



**UNIVERSIDAD DE CHILE**  
**FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS**  
**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA**

## **SISTEMA DE GESTIÓN DE AGUA ACOPLADO A UNA MICRO-RED PARA COMUNIDADES MAPUCHE.**

**MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL ELÉCTRICO**  
**CRISTIAN EDUARDO AHUMADA OLIVA**

**PROFESOR GUÍA:**  
**DORIS SAÉZ HUEICHAPAN**

**MIEMBROS DE LA COMISIÓN:**  
**CARLOS MUÑOZ POBLETE**  
**PATRICIO MENDOZA ARAYA**

**SANTIAGO DE CHILE**

**2018**

## **RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR**

**AL TÍTULO DE:** Ingeniero Civil Eléctrico

**POR:** Cristian Ahumada Oliva

**FECHA:** Septiembre 2018

**PROFESORA GUÍA:** Doris Sáez Hueichapan

### **SISTEMA DE GESTIÓN DE AGUA ACOPLADO A UNA MICRO-RED PARA COMUNIDADES MAPUCHE.**

En este territorio todavía existen comunidades aisladas que no tienen acceso a la energía eléctrica o que tienen un acceso de baja calidad mientras estén más alejadas de los centros urbanos. Para solucionar estos problemas para estas de comunidades, dentro de las cuales se incluyen comunidades mapuche, se han generado entre otras soluciones las micro-redes de energías renovables, que se hacen cargo de la energía.

Además del problema de la electricidad, en las comunidades del sur y en particular de la Novena región de la Araucanía, existe un problema extendido que tiene relación con la escasez de agua para agricultura y consumo humano, que se produce en verano, debido a, entre otros factores, a la presencia forestal en gran parte del territorio. Esto además en cuanto a las comunidades mapuche se presenta como un problema tanto en tareas productivas, afectando su calidad de vida, pero también en términos culturales y espirituales debido a que la cosmovisión mapuche se relaciona de otra forma con el territorio que habita.

En esta memoria se propone un sistema de gestión de agua que permita el llenado de sistemas de estanques usando la energía excedente de una micro-red. Este excedente puede ser escaso en cuyo caso se debe priorizar la decisión.

Como solución, se ha diseñado un controlador predictivo basado en modelo (MPC), que a través de la predicción de los niveles de los estanques busca la solución óptima al problema de la coordinación. Primero se modela el sistema hídrico, la parte eléctrica, se aplican simplificaciones y se linealiza la planta utilizando una identificación a través de un modelo ARX. Para resolver el problema de optimización se utilizan algoritmos genéticos para calcular acción de control que se acerque al óptimo, de forma numérica incluyendo las restricciones del problema, generando gran un ahorro en tiempo de procesamiento.

En los resultados se puede apreciar que, aunque el algoritmo genético no asegura el óptimo, si se acerca lo suficiente para que se note el efecto del controlador, comparado con controladores On/Off, siguiendo referencias y cumpliendo restricciones. Finalmente, cuando se incluye la restricción de energía para el funcionamiento de las bombas, se observa que por acción del MPC se logra hacer una coordinación del llenado de los estanques por turnos incluso cuando la energía no alcanza para ambos sistemas en paralelo.

## Dedicatoria

*Wirintukulu tüfachi küzaw,  
tukulpanien tañi ñuke, tañi  
chaw, tañi peñi ka kom pu  
che mülelu ka küzawkelu lof  
José Painecura mew.*

*Ka tukulpanien kom tañi pu  
peñi ka kom tañi pu lamgen  
mülelu kakerume mapu  
mew*

## Agradecimientos

Mañumnien tañi epu wünen, Carmen ka Ricardo, tañi kuñiwтуetew ka tañi kimeletew kom tañi mogen mew, mülenofule egu, famgechilelayafun. Ka mañumniefiñ ñi zoy küme kimelfe gen mew egu. Petu mülen feyegün iñchiñ, taiñ ruka mew, welu allwe mülepuaigu ñi lelfün mew Ruka Pillañ pigechi zegüñ püle tañi ürükütuel, femle egu, iñche ayiwkülean. Mañumnien tañi peñi Ricardo tayu aukantukeel kakerume zugu (kiñeke mew tayu müna Felipe iñchiñ) tayu kawitukeel ka tayu ayekakeael. Newe nütxamkakenofuliyu rume, welu iñche kimmien tayu kelluwkeael. Amulnieayu tayu peñiwengen.

Mañumnien tañi chuchu tañi nütxamkakeetew ka tañi ramtukeetew chumgechi ñi amulen tañi chillkatun. Pewmagen ñi chuchu ñi müleael kom iñchiñ zoy alün txipantu mew. Ka mañumnien tañi chezky em, tañi kuku em ka tañi laku em. Feyegün penoelimew rume universidad mew, welu kimün ñi ayiwküleafel. Zoy aluñma kimmiefuli egün, kümeafui. Ka mañumnien tañi ñukentu ka ñi epu müna ñuke püle. Ka mañumnien tañi pu malle, tañi pu palu ka tañi pu müna chaw püle. Tüfachi reñma mew txemün, txemfuli ka reñma mew, ka chegeafun.

Mañumnien tañi pu kimelfe, lamgen Doris ka Carlos, ñi kelluetew tüfachi küzaw mew, rume kimigu ka kümeche geigu, mañumfiñ ñi küpa kelluafiel taiñ pu che mülelu lof mew, newe gelay che femgechi femkelu tüfachi universidad mew. Ka mañumnien pu che küzawkelu ka küzawkefulu Control Avanzado II pigechi laboratorio mew. Kom pu laboratorio che kimelenew kiñeke zugu ka kelluenuw tüfachi küzaw mew. Mañumnien kom pu lof che, mülelu lof José Painecura mew, Amuyem lof mew, küme llowkeenew, ka nütxamkaken pu che iñchiñ. Pewmagele tüfachi küzaw kelluafuy chi pu lof che ñi mogen mew.

Mañumnien tañi pu Chillkatufe UChile Mew, ka kom tañi pu peñi ka tañi pu lamgen tañi kimnieel petu tañi chillkatun. Mañumnien kom pu che petu kimlu ka kimel-lu mapuzugun iñchiñ, kom pu che tañi kimeletew ñi zoy kimam mapuche az mogen. Kom kelluenuw egün tañi zoy ayiwküleael universidad mew, zoyelchi küzawgechi reqleantü mew. Ka mañumnien kom tañi pu wenüy yafütulu iñchiñ, chillkatulu iñchiñ, kawitulu iñchiñ petu tañi chillkatun. Feyegün ka kelluenuw tañi zoy ayiwküleael tüfachi U mew.

Mañumnien kom pu che küpalu re ñi chillkatunoam, feychi pu che küpalu tañi kelluam kisu tañi pu che ka kom iñchiñ taiñ zoy küme mogeleael. ***Rume mañumkülen.***

También agradecer a los siguientes proyectos:

- FONDEF IDeA 14I10063 “Diseño e Implementación de un Prototipo Experimental de Microredes para Comunidades Mapuche”
- FONDECYT 1170683 “Robust Distributed Predictive Control Strategies for the Coordination of Hybrid AC and DC Microgrids”
- Instituto Sistemas Complejos de Ingeniería (CONICYT – PIA – FB0816).
- Solar Energy Research Center SERC-Chile (CONICYT/FONDAP/ 15110019)

## Tabla de contenido

<b>1</b>	<b>Introducción .....</b>	<b>1</b>
<b>1.1</b>	<b>Objetivo general.....</b>	<b>2</b>
<b>1.2</b>	<b>Objetivos específicos .....</b>	<b>2</b>
<b>1.3</b>	<b>Alcances.....</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Revisión bibliográfica.....</b>	<b>4</b>
<b>2.1</b>	<b>Antecedentes .....</b>	<b>4</b>
<b>2.2</b>	<b>Modelación de sistema hídricos .....</b>	<b>7</b>
<b>2.3</b>	<b>Control predictivo .....</b>	<b>20</b>
<b>2.4</b>	<b>Algoritmos genéticos .....</b>	<b>22</b>
<b>2.5</b>	<b>Discusión .....</b>	<b>23</b>
<b>3</b>	<b>Diseño de un modelo de sistema de gestión de agua acoplado a una micro-red .....</b>	<b>25</b>
<b>3.1</b>	<b>Planteamiento del problema.....</b>	<b>25</b>
<b>3.2</b>	<b>Modelo propuesto .....</b>	<b>29</b>
<b>3.3</b>	<b>Discusión .....</b>	<b>34</b>
<b>4</b>	<b>Simulador del sistema de gestión de agua acoplado a una micro-red.....</b>	<b>36</b>
<b>5</b>	<b>Resultados.....</b>	<b>47</b>
<b>6</b>	<b>Conclusiones.....</b>	<b>58</b>
<b>7</b>	<b>Trabajo futuro .....</b>	<b>59</b>
<b>8</b>	<b>Bibliografía .....</b>	<b>61</b>

## 1. Introducción

Existen diversas comunidades dentro del país, que no tienen acceso completo a todos los servicios básicos, debido, principalmente, a su nivel de aislamiento con respecto a las grandes ciudades. En términos eléctricos esto se ve reflejado en un suministro energético en el cual la distribución empeora su calidad, porque no existen incentivos económicos para que estas comunidades aisladas tengan un mejor acceso a la electricidad. Además, esto último se suma a que las condiciones climáticas como lluvia, humedad, vientos fuertes y, en zonas costeras, una alta salinidad, pueden afectar en los dispositivos, disminuyendo su vida útil, y afectar la calidad de suministro energético llegando incluso a pasar varios días con cortes de luz.

Se puede nombrar a algunas comunidades mapuche de la IX región de la Araucanía como ejemplo de comunidades aisladas mencionadas, que muchas veces además de este aislamiento, poseen un contexto de pobreza que afecta directamente su calidad de vida y aspectos culturales como pueblo.

La Araucanía es uno de los territorios en los que se tiene como principal actividad económica la plantación de monocultivos forestales, de especies exógenas como pino y eucaliptos. Estos abarcan grandes extensiones de tierra y tienen consecuencias locales en los lugares donde se encuentran. Algunas de las consecuencias son la baja en la cantidad de agua disponible para riego y un empeoramiento de los suelos para cultivo de alimentos [1,2]. Se debe notar también que el hecho de ser una comunidad mapuche hace que exista una relación importante con su territorio y, por lo tanto, con agua que usan para riego y para consumo.

En este contexto este trabajo se sitúa específicamente en la costa de la IX región, en particular en la Comunidad Mapuche José Painecura de Hueñalihuen, donde se tiene proyectada una micro-red de energías renovables para resolver el problema del acceso energético.

En esta comunidad se hace necesario, además, generar una solución al problema de acceso al agua para agricultura como fuente productiva de la comunidad, entendiendo esta solución como parte del conjunto de la micro-red y, por lo tanto, se debe generar un sistema de gestión de agua que funcione acorde al perfil de demanda energética de la comunidad, sin interferir en éste, y que se haga cargo de la necesidad de riego en las hortalizas o invernaderos de los comuneros. Este sistema debe considerar limitaciones tanto de la disponibilidad de energética como de la disponibilidad de agua actual, y a su vez de la estimación de su disponibilidad futura. Se debe considerar que no se trata de un sistema de dimensionamiento de los componentes, sino que se enfoca en la optimización de su operación dado que estos elementos, por ejemplo, bombas y estanques, ya están en la comunidad.

En el diagrama de la figura 1 se puede observar el sistema que se modelará, simulará y controlará. Este consta de una napa subterránea, que es la que alimenta naturalmente los pozos 1 y 2. Desde

estos y a través de las bombas 1 y 2, se succiona el agua que va a los estanques que están sobre torres situadas en la superficie. De cada estanque sale un consumo que representa el riego en el territorio. Se debe notar que las alturas de las bombas son distintas entre sí, también son así las de los estanques, generando diferencias en las potencias necesarias para cada subsistema. Finalmente se puede observar un bloque que representa la micro-red, que es la que suministrará energía para el llenado de los pozos, luego del consumo diario de las personas de la comunidad.

