o rangos en los que se pueden mover los valores de los caudales de bombeo de cada una de las elevadoras.

Adicionalmente, se definirán también el resto de las restricciones que fueron aludidas, ya, en la fase previa de un bombeo y un depósito.

- La programación de los dominios de las nuevas variables y de las restricciones.
- La programación de las nuevas derivadas, referentes a las nuevas restricciones y funciones objetivo, siempre y cuando sea viable su obtención e implementación en Knitro, cuestión está que ya habrá quedado dilucidada en la fase previa.

Para todas las cuestiones anteriores concurren las mismas observaciones que fueron expresadas en este pliego para la fase primera, en especial lo indicado respecto a las derivadas, funciones de interpolación o suavizado, en caso necesario, y normalización de variables.

El código se efectuará en Python. En caso de que se desarrollasen nuevas funciones que fuesen altamente demandantes de tiempo computacional se efectuarían propuestas de *cythonización* u otras estrategias que pudieren desembocar en mejoras sustantivas de dichos tiempos.

Dichas propuestas serán sustanciadas en un informe específico [*informe 09*] que se entregará a la Dirección del contrato, quien aprobará las mismas en caso procedente y de forma parcial o total.

Tras la programación del optimizador integral y con objeto de poder monitorizar las simulaciones y resultados que arroje el optimizador se partirá del notebook que se efectuó en la primera fase, realizando las modificaciones necesarias para poder visualizar todas las representaciones correspondientes a los caudales bombeados de las 4 elevadoras, así como de los volúmenes y tiempo de permanencia en los depósitos, tiempos de permanencia procedentes de las impulsiones, junto con los caudales predichos por los modelos de inteligencia artificial para los equipos de medida vinculados con cada depósito, así como los caudales entrantes y salientes de cada depósito.

Desarrollado el notebook se procederá a una siguiente **fase de pruebas** de simulaciones con diferente número de evaluaciones, de modo que se estime cuál sería el número mínimo de evaluaciones para intentar capturar un mínimo aceptable.

En este sentido, se desarrollarán gráficos que muestren para cada número de simulaciones realizadas los valores de las funciones objetivo y el número de evaluaciones con *status* viable [*códigos 0, -101,-102,-103 en Knitro*] de modo que:

- Se observe cómo evolucionan los valores de la función objetivo a medida que se aumenta paulatinamente el número de evaluaciones y se pueda detectar un posible óptimo del número de evaluaciones.
- Se observe si, paulatinamente, a medida que se aumenta el número de evaluaciones la pendiente de la curva de evaluaciones viables va decreciendo, apareciendo cada vez menos evaluaciones viables [mínimos locales].

Estos gráficos se generarán también en función del tiempo computacional consumido para el desarrollo de las diferentes evaluaciones.

Dichas representaciones se efectuarán, así mismo, para diferentes valores de configuración de parámetros de las simulaciones de optimización, como pueden ser las tolerancias de convergencia, el número de iteraciones hasta convergencia, los métodos de obtención de derivadas numéricas en caso de que no se pudiesen determinar derivadas exactas, u otros parámetros relevantes que deba analizar el contratista con el fin último de tener un optimizador robusto, suficientemente preciso y ágil, en tiempo computacional.

El estudio anterior se extenderá para todas las funciones objetivo.

Este análisis determinará el *ajuste fino* u óptimo de los parámetros de gobierno del algoritmo del optimizador y de las simulaciones.

Como ya se ha referido, uno de los parámetros relevantes será la determinación del número óptimo de evaluaciones que deben realizarse para la obtención de un mínimo suficientemente válido, ello podrá determinarse en función de las representaciones anteriormente referidas.

Dicho número óptimo evaluaciones podría ser variable para cada una de las funciones objetivo.

Tras el *ajuste fino* del optimizador se analizarán los tiempos de computación para obtener los mínimos de las funciones objetivo en función del número de evaluaciones que se determine como más conveniente, dilucidado del anterior proceso descrito.

El contratista deberá efectuar un informe [informe 10] en el que se detallarán los trabajos anteriores y se extraerán las correspondientes conclusiones de configuración final de los parámetros citados u otros que resultasen relevantes.

8.5 [*] Programación número de pautas o consignas de bombeo

En la redacción del pliego se observa una orientación del problema de optimización en hallar u obtener las 24 pautas horarias de los valores de los caudales de bombeo, para el día objeto de optimización: *incógnitas del problema de optimización*.