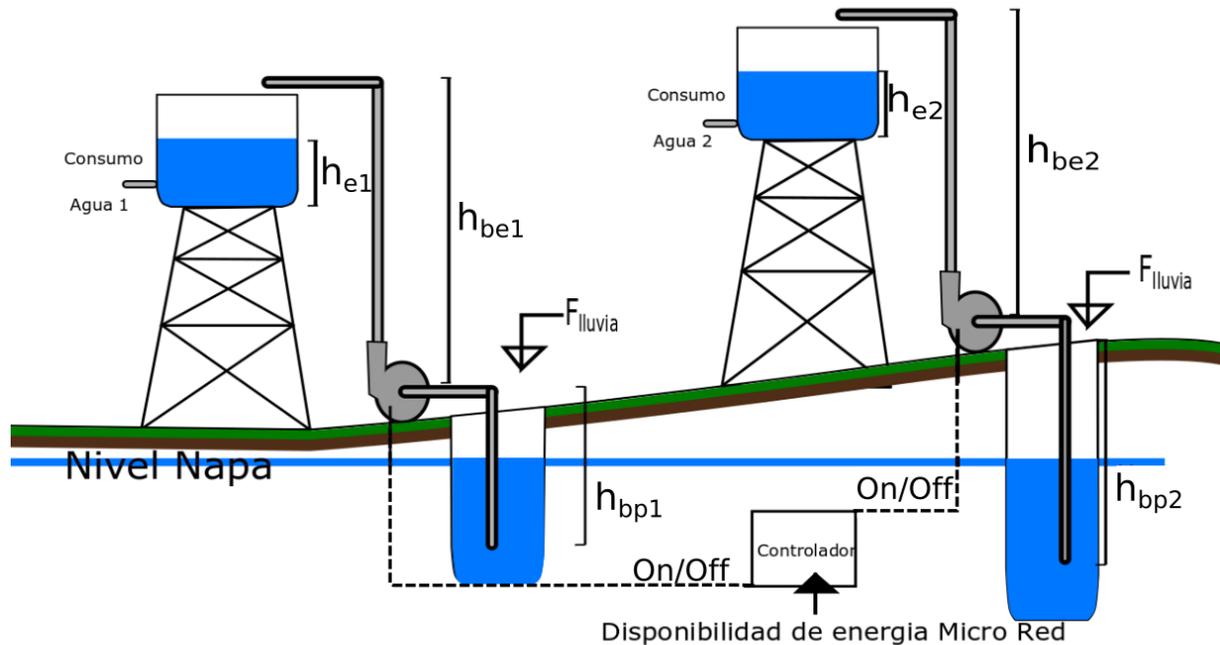


Figura 1. Vista general del sistema de 2 estanques y 2 pozos. Fuente: Elaboración propia.

### 1.1 Objetivo general.

- Diseñar estrategias de control predictivo para un sistema de gestión de agua acoplado a una micro-red en una comunidad Mapuche considerando las demandas de energía y agua.

### 1.2 Objetivos Específicos.

- Desarrollar un simulador del sistema hídrico para dos estanques y dos pozos conectados a través de una napa subterránea para funciones de riego tecnificado en invernaderos de la comunidad mapuche José Painecura de Hueñalihuen.

- Validar cualitativamente el simulador de sistema hídrico para dos estanques y dos pozos conectados a través de una napa subterránea para funciones de riego tecnificado en invernaderos de la comunidad mapuche José Painecura de Hueñalihuen.
- Diseñar una estrategia de control para el sistema hídrico para coordinar el llenado de los estanques empleando los excedentes de energía de la micro-red proyectada para la comunidad mapuche José Painecura de Hueñalihuen.
- Probar por simulación el sistema de control de coordinación de llenado de los estanques empleando los excedentes de energía de la micro-red.

### **1.3 Alcances**

En este trabajo, se buscará la modelación del sistema hídrico de una napa, con dos estanques y dos pozos como lo indica la figura 1, validados a través de simulaciones, y su control respectivo validado también por simulación en distintos escenarios.

## 2. Revisión Bibliográfica.

### 2.1 Antecedentes.

#### 2.1.1 Comunidad.

El lugar que se analiza para el diseño del sistema es la comunidad mapuche José Painecura, ubicada en la región de la Araucanía, en el sector de Hueñalihuen, correspondiente a la municipalidad de Carahue administrativamente. Sus coordenadas son aproximadamente  $38^{\circ}32'S$  y  $73^{\circ}30'O$ . En la figura 2 se puede apreciar su emplazamiento en un contexto regional.

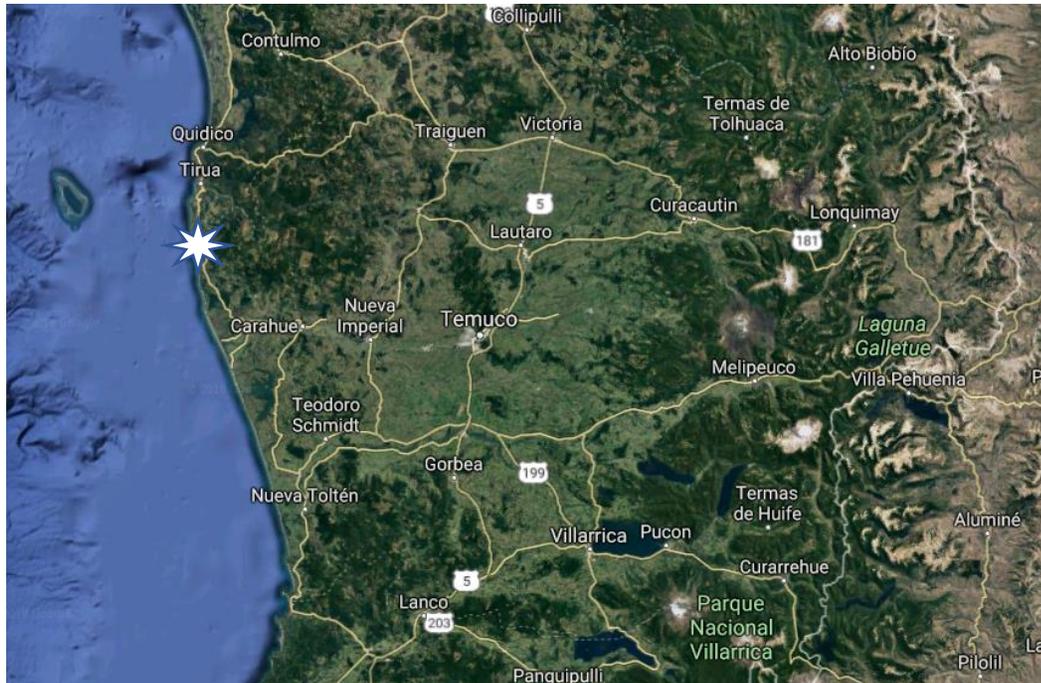


Figura 2. Ubicación Comunidad José Painecura, contexto regional. Fuente: Google Earth.

Hay 44 familias, que corresponden a 140 personas las cuales se dedican a distintas actividades productivas relacionadas con el territorio.

Una de sus fuentes de ingreso la agricultura, principalmente de trigo y papas, además en algunas casas se tienen invernaderos en donde se cultivan distintas variedades de verduras, pero que se ha visto afectada con las sequías se han producido en la zona. Esto merma la economía de la comunidad y de cada familia, por lo tanto, este trabajo busca aportar desde la gestión del agua para el riego.

Otra actividad productiva es la obtención y comercialización de productos marinos (algas y mariscos principalmente).

En la Figura 3 se puede observar la distribución de la comunidad, destacando ubicación de los pozos, que son uno de los focos de este trabajo.

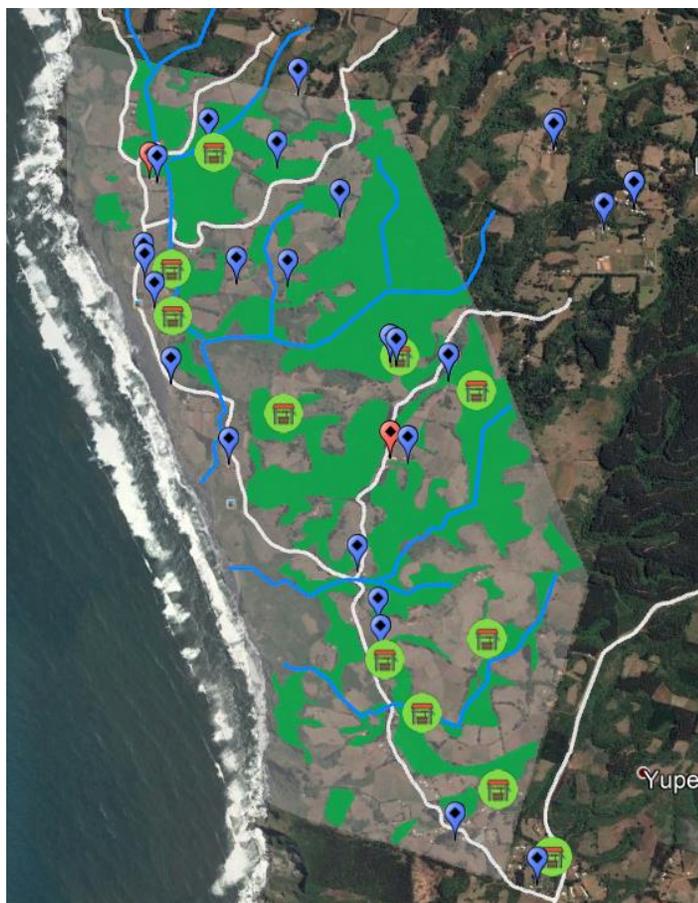


Figura 3. Distribución de casas (marcadores azules) y pozos, Comunidad José Painecura. El área verde indica donde hay recurso forestal y las líneas azules recursos hídricos. Fuente Google Earth.

En el contexto del proyecto de micro-red, al seguir una metodología participativa [21], se hacen visitas a la comunidad José Painecura con una periodicidad mensual para que coincidan con la reunión de comunidad, en donde se explica el estado del proyecto y se conversa con los miembros de la comunidad. También hay visitas no periódicas en las que se deben hacer tareas necesarias para el desarrollo del proyecto como recuperación de datos, entrevistas, visitas a terrenos, entre otras.

En la visita de enero de 2018, se obtuvieron datos que sirven para hacer que el problema en esta memoria sea más cercano a la realidad de la comunidad. En esa visita, se hizo una encuesta que contempló la parte hídrica y la parte eléctrica de las 14 viviendas que fueron seleccionadas para la implementación de la micro-red en los anexos se adjuntan fotos de la comunidad.

Dentro de estas 14 viviendas existen dos que usan bombas de agua y además su fuente principal de agua es la misma, por lo tanto, se pueden usar sus datos para la simulación, apuntando a una implementación real del sistema.

### **2.1.2 Micro-red.**

Una micro-red es un sistema de distribución eléctrica que posee unidades distribuidas de generación, almacenamiento y cargas controlables, que se controlan y coordinan y que pueden estar conectadas a la red, o permanecer aislada de esta [12].

Existen en la literatura distintos niveles de control para las micro-redes, principalmente se refiere a esto como primario, secundario y terciario. Estos se diferencian en las variables que se manipulan y controlan. El control primario se aplica en las variables más rápidas regulando corriente, voltaje y frecuencia de una micro-red, el secundario está relacionado con la seguridad, confiabilidad y aspectos económicos de la micro-red, relacionado con la operación de las unidades y el despacho, finalmente, el tercero aparece cuando se tienen más de una micro-red y se deben coordinar para la operación.

Algunas de las ventajas de las micro-redes para la red de distribución son, por ejemplo, un alivio de la demanda de la red de distribución, respuesta ante cambios de carga [12].