Estas 24 pautas horarias *parecen constituir*, en este momento, el enfoque previsible más probable al problema de optimización.

En el anterior párrafo se expresa *parecen constituir*, pues en esta etapa de redacción del pliego de prescripciones técnicas, Canal de Isabel II, S.A., M.P. no puede conocer, evidentemente, los resultados que irán arrojando las simulaciones que se irán efectuando a lo largo del contrato y en consecuencia, no puede conocer las mejores o más convenientes configuraciones que se vislumbren o parezcan aconsejables durante el transcurso de los trabajos a tenor de los resultados que se vayan obteniendo.

No obstante, la programación del optimizador se efectuará para un número de pautas de bombeo o incógnitas que será una variable que podrá decidir el usuario de modo que este tenga flexibilidad para efectuar posibles escalados del problema: 48 pautas, 72 pautas, etc.

La duración de las pautas de bombeo será previsiblemente también de una hora, no obstante, y por las mismas razones indicadas anteriormente, el programa optimizador desarrollará su código como una variable a decidir por el usuario: podrá ser 1 hora, 2 horas, 3 horas, etc.

El programa realizará inferencia de escalado del ajuste fino de los parámetros de simulación obtenidos para las 24 pautas horarias, a variaciones en el número y duración de las pautas de bombeo: por ejemplo: tiempo máximo por evaluación, etc.

8.6 Programa de simulación hidráulica

El contratista desarrollará un programa en Python, que servirá para simular la evolución de los volúmenes en los depósitos, de los tiempos de permanencia en los depósitos y de los tiempos de permanencia en las impulsiones que alimentan a los depósitos, en función de una cierta pauta de caudales de bombeo y de las condiciones iniciales en los depósitos [volúmenes iniciales, tiempos de permanencia inicial, etc.].

El programa servirá para efectuar simulaciones hidráulicas de comprobación o de diagnóstico que se emplearán para construir el programa optimizador.

El programa podrá emplearse, también, para la generación de series históricas referidas a determinados periodos donde sea preciso el cómputo de los tiempos de permanencia en los depósitos en función de los tiempos de permanencia del agua procedente de las impulsiones, si se comprueba que los datos históricos disponibles, referidos a dichos periodos, no tienen en cuenta los tiempos de permanencia del agua procedente de las impulsiones.

En este caso, la simulación de los tiempos de permanencia de los depósitos para el periodo de interés requerirá una serie de días previos de inicialización, o de cómputo, precisos para la convergencia de los tiempos de permanencia en los depósitos a valores reales, pues será preciso partir de tiempos de permanencia en los depósitos de valor nulo para el primer día del periodo previo de cómputo. Durante el periodo de inicialización, según se avanza computando en el tiempo, los valores del tiempo de permanencia irán elevándose hasta converger con valores válidos del tiempo de permanencia.

Los días previos de inicialización dependerán del tiempo de recorrido total del sistema hidráulico de bombeos y depósitos de Miraflores de la Sierra, para el periodo del año con menor consumo, pero como primera aproximación podría ser necesario del orden de unos 7 a 10 días previos de inicialización para garantizar la obtención de valores válidos del tiempo de permanencia.

En relación con lo anterior, el periodo previo de inicialización requerido será determinado por el contratista tomando como base para su determinación, el mes de invierno que se indica en el apartado 8.8 de contraste de operativa. Su cómputo se efectuará del siguiente modo:

- A partir del primer día del periodo de invierno se simulará un régimen hidráulico periódico de periodo 1 día, partiendo de tiempos de permanencia nulos en los depósitos. Dicho régimen se impondrá como periódico porque los caudales de cada bombeo y los caudales de salida de cada depósito del primer día del periodo de invierno se repetirán sistemáticamente para cada día subsiguiente del periodo, de este modo se observará como para cada día subsiguiente computado van evolucionando, para cada depósito, los tiempos de permanencia hasta su convergencia a escala diaria, pues la pauta de bombeo y de caudales de salida es periódica igual cada día. Los días requeridos hasta dicha convergencia diaria serán los que definen el periodo de inicialización P_INI1.

La convergencia se considerará que se ha conseguido para el día i si la suma de las diferencias de los tiempos de permanencia para cada valor de tiempo para el día i e $i-1$ es menor que un cierto umbral que se fijará de común acuerdo con la Dirección del contrato.