Otra ventaja, ahora del lado de los consumidores, son que desde su concepción se piensan en torno a las necesidades de la comunidad local involucrada. Una de las principales en la aplicación a la comunidad José Painecura es la de evitar cortes de energía por problemas en la red de distribución.

### **2.1.3 SMART Farm.**

El SMART Farm, toma su nombre de las siglas Sustainable (Sostenible), Manageable (Administrable) and Accessible (Accesible) Rural Technologies (Tecnologías). Se compone de distintas tecnologías de medición, comunicación, interfaces con el usuario, entre otras, a fin de mejorar el trabajo productivo en el campo a través del monitoreo y automatización de procesos de agricultura y ganaderos. También intentando aprovechar al máximo los recursos disponibles, que muchas veces son escasos. Finalmente, también debe ser accesible, tanto en precio como en su uso práctico debido a que no siempre se cuenta con gente experta para la operación ni con una cantidad de recursos suficientes para poder generar un sistema más caro, o renovarlo.

Dados estos antecedentes, en la siguiente sección se procede a explicar los modelos que se usarán para poder generar el diseño y luego probar la técnica por simulación.

## 2.2 Modelos sistema hídrico.

El sistema que se modelará es el que aparece en la figura 1, y consta de una napa que suministra agua a dos pozos usados para regadío. A cada pozo corresponden, además, un estanque que se llena con agua su pozo respectivo, extraída con una bomba centrífuga. Además, en cada estanque se tiene un consumo que corresponde al riego.

### Estanques:

Para modelar los pozos, estanques y la napa, se usarán estanques cilíndricos, los cuales tienen un volumen que se calcula como:

$$V = h\pi r^2 \text{ [m}^3\text{]} \quad (1)$$

donde

$h$ : altura del estanque [m].

$r$ : radio de la base del estanque [m].

### Napa:

Es la fuente de agua del sistema en general, que alimenta a los pozos y por lo tanto indirectamente a los estanques. Se utilizará la ecuación (1) para modelarla. La altura de la napa define, también, las alturas a las que se nivelan los pozos. Para esto último se debe definir un estanque de sección transversal lo suficientemente grande para que, al equilibrarse con los pozos, mantenga estable su nivel de agua. Por esta razón este nivel podría ser tomado como referencia para los demás elementos. Este nivel de agua podría cambiar en función de un flujo entrante de lluvia, que puede ser modelado como una función estocástica de baja frecuencia, que permite describir periodos de días con máximos de lluvia.

### Pozos:

Estos son la fuente directa de agua para llenar los estanques. Se nivelan a la napa, modelándose su relación como vasos comunicantes, según la ecuación [3].

$$S_1 h_1 + S_2 h_2 = (S_1 + S_2) \cdot h_{eq} \quad (2)$$

donde

$S_1$ : área basal vaso 1 [m<sup>2</sup>].

$h_1$ : altura vaso 1 [m].

$S_2$ : área basal vaso 2 [m<sup>2</sup>].

$h_2$ : altura vaso 2 [m].  
 $h_{eq}$ : altura de equilibrio [m].

La ecuación (2) dice que la presión hidrostática solo depende de la altura, por lo que los pozos que compartan tenderán a tener el mismo nivel de agua.

En este caso, se deben obtener la profundidad máxima y el diámetro. Su entrada es el flujo de agua que suministra la napa y su salida sería el flujo que succiona la bomba centrífuga desde el estanque.

### **Estanques para consumo:**

Estos son modelados a partir de su volumen con una válvula de salida, en la cual habrá flujo constante cuando se esté consumiendo agua. Para estos estanques no basta con tomar la altura dentro de sí mismos, sino que también se debe tomar en cuenta que existe lomaje que varía en el espacio y que relativo a ese lomaje los estanques se encuentran en torres de altura estándar. Estas condiciones aumentarán la distancia entre el pozo y el estanque y por lo tanto la altura que se debe elevar el agua por medio de la bomba, que sería el flujo de entrada de estos elementos.

Según esto último la altura total que se tendrá que mover el agua para cada par pozo-estanque con una bomba de alimentación está dada por la ecuación (3).

$$h_t = h_{be} + h_{bp} [m] \quad (3)$$

donde

$h_t$ : altura total [m].  
 $h_{be}$ : altura del estanque [m].  
 $h_{bp}$ : altura bomba pozo[m]. (Ver figura 1)

### **Cañerías:**

En el modelo de cañerías, un factor importante es calcular las pérdidas para valores de largo de la cañería, sección transversal y material. Se puede hacer un cálculo usando la siguiente ecuación, que expresa en términos de altura [4]:

$$h_L = A Q^B [m] \quad (4)$$

Donde

$h_L$ : pérdida en la cañería [m].  
 $Q$ : caudal  $\left[ \frac{m^3}{s} \right]$ .

$A$ : coeficiente de resistencia.  
 $B$ : exponente de caudal.

Usando la ecuación (4) y en el caso de flujo de agua, se usa la formulación de Hazen – Williams con los siguientes valores:

$$B = 1.852 \quad (5)$$

$$A = \frac{10.674}{C^{1.852} d^{4.871}} L \quad (6)$$

donde

$C$ : coeficiente de rugosidad Hazen-Williams (entre 140-150 para plástico).  
 $d$ : diámetro de la tubería [ $m$ ].  
 $L$ : longitud de la tubería [ $m$ ].

### Otras pérdidas:

Para otro tipo de pérdidas se utiliza la siguiente ecuación que viene dada por la altura cinética, dependiendo de que elemento se trate, se cambiará el coeficiente pérdidas menores según lo que aparece en la tabla 1 [4]:

$$h_{pm} = K \left( \frac{v^2}{2g} \right) = \left( \frac{8K}{\pi^2 g D^4} \right) Q^2 \quad [m] \quad (7)$$

donde

$K$ : coeficiente de pérdidas menores (Tabla 1).  
 $v$ : velocidad del flujo  
 $g$ : aceleración de gravedad.  
 $D$ : diámetro del elemento [ $m$ ].  
 $Q$ : caudal  $\left[ \frac{m^3}{s} \right]$

Tabla 1. Coeficientes de pérdidas menores [4].

Accesorio	Coeficiente de pérdidas
Válvula de Globo	10.0
Válvula de Retención a Clapeta	2.5
Válvula Compuerta	0.2
Codo radio pequeño	0.9
Codo radio mediano	0.8
Codo radio grande	0.6

Por lo tanto, a la altura se debe agregar que se debe levantar (para compensar las pérdidas) quedando una altura real al sumar (3), (4) y (7):

$$h_r = h_t + h_L + h_{pm} \quad (8)$$

### **Bombas:**

Estas son, en términos simples, máquinas usadas en sistemas hidráulicos y se usan para transformar energía mecánica en energía hidráulica (velocidad y presión), por lo tanto, sirve para mover fluidos. En particular esta memoria se centra en el bombeo de agua para regadío, por lo que ese será el foco de atención.

Existen distintos tipos de bombas y clasificaciones, por lo tanto, dependiendo de la aplicación se debe buscar la bomba indicada en términos de potencia, caudales, restricciones físicas o de terreno [14,15].

Las bombas típicamente son caracterizadas en:

- Potencia requerida, Caballos de fuerza o Horse Power, (1HP=0.746kW).
- Caudal en lpm o gpm.
- Presión de salida en metros o pies.
- Presión de entrada en metros o pies.

## **Tipos de bombas:**

### **Bombas de desplazamiento positivo o volumétricas.**

Este tipo de bombas se caracterizan por juntar una cantidad de fluido y luego moverlo en ciclos de volumen constante periódicamente, esto es independiente de la presión de descarga. Principalmente se usan en cuando se requiere precisión en el volumen que se quiere desplazar.

Uno de los problemas que presentan estas bombas es que no pueden funcionar con válvulas cerradas ya que, al tener la presión de descarga independiente del volumen desplazado, sigue funcionando y puede hacer explotar líneas o dañar la bomba. Se pueden distinguir dos tipos:

**Alternativas:** Como pistones émbolos o diafragmas, esto aprovecha la succión que se puede generar a través de estos elementos en combinación con válvulas de un solo sentido.

**Rotativas:** En este caso el eje de rotación encierra el volumen contra el borde de la cámara interna, esto último es importante debido a que se pueden generar deslizamientos que empeoran el rendimiento de éstos. Esto puede ser generado por la erosión que se da cuando se opera la bomba a velocidades muy altas. Pueden ser por engranajes, tipo tornillo, de paleta, lóbulo, cavidad progresiva, peristáltica.

### **Turbo bombas o bombas dinámicas.**

Se basan en la transformación de energía mecánica a cinética y luego a potencial. Cede la energía cinética desde el impulsor o rodete al fluido, aumentando el flujo por la rotación. Estos también son de flujo continuo a diferencia de las anteriores, que juntan un volumen y luego lo mueven.

Generalmente en la salida tienen un radio creciente ya que al aumentar la sección transversal se disminuye la velocidad. Estas bombas, a diferencia de las de desplazamiento positivo, pueden trabajar con válvulas de salida cerrada por un tiempo, debido a que se esto se puede interpretar como "cabeza infinita" o altura "infinita", que se compensa con flujo cero o muy bajo. También se pueden dañar, pero sería más resistente que las volumétricas.

Las partes son principalmente el rodete "la hélice" y la voluta o salida del flujo de radio creciente, convierte cinético en presión.

Las bombas se pueden modelar por su potencia hidráulica, la cual está dada por la altura real, el caudal y el peso específico del fluido, en este caso para el agua [6]:

$$P_h = \frac{Q h_r}{1000} \gamma \text{ [kW]} \quad (9)$$

Donde

$Q$ : caudal  $\left[\frac{m^3}{s}\right]$ .

$h_r$ : altura manométrica real  $[m]$ .

$\gamma$ : 9800  $\left[\frac{N}{m^3}\right]$ . (peso específico del agua).

La eficiencia de esta bomba está dada por:

$$\eta_b = \frac{P_h}{P_m} * 100 \text{ [%]} \quad (10)$$

donde:

$P_h$ : potencia hidráulica  $[kW]$

$N_h$ : potencia hidráulica de la bomba  $[W]$ .

$P_m$ : potencia del motor  $[W]$ .

Este factor depende del punto de operación y, por lo tanto, los fabricantes de bombas suelen poner este dato en el datasheet.

Tomando en cuenta lo anterior y como característica particular de este tipo de máquinas, se tienen las leyes de afinidad para bombas dadas por las siguientes ecuaciones cuando se tiene el diámetro del impulsor constante [16] y se cambia la rapidez del eje:

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{n_1}{n_2} \quad (11)$$

$$\frac{P_{h1}}{P_{h2}} = \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^3 \quad (12)$$

$$\frac{h_1}{h_2} = \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2 \quad (13)$$

Donde:

$Q$ : caudal  $\left[\frac{m^3}{s}\right]$

$n$ : velocidad  $[RPM]$

$h$ : altura  $[m]$

$P_h$ : potencia hidráulica  $[kW]$

Dejando ahora la rapidez del eje constante y cambiando el diámetro del impulsor.

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{d_1}{d_2} \quad (14)$$

$$\frac{P_{h1}}{P_{h2}} = \left(\frac{d_1}{d_2}\right)^3 \quad (15)$$

$$\frac{h_1}{h_2} = \left(\frac{d_1}{d_2}\right)^2 \quad (16)$$

Donde:

$Q$ : caudal  $\left[\frac{m^3}{s}\right]$

$d$ : diámetro del impulsor  $[RPM]$

$h$ : altura  $[m]$

$P_h$ : potencia hidráulica  $[kW]$

Además, por la parte eléctrica el motor de inducción puede ser modelado con su circuito equivalente. Este circuito está descrito en parte por la siguiente ecuación:

$$T = k \cdot V_r \cdot I_r \cdot \cos \phi \quad (17)$$

Donde:

$T$ : torque  $[N \cdot m]$

$V_r$ : voltaje en el rotor  $[V]$

$I_r$ : corriente en el rotor  $[A]$

$\phi$ : fase.