- A partir del primer día del periodo de invierno se efectuará el cómputo del tiempo de permanencia en cada depósito partiendo en cada uno de ellos de un valor nulo y de un valor igual a 360 horas (15 días), pero con los datos históricos de caudales bombeados y de caudales de salida de los depósitos. Esto proporcionará dos curvas de tiempo de permanencia en cada depósito que irán convergiendo, una con respecto a la otra, a medida que se suceden los días computados. Dichas curvas se irán aproximando mutuamente hasta su convergencia. Los días requeridos hasta dicha convergencia diaria serán los que definen el periodo de inicialización P_INI2.

La convergencia se considerará que se satisface si la suma de las diferencias entre los tiempos de permanencia de cada curva no supera un cierto umbral a determinar de común acuerdo con la Dirección del Contrato.

- El periodo de inicialización requerido será finalmente el máximo de P_INI1 y P_INI2, añadiendo 3 días como factor de seguridad.

Mediante el procedimiento anterior, se podrá determinar cuál es el tiempo previo requerido de inicialización del tiempo de permanencia para el sistema de bombeos y depósitos de Miraflores de la Sierra.

La carga de registros de días previos del tiempo de permanencia en los depósitos se precisa pues los tiempos de recorrido, en las impulsiones dependiendo de los regímenes de bombeo, pueden llegar a los 3 días o más.

El programa podrá utilizarse, así mismo, para inicializar correctamente las simulaciones del optimizador alimentando a este de datos de tiempos de permanencia en los depósitos correspondientes a días previos al día o periodo que se desea optimizar.

El programa de simulación hidráulica se efectuará para los 4 depósitos y 4 estaciones elevadoras del sistema de Miraflores y su desarrollo se realizará tras la conclusión de la fase O1 y previamente al principio de la fase O2, ya referidas en este pliego.

8.7 Validación de modelos

Los modelos de evaluación de tiempo de permanencia en los depósitos e impulsiones serán contrastados con los datos diarios disponibles por Canal de Isabel II, S.A., M.P., de modo que se puedan validar dichos modelos de evaluación que se integrarán en el optimizador.

Para la validación del modelo de tiempo de permanencia en los depósitos y del modelo del tiempo de permanencia en impulsiones, se efectuará un notebook para el cotejo, visualizaciones y realización de métricas de contraste.

Con base en dicho notebook se efectuará un informe de validación de los modelos implementados de tiempo de permanencia en depósitos y en impulsiones en el programa optimizador [*informe 11*].

8.8 Contraste de operativa optimizada versus operativa actual

Tras la construcción del optimizador y habiendo desarrollado todas las fases descritas, se someterá al optimizador a ejecución masiva para la obtención de las consignas de bombeo durante todos los días de los siguientes periodos:

- un mes de verano de registros históricos.
- un mes de invierno de registros históricos.
- un periodo de 15 días de registros históricos en meses de otoño, para estudiar el tránsito en operativa entre verano e invierno.
- un periodo de 15 días en Semana Santa de registros históricos.

El objetivo será obtener un informe de contraste [*informe 12*] entre la operativa llevada a cabo a diario reflejada en los registros históricos, y la operativa que se llevaría a cabo a través de las consignas que genere el optimizador para cada función objetivo.

- Esta fase de contraste se iniciará para uno de los periodos mensuales indicado, con una escala temporal de 24 horas y discretización horaria, y para todas las funciones objetivo programadas.

En función de los resultados que se obtengan, se decidirá cuál es la escala de resolución y la discretización más conveniente para afrontar el problema de optimización para cada función objetivo. De este modo se podrán observar posibles comportamientos que se den en el sistema hidráulico de Miraflores y que afecten o puedan afectar a cada función objetivo.

Tras la determinación de las escalas y discretizaciones más convenientes para cada función objetivo se procederá a la repetición del proceso de optimización, para el mes seleccionado, en aquellas funciones objetivo que requirieran escalado diferente a 24 horas o discretización diferente a la horaria.

El resto de los periodos se efectuarán con el escalado y discretización horaria que se determinó para el mes seleccionado y para cada función objetivo.

En caso de que existiesen variables de carácter histórico que no estuviesen disponibles para ciertos periodos de las series referidas en este apartado y que las mismas fuesen inferibles, en función del resto de variables históricas de dichos periodos o mediante técnicas de relleno de datos, el contratista deberá efectuar el relleno de dichas variables, previa consulta a la Dirección del Contrato en relación con la metodología que se proponga para cada relleno de la variable a efectuar. La Dirección del Contrato determinará la validez del método de relleno para cada variable. Por ejemplo:

En caso de que no se contase con datos del caudal de salida de un depósito, en una serie de horas, porque hubiese fallado el caudalímetro de salida del depósito en dichas horas, pero se dispusiese del caudal de entrada al depósito y de los niveles de llenado, se determinaría el caudal de salida del depósito, mediante continuidad de balance de masas.

En caso de que se compruebe que los registros del tiempo de permanencia en un cierto depósito no han sido computados teniendo en cuenta el tiempo de permanencia procedente de las impulsiones, deberá efectuarse el cálculo de la serie de los tiempos de permanencia teniendo en cuenta el tiempo de permanencia del agua procedente de las impulsiones. Dicha serie se computará gracias a que el contratista habrá desarrollado los modelos hidráulicos requeridos en el apartado 8.6; el cómputo se deberá efectuar para todos los periodos referidos en este apartado, teniendo en cuenta para su cómputo la necesaria inicialización y procedimiento indicado en el apartado 8.6.

El contraste se elaborará estableciendo diferentes métricas respecto a diferentes funciones objetivo. En este sentido, en sendos meses, se podrá determinar la variación en el coste en energía incurrido, o en la energía consumida, o en los tiempos de permanencia medios o máximos, etc., es decir, teniendo en cuenta cada una de las funciones objetivo que se han de programar.

Para el desarrollo de dicho informe, la Dirección del contrato aportará los datos correspondientes a dichos meses.

El contratista efectuará un notebook que sirva para la realización de los contrastes de operativa y la visualización de los resultados correspondientes.

8.9 Informe final de los trabajos realizado

Concluido los trabajos de contraste de operativa, se habrán concluidos los trabajos concernientes al desarrollo de un optimizador para el sistema hidráulicos de bombeos y depósitos de Miraflores de la Sierra.

En este sentido, deberá efectuarse un informe final [*Informe Final*] que resuma los trabajos realizados, indique las principales conclusiones y plantee propuestas para la implementación en producción del optimizador.

8.10 Comentarios en programación

El programa optimizador y los notebooks a desarrollar deberán incluir las diferentes secciones, procedimientos, declaración de variables, funciones o clases, extensamente comentadas para conseguir la comprensión y seguimiento correcto del código programado.

8.11 Entregables:

Los entregables han sido ya referidos en el texto de este pliego. No obstante, a modo de resumen y para mayor claridad, seguidamente se extractan los entregables que se presumen necesarios:

FASE 01. Optimización de un bombeo y un depósito
Informe 01 sobre declaración de restricciones
Informe 02 sobre implementación de derivadas
Informe 03 sobre normalización de variables
Informe 04 sobre configuración final Código desarrollado Notebook de ejecución y visualización de simulaciones.
Informe 05 sobre propuesta de mejoras [código, algoritmos, funciones, etc]. Primera y segunda versión del informe 05.
Informe 06 sobre evaluación de las mejoras implementadas
Informe 07 sobre propuesta de cythonización
Informe 08 sobre evaluación de las propuestas de cythonización Entrega código desarrollado
FASE 02. Optimización para el sistema completo de Miraflores
Código programa de simulación hidráulica
Informe 09 sobre cythonización u otras alternativas
Informe 10 sobre configuración final y ajuste fino Entrega código desarrollado Notebook correspondiente
Informe 11 sobre validación de tiempos de permanencia Notebook correspondiente
Informe 12 sobre contraste de operativa Notebook correspondiente
Informe Final sobre conclusiones
Manuales de usuario

Esta relación puede variar durante el transcurso del contrato dependiendo de reajustes o nuevos subprocesos que pueden llegar a surgir.

8.12 Datos estructurados de entrada al optimizador

En este momento de redacción del pliego es complicado saber con exactitud la composición exacta de los datos de entrada estructurados que alimentarán la o las funciones de optimización, pues dicha estructura dependerá de la estructura de programación que se desarrolle por parte del contratista con la conformidad del Director del contrato.