Y  $k$  es una constante que viene dada por la velocidad del rotor y que se define como:

$$k = \frac{3}{2\pi n_s} \quad (18)$$

Dada esta relación, se comprueba que al ser  $E_r$  constante y fijando el torque se tiene que al disminuir la velocidad el término  $k$  crece, disminuyendo la corriente, ahorrando energía, y también evitando los peaks, esto se puede usar para partir el motor de manera suave si es que se aplica un controlador al motor.

El motor (trifásico) tiene una corriente dada por[8]:

$$I = \frac{P_m}{\sqrt{3} V \cos(\phi)} \quad [A] \quad (19)$$

Donde

$P_m$ : potencia del motor [W].

$V$ : voltaje [V].

$\cos(\phi)$ : factor de potencia.

### **Operación de una bomba:**

El punto de operación en general para cualquier sistema de bombeo está dado por dos curvas, la del sistema y la de la bomba, esta última está dada por el fabricante, debido a que depende de las características constructivas de la bomba. La curva del sistema es el punto de presión al cual se quiere llegar, tomando en cuenta, además, que existe una pérdida relacionada al caudal utilizado. Haciendo una intersección entre estas dos curvas se puede determinar cuál es el punto de operación para el caso a estudiar [17], tal como se muestra en la Figura 4.

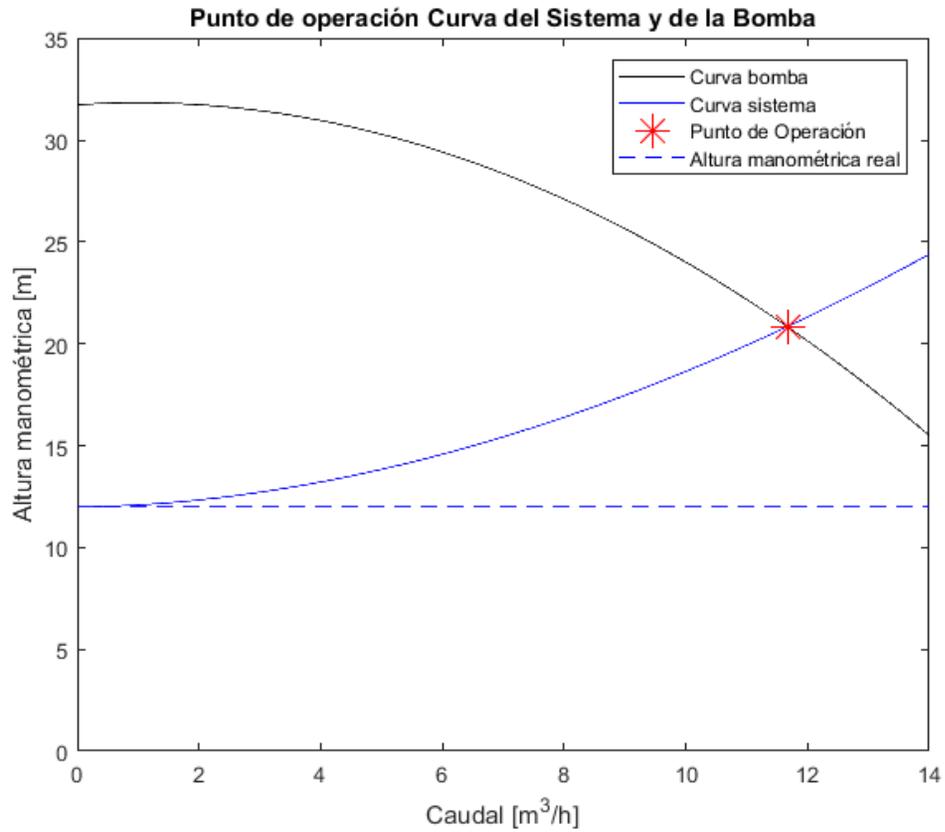


Figura 4. Punto de operación para bomba centrífuga. Fuente: Elaboración propia.

### Conservación de masa y sistema en general:

Luego en términos generales, el modelo de agua almacenada está regido por conservación de masa la cual está dada por la ecuación [9]:

$$\frac{\Delta V}{\Delta t} = \frac{V_{ent}}{\Delta t} - \frac{V_{sal}}{\Delta t} \quad (20)$$

Cuando el  $\Delta t \rightarrow 0$  entonces queda:

$$\frac{dV}{dt} = F_{ent} - F_{sal} \quad (21)$$

Entonces dependiendo del volumen del objeto, se puede apreciar la variación del nivel de agua en el estanque. En el caso del estanque usado en (1) se tiene su volumen y luego despejando la altura, nos queda una constante:

$$K = \pi r^2 \quad (22)$$

y finalmente la variación del nivel al dividir (21) en (22)

$$\frac{dh}{dt} = \frac{1}{K} (F_{ent} - F_{sal}) \quad (23)$$

Para dos estanques interconectados, se debe hacer un sistema el cual consiste en dos ecuaciones:

$$\frac{dh_1}{dt} = \frac{1}{K_1} (F_{ent1} - F_{sal1}) \quad (24)$$

$$\frac{dh_2}{dt} = \frac{1}{K_2} (F_{ent2} - F_{sal2}) \quad (25)$$

donde

$h_1$ : altura estanque 1 [m].

$h_2$ : altura estanque 2 [m].

$K_1$ : constante K (del área) para 1 [ $m^2$ ].

$K_2$ : constante K (del área) para 2 [ $m^2$ ].

$F_{ent1}$ : flujo de entrada en 1 [ $\frac{m^3}{s}$ ].

$F_{ent2}$ : flujo de entrada en 2 [ $\frac{m^3}{s}$ ].

$F_{sal1}$ : flujo de salida en 1 [ $\frac{m^3}{s}$ ].

$F_{sal2}$ : flujo de salida en 2 [ $\frac{m^3}{s}$ ].

$F_{sal1} = F_{ent2}$

La interacción de los estanques por estos flujos está dada por las diferencias de presión a través de la ecuación [3]:

$$P_1 + \frac{1}{2} \rho v_1^2 + mgh_1 = P_2 + \frac{1}{2} \rho v_2^2 + mgh_2 \quad (26)$$

A partir de (26) se genera la ecuación [5]:

$$C_v \sqrt{P_1 - P_2} = C_v \sqrt{g\rho} \sqrt{h_1 - h_2} \quad (27)$$

Quedando la velocidad en la salida entre dos estanques (o de un estanque con el ambiente) como:

$$v_s = \sqrt{2g} \sqrt{h_1 - h_2} \quad (28)$$

Y, por lo tanto:

$$Q = a_s \cdot v_s \quad (29)$$

Donde

$C_v$ : coeficiente de pérdida.

$P_1$ : presión en 1 [Pa].

$P_2$ : presión en 2 [Pa].

$\rho$ : densidad  $\left[\frac{k}{m^3}\right]$ .

$g$ : aceleración de gravedad  $\left[\frac{m}{s^2}\right]$ .

$a_s$ : área de orificio de salida  $[m^2]$ .

Que para 2 sistemas de 3 estanques en serie (napa compartida, pozo y estanque), uno con entrada constante y el otro con salida a consumo (presión atmosférica) y asumiendo que están conectados con cañerías con válvulas de retención, usando (24), (25) y (27) tomando en cuenta que son dos estanques, dos pozos y la napa, las ecuaciones quedarían:

*Napa:*

$$\frac{dh_n}{dt} = \frac{1}{K_n} \left( F_{ent1} - a_{sn} C_v \sqrt{2g(h_n - h_{p1})} - a_{sn} C_v \sqrt{2g(h_n - h_{p2})} \right) \quad (30)$$

*Pozo 1:*

$$\frac{dh_{p1}}{dt} = \frac{1}{K_{p1}} \left( a_{sp1} C_v \sqrt{2g(h_n - h_{p1})} - F_{b1} \right) \quad (31)$$

*Pozo 2:*

$$\frac{dh_{p2}}{dt} = \frac{1}{K_{p2}} \left( a_{sp2} C_v \sqrt{2g(h_n - h_{p2})} - F_{b2} \right) \quad (32)$$

*Estanque 1:*

$$\frac{dh_{re1}}{dt} = \frac{1}{K_{e1}} (F_{b1} - a_{se1} C_v \sqrt{2gh_{re1}}) \quad (33)$$

*Estanque 2:*

$$\frac{dh_{re2}}{dt} = \frac{1}{K_{e2}} (F_{b2} - a_{se2} C_v \sqrt{2gh_{re2}}) \quad (34)$$

Donde:

$F_{ent}$ : Flujo de entrada napa  $\left[\frac{m^3}{s}\right]$ .

$h_{rn}$ : Altura real de napa  $[m]$ .

$h_{pi}$ : Altura pozo i  $[m]$ .

$h_{rei}$ : Altura real estanque i  $[m]$ .

$K_n$ : Constante de área napa.

$K_{pi}$ : Constante de área pozo i.

$K_{ei}$ : Constante de área estanque i.

Con:

$$F_{ent} = F_{ver} + F_{lluvia} \quad (35)$$

Donde

$F_{ver}$ : Flujo de entrada de la napa por vertientes  $\left[\frac{m^3}{s}\right]$ .

$F_{lluvia}$ : Flujo de entrada de la napa por lluvias  $\left[\frac{m^3}{s}\right]$ .

Las restricciones para estos flujos están dadas por las capacidades de los estanques ( $h_{1max}, h_{2max}$ ), también por la cantidad de agua que esté disponible en los pozos en cada momento, y por la energía disponible que está dada por el excedente de generada desde la micro-red, dado el consumo de la comunidad. Por lo tanto, serían:

$$P_{ex} \geq P_{m1} + P_{m2} \quad (36)$$

Donde:

$P_{ex}$ : exceso de potencia  $[W]$ .

$P_{m1}$ : potencia de motor 1  $[W]$ .

$P_{m2}$ : potencia de motor 2  $[W]$ .

Con

$$P_{ex} = P_g - P_c \quad (37)$$

Donde:

$P_g$ : potencia de la micro-red [W].

$P_c$ : demanda de energía por parte de la comunidad [W].

Para los dos estanques, que deben estar entre un mínimo (para asegurar el consumo) y un máximo para que no se desborde el agua:

$$h_{imin} \leq h_{ei} \leq h_{imax} \quad (38)$$

Donde:

$h_{ei}$ : altura del estanque [m].

$h_{imax}$ : altura máxima del estanque i [m].

$h_{imin}$ : altura mínima del estanque i [m].

Y para los pozos:

$$h_{pi} \geq h_{pmini} \quad (39)$$

Donde:

$h_{pmini}$ : Nivel de agua mínimo para cada pozo [m].

Se debe notar que, si existe una necesidad de agua y de no haber disponibilidad energética de la micro-red, se podría usar la red de distribución.

Finalmente, en la figura 5 se muestra un diagrama de bloques para este sistema de 2 entradas y 2 salidas, que funciona tomando en cuenta las ecuaciones desde la (30) a la (39) y considerando como perturbaciones el flujo de lluvia que entra en la napa y los consumos para cada estanque. En la figura 3 se puede ver el diagrama de bloques de forma más detallada.