No obstante, para que el licitador pueda aproximarse a lo que se precisará y sin que constituya la siguiente relación una relación estricta, ni tampoco la estructura de cada dato, se desarrolla la siguiente lista:

Datos estructurados	Origen	Comentarios
Número de consignas o pautas de bombeo	Elección por el usuario	Variable relativa al número de pautas de bombeo que el optimizador deberá resolver para minimizar el valor de la función objetivo. Es el número de incógnitas del problema de optimización
Duración de cada consigna	Elección por el usuario	Variable relativa a la duración de cada una de las pautas de bombeo
Función objetivo	Elección por el usuario	Diccionario de las funciones objetivo: Identificador de la función objetivo a optimizar, posibles parámetros que la definan elegidos por el usuario
Restricción volumen mínimo depósitos	Elección por el usuario	Variable relativa al número de horas de garantía de servicio a elegir por el usuario para determinar el volumen mínimo de los depósitos: aquel igual al caudal medio de consumo del día o periodo a optimizar multiplicado por dicho número de horas de garantía de servicio
Restricciones opcionales adicionales	Elección por el usuario	Diccionario de las restricciones opcionales: posibles parámetros de definición de cada restricción opcional elegidos por el usuario
Volumenes iniciales en los depósitos	Cargados desde el programa optimizador, los cuadernos Jupyter o desde Scada	Lista de los volúmenes iniciales en cada depósito. 4 componentes
Volúmenes máximos en los depósitos	Cargados desde el programa optimizador, los cuadernos Jupyter o desde Scada	Lista de los volúmenes máximos en cada depósito. 4 componentes
Caudales bombeados 3 o más días previos	Cargados desde el programa optimizador, los cuadernos Jupyter o desde Scada	Lista de 4 listas; cada una de ellas contiene los caudales de bombeo de al menos 72 horas precedentes en cada depósito
Tiempos permanencia 3 o más días previos	Cargados desde el programa optimizador, los cuadernos Jupyter o desde Scada	Lista de 4 listas; cada una de ellas contiene los tiempos de permanencia de al menos 72 horas precedentes en cada depósito
Caudales de consumo efluentes desde cada depósito	Cargados desde el programa optimizador, los cuadernos Jupyter o desde Scada	Lista de 4 listas; cada una de ellas contiene los caudales efluentes de cada depósito derivados para consumo en discretización horaria.
Longitudes impulsiones	Cargados desde el programa optimizador, los cuadernos Jupyter o desde Scada	Lista de 4 listas; cada una de ellas contiene la longitud de cada tramo de diferente sección de cada impulsión
Diámetros impulsiones	Cargados desde el programa optimizador, los cuadernos Jupyter o desde Scada	Lista de 4 listas; cada una de ellas contiene el diámetro de cada tramo de diferente sección de cada impulsión
Alturas geométricas impulsiones	Cargados desde el programa optimizador, los cuadernos Jupyter o desde Scada	Lista de las alturas geométricas de las impulsiones. 4 componentes
Puntos curva altura manométrica impulsiones	Cargados desde el programa optimizador, los cuadernos Jupyter o desde Scada	Lista de 4 listas; cada una de ellas contendrá los puntos que definan la curva de altura manométrica en función del caudal bombeado en cada elevadora
Puntos curva rendimiento	Cargados desde el programa optimizador, los cuadernos Jupyter o desde Scada	Lista de 4 listas; cada una de ellas contendrá los puntos que definan la curva de rendimiento en función del caudal bombeado en cada elevadora
Valores definición bandas bombeo	Cargados desde el programa optimizador, los cuadernos Jupyter o desde Scada	Lista de 4 listas; cada una de ellas contendrá el caudal mínimo y máximo de cada banda de bombeo
Coste energía	Cargados desde el programa optimizador, los cuadernos Jupyter o desde Scada	Lista del coste de la energía discretizado por horas
Coste potencia	Cargados desde el programa optimizador, los cuadernos Jupyter o desde Scada	Lista del coste de la potencia discretizado por horas
Tramos tarificación	Cargados desde el programa optimizador, los cuadernos Jupyter o desde Scada	Lista de los tramos horarios de tarificación: valle, llano y punta.
Fine tuning parámetros	Cargados desde el programa optimizador, los cuadernos Jupyter o desde Scada	Lista con parámetros de configuración del solver de Knitro: máximo tiempo computación por evaluación, tolerancias de convergencia, elección del algoritmo de optimización, elección del método de cálculo del gradiente, elección del método de evaluación de hessianos, número de evaluaciones por simulación, etc...

8.13 Manual del optimizador y de los notebooks

El contratista deberá aportar, al final del contrato, un manual de funcionamiento del optimizador y de los notebooks desarrollados. Un guion tentativo podría ser el siguiente:

1. Introducción:
 - Descripción general del programa.
 - Objetivos y propósito del programa.
2. Requisitos del Sistema:
 - Entorno y hardware necesario.
 - Software necesario (sistema operativo, dependencias, etc.).
3. Instalación:
 - Instrucciones paso a paso para la instalación
 - Resolución de problemas comunes durante la instalación.
4. Configuración:
 - Cómo configurar el programa después de la instalación.
 - Archivos de configuración y sus parámetros.
5. Uso Básico:
 - Guía de inicio rápido.
 - Ejemplos básicos de uso.
6. Funciones y Características:
 - Descripción detallada de todas las funciones y características del programa.
 - Ejemplos de código y casos de uso.
7. API y Extensiones:
 - Documentación de la API (si el programa ofrece una).
8. Solución de Problemas:
 - Preguntas frecuentes.
 - Errores comunes y sus soluciones.
9. Mantenimiento y Actualizaciones:
 - Cómo mantener el programa actualizado.
 - Procedimientos de backup y restauración.
10. Apéndices:
 - Glosario de términos.
 - Referencias adicionales y recursos.

El contratista, tras la conclusión de los trabajos, efectuará a la Dirección del contrato una propuesta de los guiones a desarrollar.

9. EQUIPO DE TRABAJO

En el marco del presente contrato, se establece el equipo de trabajo que participará en la gestión y desarrollo del proyecto, con el fin de asegurar el éxito mediante una adecuada planificación, coordinación y ejecución de las tareas. El equipo estará conformado por representantes de ambas partes: Canal de Isabel II, S.A., M.P. y la empresa adjudicataria.

Seguidamente, se detallan los perfiles de cada miembro del equipo, sus responsabilidades y funciones específicas. Los perfiles solicitados de la empresa adjudicataria son los que se detallan en el apartado 5.1 del Anexo I del Documento de Licitación del Contrato Basado.

9.1 Perfiles de Canal de Isabel II

9.1.1 Director de Contrato

El **Director de Contrato** se encargará de gestionar y dirigir el contrato por parte de Canal de Isabel II, S.A., M.P. Considerando la magnitud del proyecto, las necesidades y la disponibilidad del equipo interno de Canal de Isabel II, S.A., M.P.

En resumen, las principales funciones del Director de Contrato son:

- Definir y priorizar el desarrollo del contrato.
- Garantizar que la ejecución del contrato avanza de manera eficiente.
- Actuar como intermediario entre el usuario final y el equipo de la empresa adjudicataria.
- Eliminar obstáculos que puedan afectar al desarrollo del proyecto.

9.1.2 Usuario Final

El Usuario Final es el actor principal que revisará, validará y aceptará los entregables del proyecto. En este sentido, para este proyecto, el usuario final será el Area de Fomento de la Innovación y será representado por el Director de Contrato.

9.2 Perfiles de la empresa adjudicataria

9.2.1 Director de proyecto

Como recogen tanto el Pliego de Prescripciones Técnicas Particulares como el Pliego de Cláusulas Administrativas Particulares del A.M. Nº 247/2021, es necesario el perfil de un Director de Proyecto que se encargue de la interlocución con Canal de Isabel II en todos los contratos basados de los que su empresa sea adjudicataria.

Las principales funciones de este rol son:

- Supervisar al equipo de desarrollo y asegurar que se cumplen los plazos y estándares de calidad por parte de su equipo.
- Gestionar problemas internos que puedan surgir durante el desarrollo del proyecto.
- Actuar como punto de contacto con el Director de Contrato.
- Garantizar que los desarrolladores tienen los recursos necesarios para completar sus tareas.

9.2.2 Equipo de desarrollo

El equipo de Desarrollo de este contrato estará compuesto por dos desarrolladores. Uno con el perfil de **Científico de Datos** y el otro con el perfil de **Ingeniero de Datos**.

El **Científico de Datos** ejercerá de especialista tanto en el desarrollo del modelo de inteligencia artificial como del optimizador. Para ello deberá poseer un sólido conocimiento en algoritmos de Machine Learning, incluyendo experiencia con algoritmos supervisados y no supervisados.

Deberá ser competente en programación científica en Python, en el análisis de datos en plataformas en la nube como Databricks, así como en optimización.