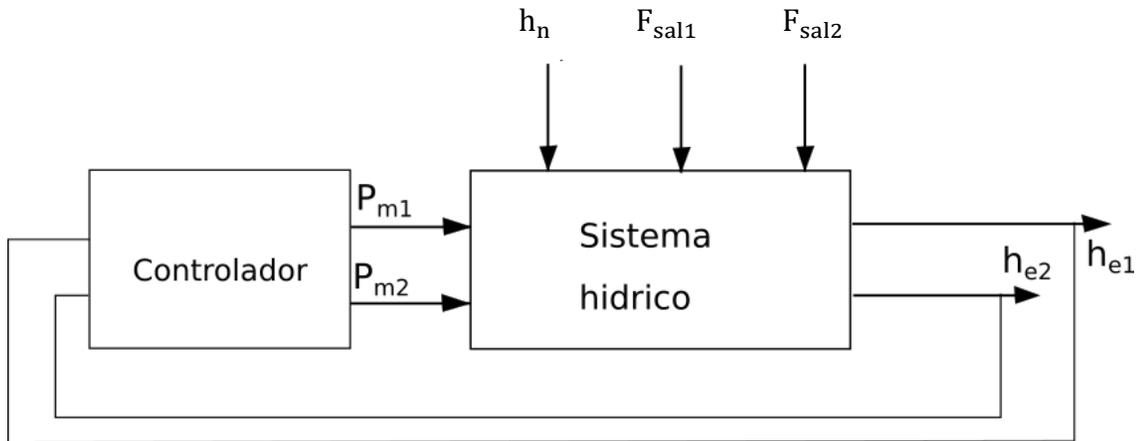


Figura 5. Diagrama general. Fuente: Elaboración propia.

### 2.3 Control Predictivo.

El sistema de gestión depende en su dinámica interna principalmente de las ecuaciones y variables relacionadas a los pozos y estanques (ver figura 5). Pero externamente depende de otros factores como el consumo de la energía en la comunidad, este consumo no es constante y por lo tanto depende de cómo se comporten los usuarios en función de posibles visitas, la presencia de lluvia o la época del año en que se encuentra, por ejemplo. También de las condiciones climáticas como la radiación solar o el viento. En síntesis, se busca la coordinación de llenado de estanques tomando en cuenta las predicciones de todas estas variaciones y la predicción de la energía en exceso para la activación de las bombas. Por esta razón se considera el diseño de un control predictivo basado en modelos (MPC, por sus siglas en inglés, Model Based Predictive Control) como solución a este problema.

Este controlador calcula N salidas futuras de un modelo a partir de los valores anteriores conocidos de salida y entrada. Se calculan para cada instante y además también se estiman señales de control futuras para aportar a la predicción actual, en las figuras 6 y 7 se muestra un ejemplo de este tipo de control y el diagrama de bloques respectivamente. En términos prácticos se requieren tres elementos: Modelos de predicción, Función Objetivo y la Obtención de la ley de control. Como modelo de predicción se usará una linealización de la planta modelada del sistema hídrico [19].

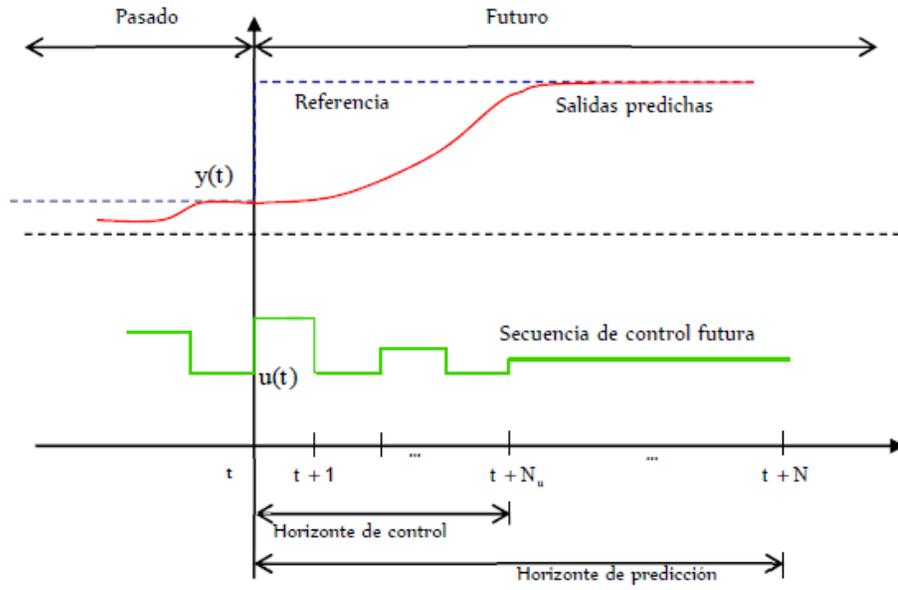


Figura 6. Ejemplo de control predictivo. Obtenido de [10].

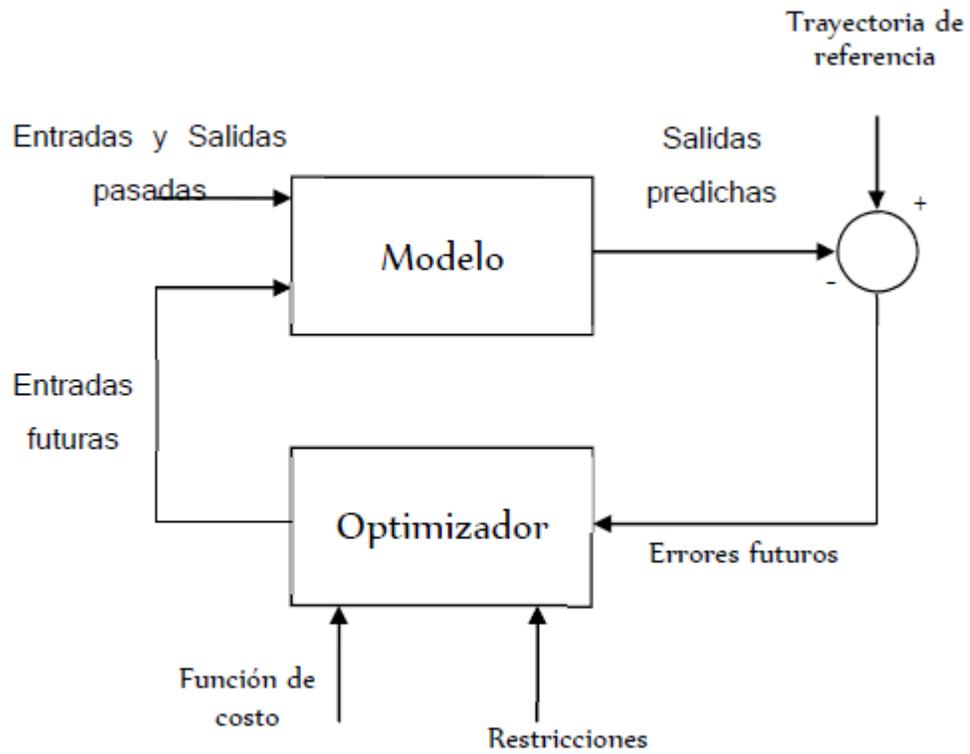


Figura 7. Diagrama de Bloques de un control predictivo basado en modelo. Obtenido de [10].

Se considera un modelo de predicción estocástico, el cual para el caso general es de la forma:

$$A(z^{-1})y(t) = \frac{B(z^{-1})}{F(z^{-1})}u(t) + \frac{C(z^{-1})}{D(z^{-1})}e(t) \quad (40)$$

Donde:

$y(t)$  es la salida del sistema (variable de control).

$u(t)$  es la entrada (variable manipulada)

$e(t)$  es el error.

$A(z^{-1}), B(z^{-1}), C(z^{-1}), D(z^{-1})$  y  $F(z^{-1})$  son polinomios en  $z^{-1}$ , ( $z^{-1}x(t) = x(t - 1)$ ).

La función objetivo contiene un término asociado a la minimización del error y el siguiente el esfuerzo de control:

$$J = \sum_{t+1}^N [r(t+j) - \hat{y}(t+j|t)]^2 + \lambda[\Delta u(t)]^2 \quad (41)$$

La cual considera  $r(t+j)$  como la referencia a seguir por el sistema en el instante  $t+j$  y  $\hat{y}(t+j|t)$  como la predicción de la salida en  $t+j$  dado los instantes anteriores requeridos por el modelo. Se puede agregar el segundo término, que indica el esfuerzo de control.

La resolución del problema de optimización tiene como resultado una secuencia óptima de control, pero solo se aplica la del instante  $t+1$  debido a que las siguientes se actualizan con los nuevos datos, resolviendo la minimización nuevamente para cada iteración. Se pueden definir además restricciones para el problema de optimización, que en este caso tienen que ver con capacidades de los distintos contenedores de agua, energía de la micro-red y consumos de agua.

## 2.4 Algoritmos genéticos.

El algoritmo genético forma parte de la llamada computación evolutiva [24], la cual se inspira en la evolución para la resolución de problemas. Estos usan genes y poblaciones de individuos para poder evaluar una función de fitness la cual depende del problema. Esta función de fitness define cuales individuos son los más aptos para reproducirse y por lo tanto serán la base de la siguiente generación, llamada descendencia. Esto puede considerar mutaciones de los genes para intentar evitar que la solución tienda a un mínimo local. Es importante aclarar que no se puede asegurar que se alcance el óptimo global del problema a solucionar. Pero se suele utilizar debido a su rapidez

para alcanzar una solución que se considera aceptable [23]. En la figura 8 se observa el esquema clásico de un algoritmo genético .

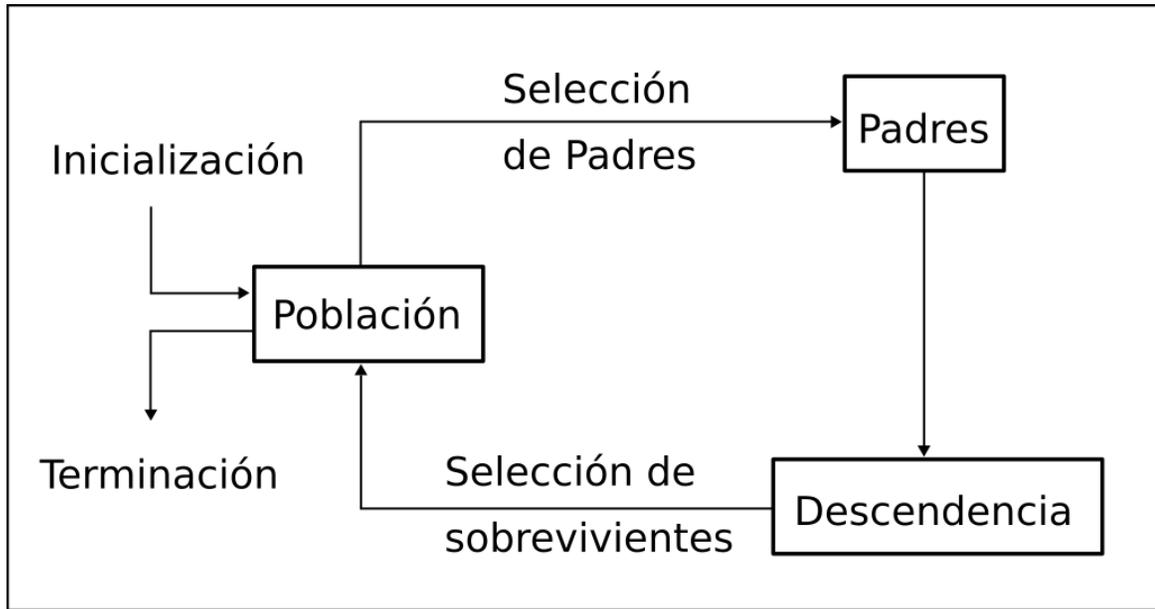


Figura 8. Esquema de algoritmo genético. Fuente: Elaboración propia, basado en [23].

## 2.5 Discusión.

Uno de los cambios que se podrían hacer en el modelo está referido a las ecuaciones de la napa, en la cual se podrían usar las expresiones propias de la hidrogeología para la modelación más precisa. Esto se deja como trabajo futuro, porque para el alcance de este trabajo se decide usar como si fuera un estanque con una capacidad grande comparada con los pozos. Esta decisión se tomó principalmente por simplicidad y, además, porque los procesos son lentos desde el punto de vista del pozo.

Otro aspecto para discutir es el transiente en la bomba con respecto las cañerías. Estas se suelen simular como por el método de las características [13], que tiene una resolución numérica, pero para efectos de simulación toma mucho tiempo porque se requiere una gran cantidad de iteraciones para que el método sea preciso, haciendo que se haga de forma lenta. Por esto se toma la idea de usar las leyes de afinidad y asumir estados cuasi estacionarios con el fin de que a partir de la rapidez de salida del motor se asocian valores para potencia, torque, presión y caudal. Para esto se debe fijar un punto de operación dado por el cruce entre la curva de sistema y la curva de la bomba [18]. Esto se justifica porque las transiciones entre los estados serían lentas tomando en cuenta que se busca aplicar un controlador de velocidad para que la partida de la bomba sea suave evitando así picos de corriente demasiado altos.

El dato de eficiencia en una bomba generalmente no tiene una expresión matemática desde el fabricante, por lo que se hace necesario generarla a partir de mediciones que se entregan en

datasheet. Una forma posible de hacerlo es hacer un ajuste a una función cuadrática, de modo de tenerlo para cada valor de caudal en el que pueda ser utilizada la bomba y no solo en los puntos que se muestran en los datasheet.

Se toma como modelo de predicción ARX (Auto Regressive with eXogenous input), debido a su simpleza, comparado con el caso general, teniendo en cuenta que la planta si bien es no lineal, podría ser aproximada sin problemas el modelo mencionado de ecuación:

$$A(z^{-1})y(t) = B(z^{-1})u(t) + e(t) \quad (42)$$

La composición función objetivo de la ecuación (41) se justifica porque una de las características críticas de este problema tiene que ver con la acción de control y su efecto en la micro-red, además de que el objetivo de este sistema es controlar los niveles y coordinar el llenado de los estanques.

Debido a que el problema de optimización, a resolver por el controlador predictivo, crece en función del horizonte de predicción, se decide resolver con algoritmo genético. Para esto se debe incluir la función objetivo como la función de fitness a utilizar. Una traba podría ser que no se contemplan restricciones, pero pueden agregarse a la función de fitness, penalizando su incumplimiento.

### 3. Diseño de un sistema de gestión de agua acoplado a una micro-red.

En esta sección se muestra el problema y la estrategia de control predictivo que usará para resolverlo. Esto se concreta en la definición de los parámetros de todos los elementos del sistema hídrico, como bombas, estanques y pozos, junto con la definición completa del problema de optimización que se aplicará en el controlador.

#### 3.1 Planteamiento del problema

La coordinación del llenado de estanques para dos familias mapuche las cuales comparten el agua de sus pozos a través de la napa necesita ciertos parámetros del sistema hídrico que fueron recopilados en la comunidad, en la visita mencionada en la introducción. El problema puede formularse, por lo tanto, con valores reales quedando de la siguiente forma: los estanques, serán de una capacidad de  $1[m^3]$ , los cuales se asumirán de un radio de  $0.5[m]$  con una altura aproximada de  $1.3[m]$ , su fuente de agua son los pozos, los cuales según los datos recogidos en la comunidad serían de  $1.5[m]$  de profundidad y de un radio de  $0.5[m]$ . La napa también se asume como un pozo de  $2[m]$  de profundidad y un radio de  $3$  metros. En el caso de las distancias pozo estanque y las diferencias de altura del estanque y la bomba, serían en el primer caso una distancia de  $180[m]$  con una diferencia de altura de  $12[m]$ , mientras que en el segundo es una distancia de  $175[m]$  y altura de  $14[m]$ .

Los datos anteriores permiten calcular los puntos de operación en estado estacionario para cada bomba como se muestra en las figuras 9 y 10, teniendo como resultado  $1.896 \left[ \frac{m^3}{h} \right]$  y  $1.112 \left[ \frac{m^3}{h} \right]$  para las bombas 1 y 2 respectivamente, dado el nivel desde el cual cada bomba debe subir el agua.

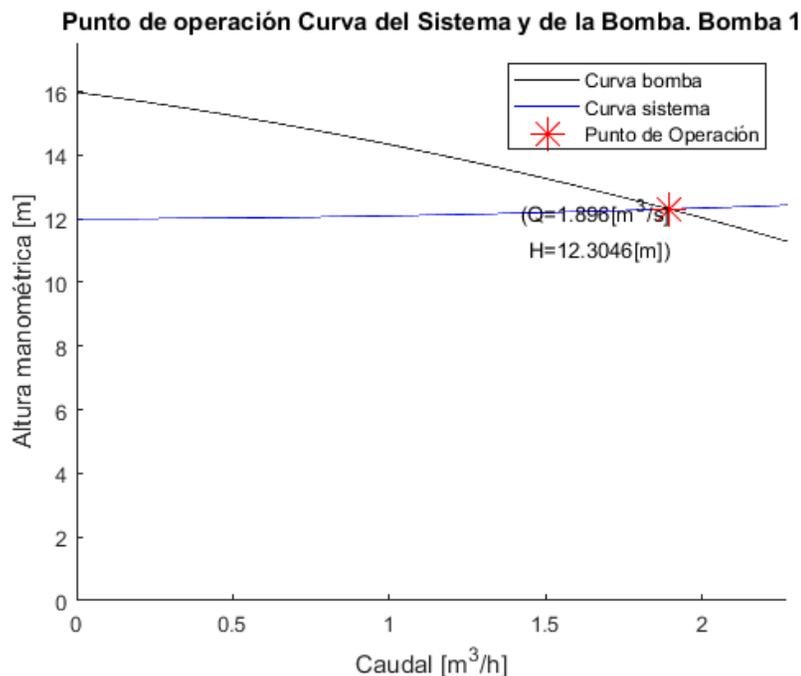


Figura 9. Cálculo de punto de operación para primera bomba. Fuente: Elaboración propia.

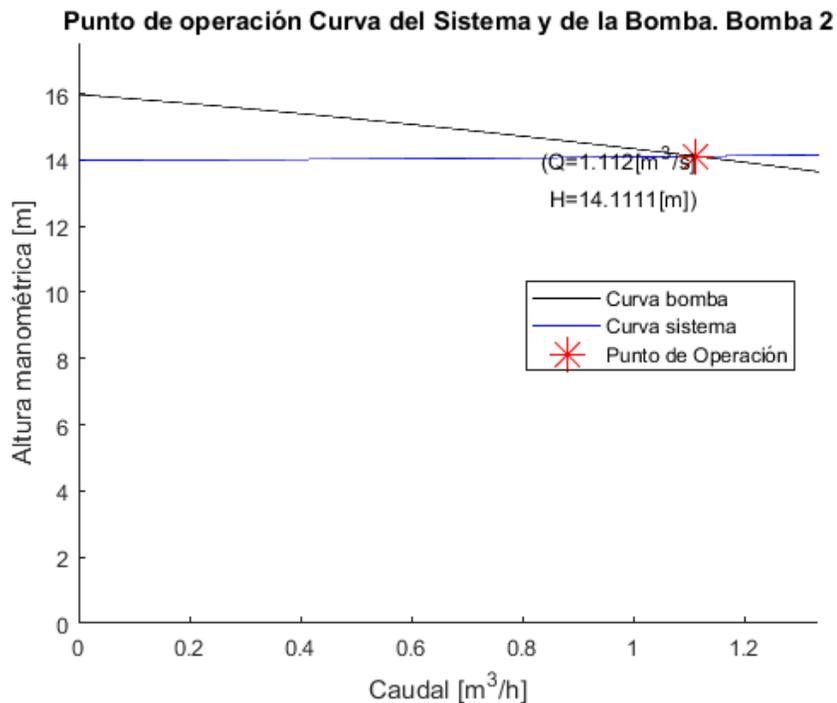


Figura 10. Cálculo de punto de operación para segunda bomba. Fuente: Elaboración propia.

La curva del sistema se obtiene a través de las pérdidas sumada a la altura requerida, también dependientes del caudal según la ecuación (4), y la de bombeo haciendo un ajuste cuadrático a los puntos que están en la hoja de datos de las bombas.

Las dos bombas del sistema serán la bomba Pedrollo cp100 trifásica, de 0.25kW de potencia nominal y con un voltaje de 220. Una de las dificultades al usar el datasheet de esta máquina, fue que esta cuenta solo con un dato de eficiencia, a pesar de que es dependiente del caudal, como se ve en la figura 11, sacada del datasheet de la bomba Pedrollo cp100. Se optó por buscar la documentación de una bomba del mismo fabricante que sí contara con estos datos. Se ajustaron los datos de caudal de la bomba cp160 en figura 12 a una función cuadrática, y se asumió que se comporta de la misma forma que la bomba cp100, por lo tanto se trasladó el valor máximo nivel de eficiencia y su caudal asociado a los datos que se tienen de la primera bomba.

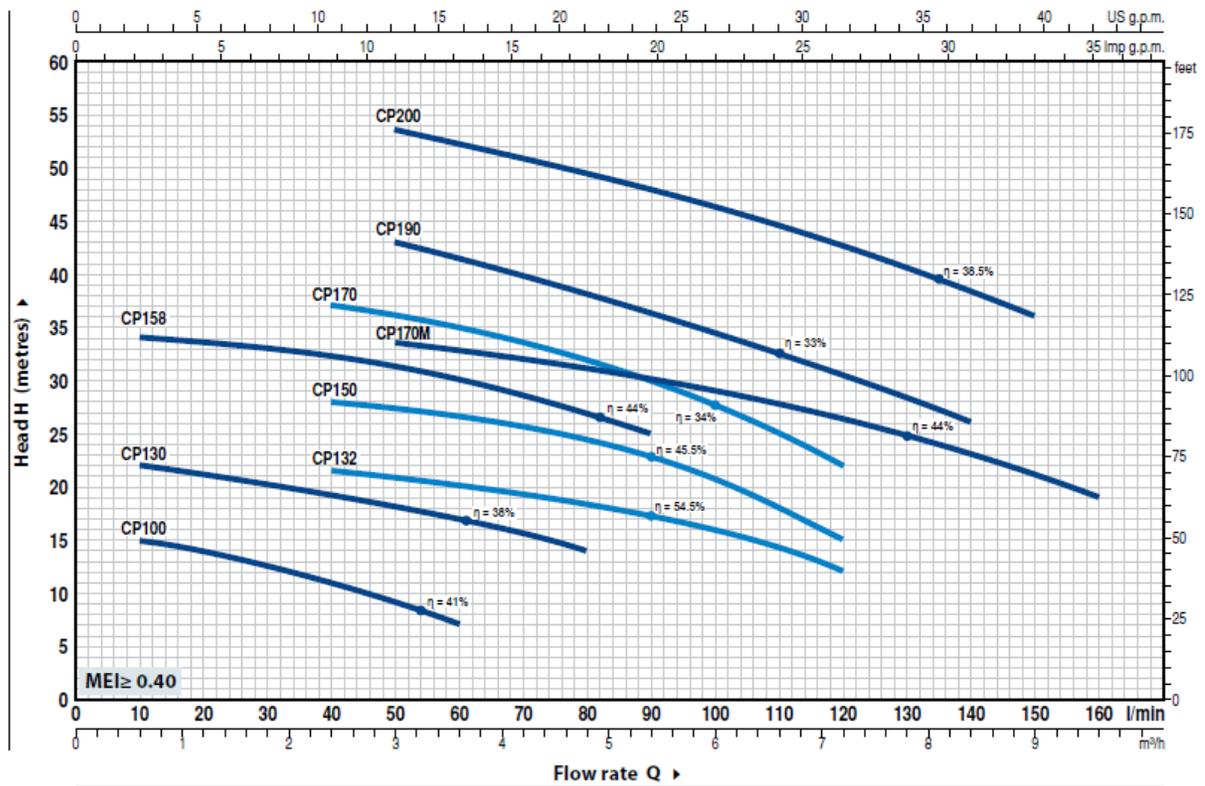


Figura 11. Datasheet bomba Pedrollo cp100.