Las principales funciones del **Científico de Datos** son:

- Garantizar conocimientos profundos en las tecnologías requeridas, detalladas en el epígrafe 5 del presente pliego.
- Implementar el modelo de inteligencia artificial solicitado de forma óptima y reportando los resultados en todas sus fases: recolección y limpieza de datos, análisis exploratorio, selección y construcción del modelo, validación y ajuste, implementación, desarrollo del visualizador, documentación y mantenimiento.
- Desarrollar el programa y notebooks de optimización de consignas solicitado en este pliego, reportando los resultados durante su desarrollo.
- Generar los entregables dentro de los plazos establecidos.
- Reportar el progreso y los bloqueos tanto al Director de Proyecto de su empresa como al Director de Contrato de Canal.
- Participar activamente en las reuniones de seguimiento o extraordinarias, mantener actualizado el cronograma de las tareas y contribuir a la mejora continua del proceso de desarrollo.
- Coordinarse con el Ingeniero de Datos de soporte para el desarrollo de los trabajos de este pliego.

El **Ingeniero de Datos** deberá tener sólidos conocimientos en los ecosistemas Spark y Databricks, así como en procesos de extracción, transformación y carga de datos.

Las principales funciones del **Ingeniero de Datos** son:

- Garantizar conocimientos profundos en las tecnologías requeridas para su perfil.
- Dar soporte al Científico de Datos para la construcción de los desarrollos del modelo de inteligencia artificial en la plataforma de Databricks.
- Participar en las reuniones de seguimiento o extraordinarias, en las que se precise su presencia y contribuir a la mejora continua del proceso de desarrollo.

Tanto el **Científico de Datos** como el **Ingeniero de Datos** deberá cumplir con lo especificado a nivel de formación en el Anexo 5.1 del Documento de Licitación.

Para poder cumplir con estos objetivos:

- el conjunto de horas de trabajo correspondientes al **Científico de Datos** indicado en el Anexo II del Documento de Licitación de este Contrato Basado, que ha sido considerado en la oferta económica para el perfil solicitado, se consumirán con un porcentaje de dedicación del 100%, a jornada completa.

- el conjunto de horas de trabajo correspondientes al **Ingeniero de Datos** indicado en el Anexo II del Documento de Licitación de este Contrato Basado, que ha sido considerado en la oferta económica para el perfil solicitado, no precisarán ser consumidas con dedicación al 100%, a jornada completa, dado el carácter de soporte de este perfil para el desarrollo de los trabajos.
- cualquier modificación por cualquiera de las partes intervinientes de las condiciones especificadas anteriormente estará sujeta a las condiciones relativas a los plazos establecidas en el apartado 10 del presente documento.

10. PLAZOS DE EJECUCIÓN

10.1 Plazo de ejecución de los trabajos

El plazo de ejecución del contrato, CATORCE (14) MESES, ha sido determinado en función de las horas indicadas en el Anexo II del Documento de Licitación de este Contrato Basado, para el Científico de Datos (1.757 horas) que es el perfil que deberá estar de manera continua y con disponibilidad plena en el desarrollo del contrato.

En este sentido, se obtiene, contando con una semana laboral de 40 horas y 4 semanas por mes, un plazo de ocupación neto para el Científico de Datos de 11 meses.

Dado que el Director del Contrato de Canal de Isabel II, S.A., M.P. precisará tiempos de evaluación y aceptación de los trabajos parciales que se vayan realizando durante el desarrollo del contrato y que dichas aceptaciones pueden condicionar la continuidad de los trabajos a desarrollar por parte del Científico de Datos, se estima que la suma de dichos periodos puede conllevar unos 3 meses y en consecuencia el plazo de contrato se fija en 14 meses.

Los trabajos serán desarrollados en dos plazos parciales al término de las cuales se producirán las correspondientes recepciones:

- Primer plazo: Desarrollo y validación del modelo de predicción de consumos mediante inteligencia artificial, con una duración máxima de SEIS (6) MESES.
- Segundo plazo: Desarrollo y validación del programa de optimización de consignas del sistema de bombeos y depósitos de Miraflores, desde que se completen los trabajos del primer plazo hasta CATORCE (14) MESES.

Las recepciones parciales de los trabajos referidos se efectuarán al completarse cada uno de los dos plazos anteriormente referidos.