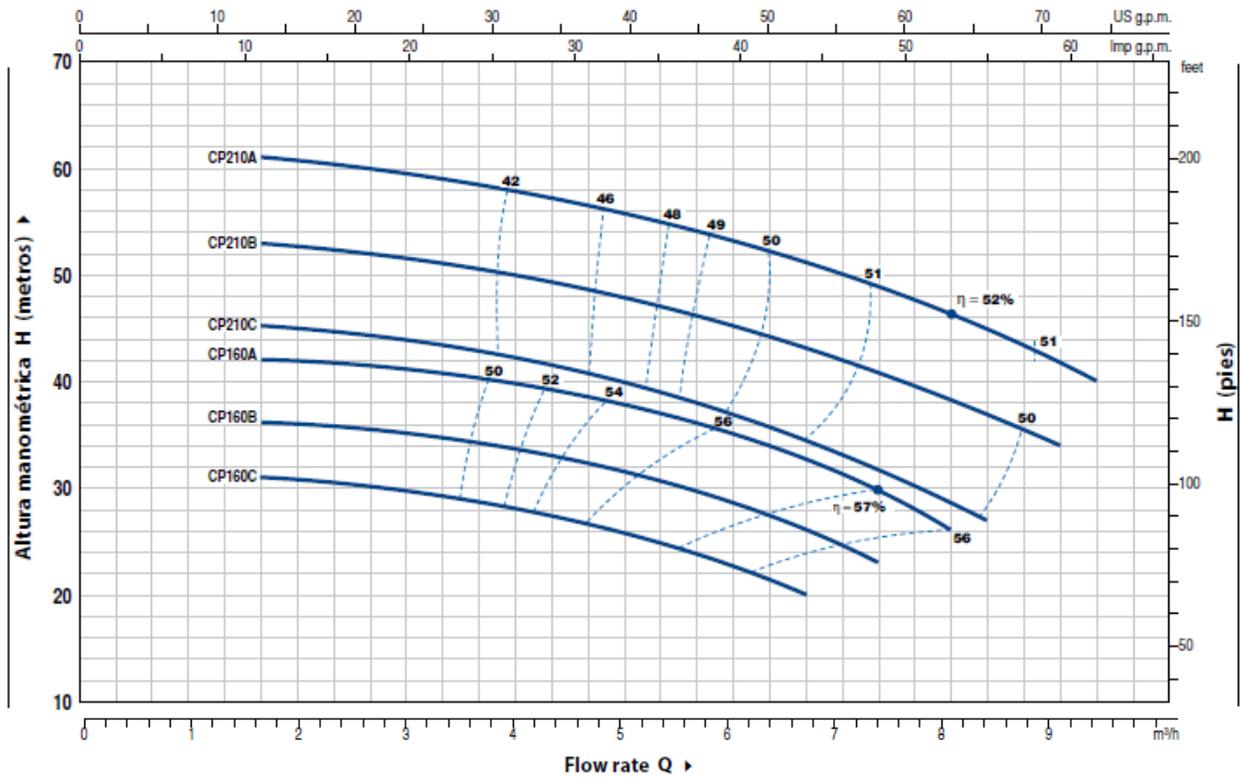


Figura 12. Datasheet bomba Pedrollo cp160.

Se sabe que para trasladar una función en el eje horizontal, se tiene que restar el valor deseado a la variable, y en el caso del eje vertical se debe hacer sumando a la función completa el valor de traslación.

Si se tiene una función y se busca desplazarla en  $x_0$  a la derecha y en  $y$  hacia arriba, entonces pasamos de:

$$f(x) = ax^2 + bx + c \quad (43)$$

A tener una del tipo:

$$F(x) = f(x - x_0) + C \quad (44)$$

O de forma expandida:

$$F(x) = a(x - x_0)^2 + b(x - x_0) + c + C \quad (45)$$

$$F(x) = ax^2 + (b - 2ax_0)x + (C + c - ax_0^2 - bx_0) \quad (46)$$

Pasando de la función :

$$\eta_{160}(Q) = -79402Q^2 + 426.46Q + 1.6 \cdot 10^{-4} \quad (47)$$

A la función

$$\eta_{100}(Q) = -79402Q^2 + 135Q + 0.3551 \quad (48)$$

Donde

$\eta_{160}$ : eficiencia de la bomba cp160.

$\eta_{100}$ : eficiencia de la bomba cp100.

$Q$ : Caudal  $\left[\frac{m^3}{s}\right]$

A partir de esta expresión se puede calcular la potencia hidráulica y el torque que genera la parte hídrica al motor, valor necesario para calcular el gasto de energía y el comportamiento de la bomba.

### 3.2 Modelo propuesto

Tomando en cuenta los modelos y datos obtenidos de los fabricantes de las bombas, y considerando el uso de control predictivo lineal basado en modelos, se propone un modelo multivariable ARX para la planta a partir de identificación de sistemas, para esto se necesitan datos del comportamiento de la planta, en este caso del simulador, ante variaciones como ruidos o pulsos no regulares [20].

Para la identificación se utilizará el sistema en lazo cerrado, debido a que se quiere obtener un sistema estable, cosa que se asegura con la planta controlada. Además, este sistema controlado sirve como punto de referencia para comparar con el controlador predictivo que se diseñará.

Para obtener los datos se utiliza un controlador on/off, con histéresis y una banda de tolerancia en torno a la referencia deseada. Existe una relación entre el ancho de los pulsos de activación de la bomba y la banda de tolerancia definida, a menor error se producen pulsos más angostos de operación, pero estos periodos no pueden ser muy pequeños debido a que la bomba necesita tiempos mínimos para funcionar. Los tiempos se relacionan con el caudal del punto de operación escogido, por ejemplo, si para un caudal de  $1.89 \text{ m}^3/\text{h}$  se tiene para una banda de 5 cm de error, el pulso tiene una duración mínima de 180 segundos. Si se quiere operar en el mismo tiempo mínimo, pero con un caudal de  $1.12 \text{ m}^3/\text{s}$ , se debe usar una banda de 2.5 cm. Estos resultados nos indican que el error de un controlador on/off está directamente relacionado al caudal.

Se prueba la planta controlada ante referencias variables, con pulsos de amplitud variable. Se usan 6 horas por cada valor de la referencia para observar el comportamiento de las bombas. El resultado anterior se puede apreciar en las figuras 13 y 14, la primera se estabiliza de forma más rápida debido a que tiene mayor caudal y el tiempo de respuesta de las bombas depende de este. La segunda tiene un tiempo de establecimiento menor. Además, desde el punto de vista de la acción de control (encendido o apagado de las bombas), se puede apreciar que cuando se sigue una referencia menor que el estado actual, las bombas se apagan y cuando se sigue una mayor que el estado actual se activan. Esto genera un comportamiento periódico del nivel de los estanques cuando el sistema está sometido a un flujo constante de salida en los estanques. Para el caso de las pruebas mencionadas se fijó el caudal de salida en 45 litros por hora aproximadamente.

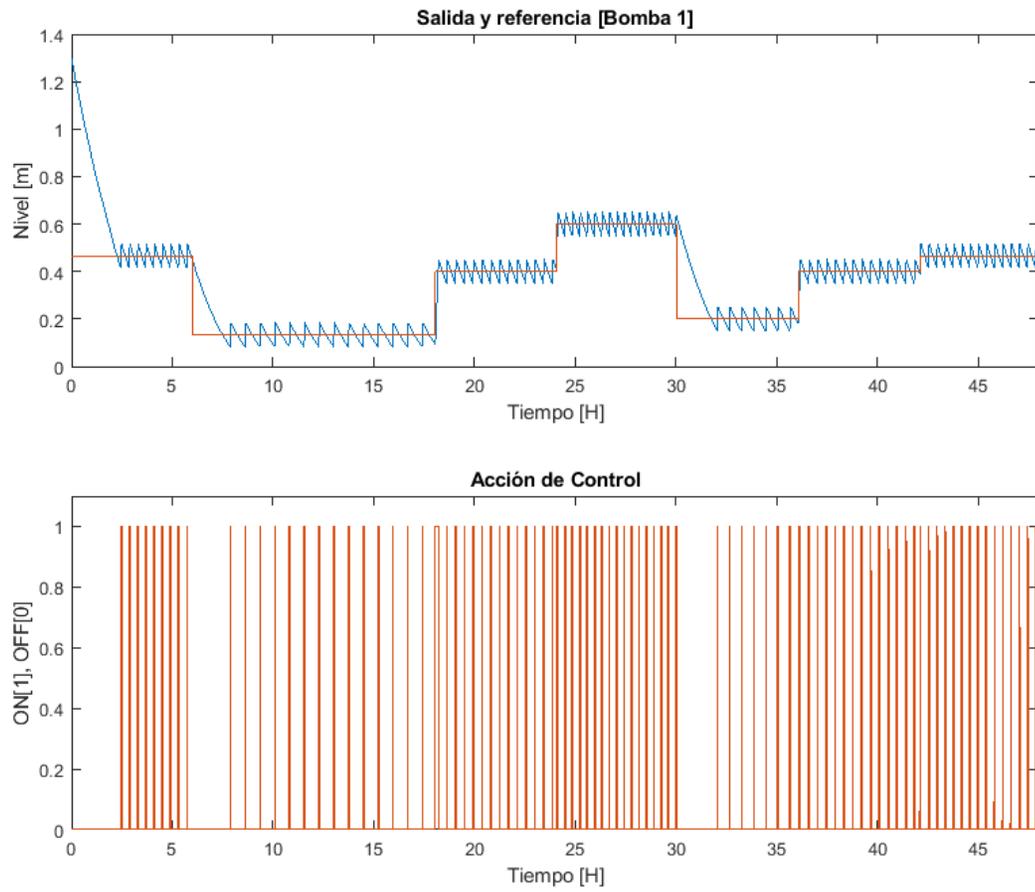


Figura 13. Bomba 1 comportamiento ante referencia variable. Fuente: Elaboración propia.

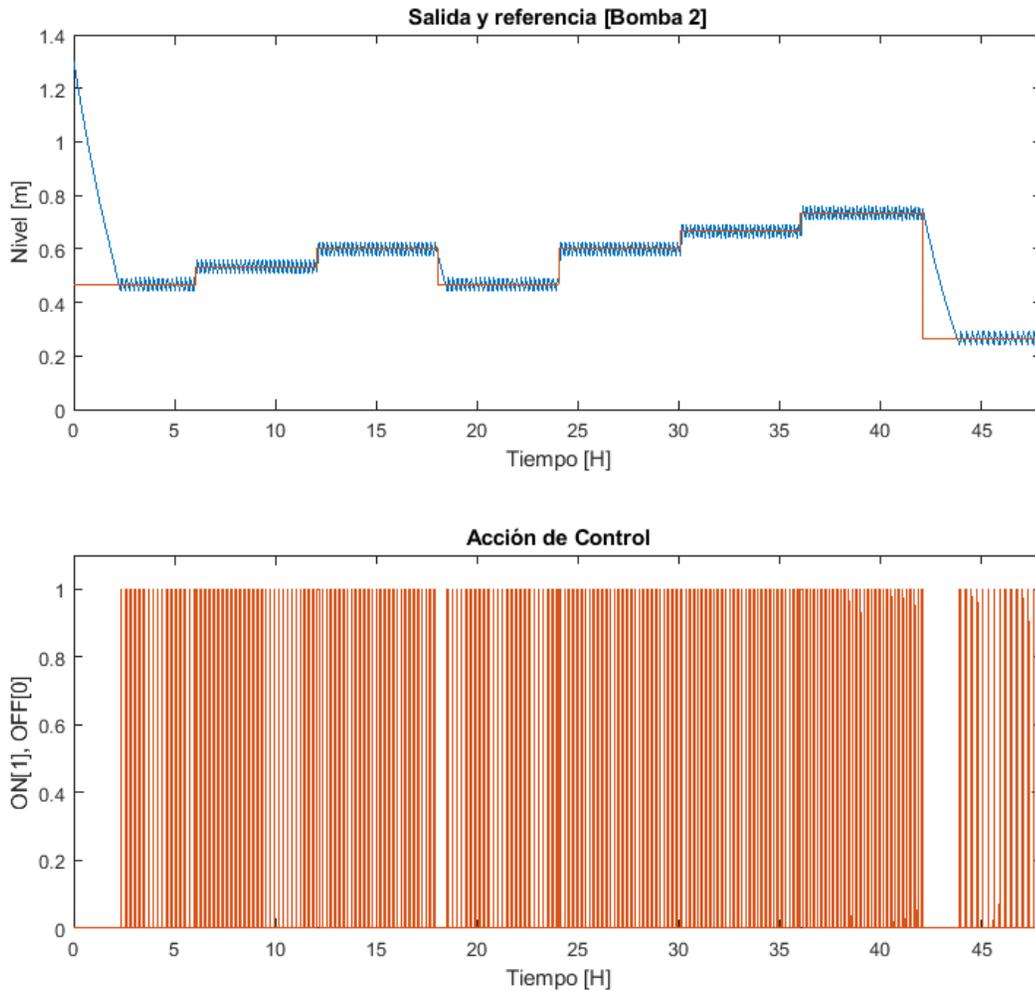


Figura 14. Bomba 2 comportamiento ante referencia variable. Fuente: Elaboración propia.