10.2 Plazo máximo de ejecución del contrato

Tal y como se indica en el apartado 2 del Anexo I del Documento de Licitación, el plazo de ejecución del proyecto será de 14 meses naturales, contados a partir de la firma del acta de inicio. Durante este plazo, se deberá garantizar que el Científico de Datos y el Ingeniero de Datos estén disponibles, cumpliendo con los términos referidos en este pliego en cuanto a su dedicación y disponibilidad, de tal forma que el contratista desarrolle los trabajos demandados garantizando su continuidad y minimizando el plazo necesario para finalizar los trabajos/la obtención del producto final.

Los motivos que se contemplan como justificados para el retraso en el plazo establecido para la finalización de los trabajos respecto al indicado en el apartado anterior del presente documento, son los siguientes:

- **Retraso motivado por Canal de Isabel II S.A., M.P.:** se contemplan situaciones de retraso por dependencias de otros equipos de Canal de Isabel II, S.A., M.P., concesión de permisos u otras gestiones internas relacionadas con el proyecto que pudieran suponer un bloqueo temporal.
- **Retraso motivado de la empresa adjudicataria:** se contemplan situaciones de gestión internas propias de la empresa adjudicataria que afecten a la disponibilidad del perfil solicitado (vacaciones, baja por enfermedad, etc.) que no superen un plazo máximo de 35 días naturales en total en el periodo de ejecución de los trabajos. En caso de superar dicho plazo, se deberá sustituir el recurso por otro de igual

perfil o superior y no se contabilizarán ni facturarán las horas necesarias para que el nuevo recurso adquiera la capacitación alcanzada por el sustituido como consecuencia del tiempo ya dedicado al proyecto. El encargado de validar que el nuevo recurso ha alcanzado la capacitación necesaria equivalente será el Director de Contrato de Canal de Isabel II, S.A., M.P.

En ninguno de los dos supuestos anteriores, las horas pertenecientes al periodo de retraso serán contabilizadas en el cómputo de las horas demandadas por Canal a la empresa adjudicataria.

11. FACTURACIÓN DE LOS TRABAJOS

El valor estimado del contrato es de 119.534,21 € sin IVA correspondientes a la suma de los importes de 1.757 horas del Científico de Datos y de 180 horas del Ingeniero de Datos.

Dicho importe estimado se ha efectuado en función de los precios máximos de las ofertas adjudicatarias en el Lote 1 del Acuerdo Marco 247/2021, para los perfiles referidos anteriormente, los cuales se recogen el apartado 5.1 del Anexo I del Documento de Licitación.

Canal de Isabel II, S.A., M.P. no abonará más horas que las anteriormente referidas para cada uno de los perfiles reseñados, pues son las horas que se prevén para el desarrollo íntegro de los trabajos y por las que licita y efectúa su oferta económica el licitador: véase Nota 1 del Anexo II del Documento de Licitación: *(1) Las unidades establecidas en la tabla anterior no podrán ser modificadas por el licitador. En caso contrario, la oferta no será tomada en consideración en el presente procedimiento de licitación.*

La facturación de los trabajos realizados en el presente contrato se efectuará en dos pagos, tras la aceptación formal de las prestaciones objeto de este contrato para las dos recepciones parciales que se prevén:

Primera certificación al término del primer plazo parcial, en concepto del desarrollo y validación del modelo de predicción de consumos mediante inteligencia artificial.

El número de horas que se certificarán para el Científico de Datos será de 720 horas y para el Ingeniero de Datos será de 74 horas.

Canal de Isabel II, S.A., M.P. no abonará más horas que las anteriormente referidas para cada uno de los perfiles reseñados.

Segunda certificación al término del segundo plazo parcial, en concepto del desarrollo y validación del programa de optimización de consignas del sistema de bombeos y depósitos de Miraflores.

El número de horas que se certificarán para el Científico de Datos será de 1.037 horas y para el Ingeniero de Datos será de 106 horas.

Canal de Isabel II, S.A., M.P. no abonará más horas que las anteriormente referidas para cada uno de los perfiles reseñados.

Firmado electronicamente por: Lydia Sáez
García
En la fecha y hora 05.06.2025 10:37:07
CEST

Firma: Lydia Sáez García
Jefa Área Fomento de la Innovación

Firmado electronicamente por: Lydia Sáez
García
Por delegación de Jaime Flores Cabeza
En la fecha y hora 05.06.2025 13:07:30

Firma: Jaime Flores Cabeza
Subdirector de I+D+i

Firmado electronicamente por: JUAN
SANCHEZ GARCÍA
En la fecha y hora 09.06.2025 10:15:39
CEST

Firma: Juan Sánchez García
Director de Innovación e Ingeniería