Otro punto que se nota es el hecho de que, como se dijo anteriormente, el error en la segunda bomba es menor debido a que al tener menor caudal se acerca más a la referencia tomando en cuenta tiempos iguales de operación.

Similares a las figuras 13 y 14 pero con 480 horas muestreadas a 3 minutos tomando en cuenta que el tiempo de llenado del estanque más rápido, desde 0 a 1  $m^3$  se hace en cerca de 30 minutos y por lo tanto a 10 pasos se podría predecir este proceso, se hace una identificación con el seguimiento de referencia, lo que se puede observar en la figura 15. Estos datos separados en 70% para entrenamiento y 30% para prueba son los que se ajustan a través de mínimos cuadrados a un polinomio de la forma del modelo ARX, que ajustará para cada salida correspondiente al nivel del estanque, modelos de la forma:

$$h_{e1} = f(u_1, u_2) [m] \tag{49}$$

$$h_{e2} = f(u_1, u_2) [m] \tag{50}$$

En donde cada nivel depende de las dos bombas, representadas por las variables binarias  $u_1$  y  $u_2$  que significan el encendido o apagado de la bomba, tomando en cuenta, además, como podrían afectarse los dos sistemas mutuamente debido a que comparten la napa que provee de agua a los pozos.

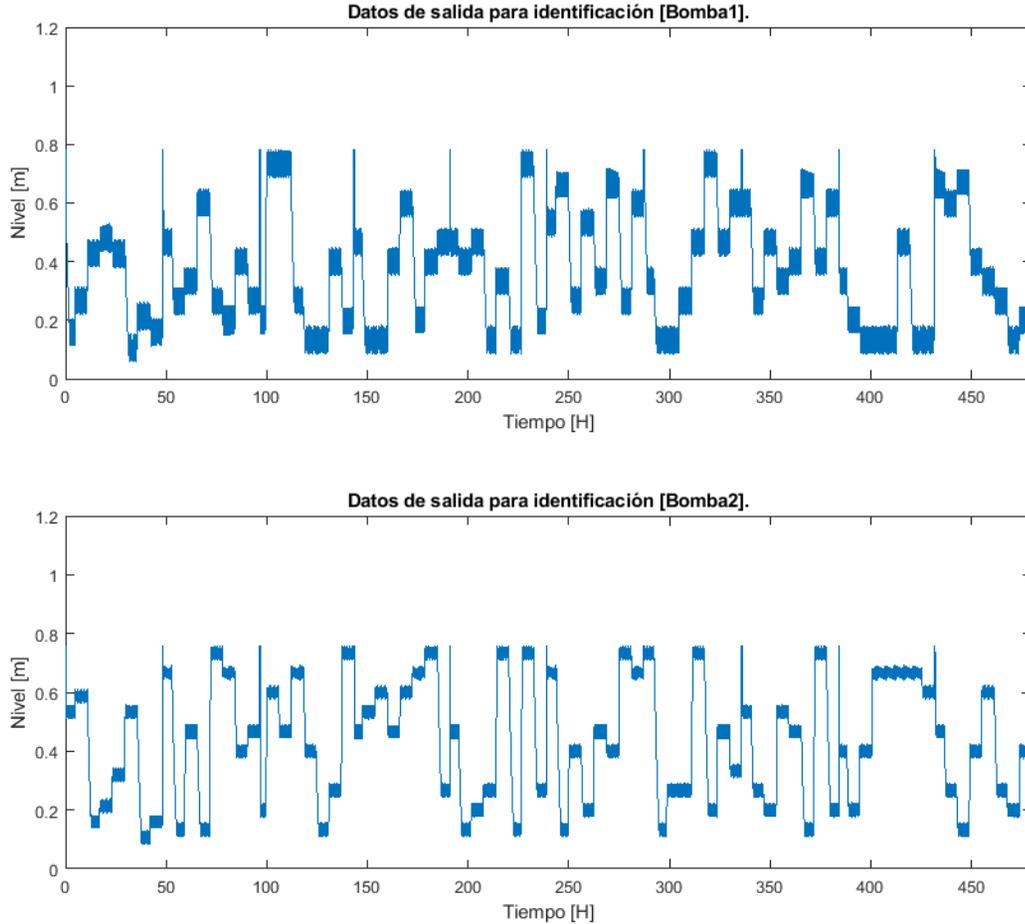


Figura 15. Datos para identificación de las bombas. Fuente: Elaboración propia.

Este procesamiento se hace en el software MATLAB que tiene esta función incorporada, a la cual se le ingresan como parámetros los datos y los coeficientes para las regresiones. Se calculan todas las combinaciones posibles con 5 coeficientes máximos como entrada a la función quedando un total de 3125 posibilidades que se prueban para cada bomba, generando los siguientes modelos para las bombas 1 y 2 respectivamente:

$$\begin{aligned}
 h_1(k) = & 0.8259 \cdot h_1(k - 1) + 0.1078 \cdot h_1(k - 2) + 0.04809 \cdot h_1(k - 3) \\
 & + 0.06011 \cdot u_1(k - 1) + 0.006095 \cdot u_1(k - 2) \\
 & - 0.0005629 \cdot u_2(k - 2)
 \end{aligned} \tag{51}$$

$$\begin{aligned}
h_2(k) = & 1.014 \cdot h_2(k - 1) - 0.03032 \cdot h_2(k - 2) \\
& + 2.704 \cdot 10^{-5} \cdot u_1(k - 5) \\
& + 0.007513 \cdot u_2(k - 4) + 0.02032 \cdot u_2(k - 5) + 0.002567 \cdot u_2(k - 6) \\
& - 0.001685 \cdot u_2(k - 7) \cdot 0.009841 u_2(k - 8)
\end{aligned} \tag{52}$$

Los errores cuadráticos medios se pueden apreciar en la tabla 2 y también la prueba para los modelos de  $h_1$  y  $h_2$  respectivamente junto con el porcentaje de ajuste que entrega la función ARX con la que fueron calculados los modelos. Además, se puede ver ejemplos de predicciones del conjunto de prueba como se puede observar en las figuras 16 y 17 para los sistemas asociados a las bombas 1 y 2 respectivamente, según esto podemos ver que para el primer paso tienen ambos sobre el 85% de precisión y para 10 pasos de un 70% aproximadamente. También se puede apreciar que el sistema dos en estos datos y para los pasos mostrados tiene un mejor rendimiento.

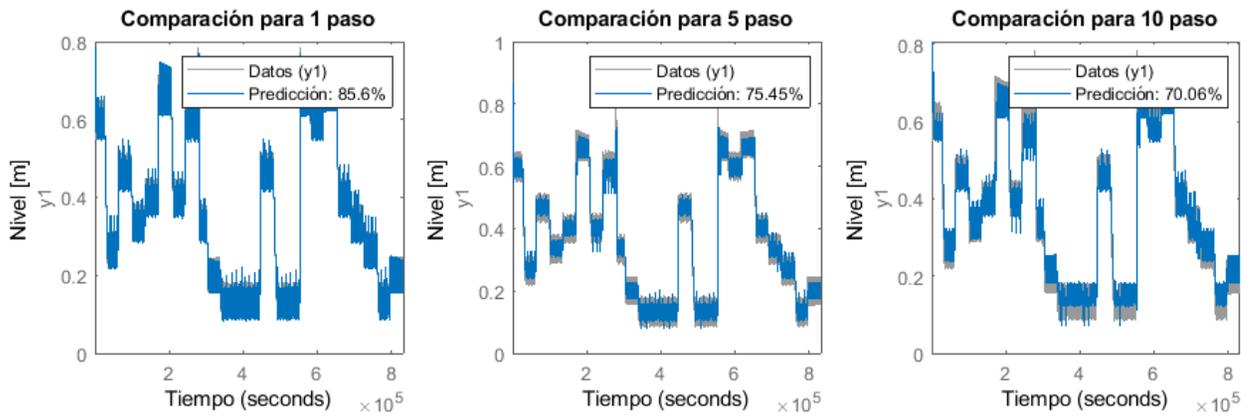


Figura 16. Muestra de predicción para modelo de nivel 1 (ecuación 46). Fuente: Elaboración propia.

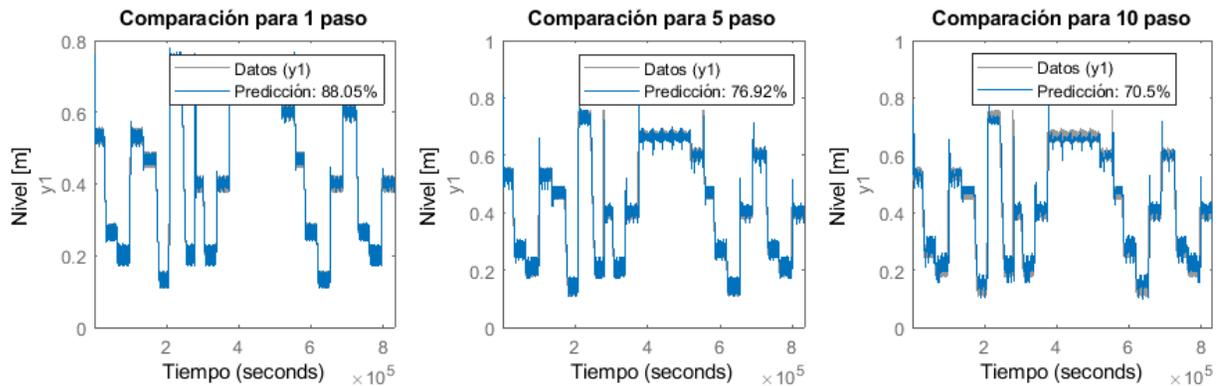


Figura 17. Muestra de predicción para modelo de nivel 1 (ecuación 47). Fuente: Elaboración propia.

Tabla 2. RMSE para distintos pasos de predicción.

Número de pasos	Precisión función ARX $h_1$	RMSE $h_1$	Predicción función ARX $h_2$	RMSE $h_2$
1	85.60%	0.0537	88.50%	0.0266
2	81.87%	0.0637	83.11%	0.0286
5	75.45%	0.1724	76.92%	0.1188
10	70.06%	0.206	70.50%	0.1788

### 3.3 Discusión

Como las variables manipuladas en este caso serán on/off, para resolver el problema de optimización que plantea la minimización de la función J de la ecuación (38), sujeta a restricciones se plantean dos posibilidades. La primera opción es probar numéricamente la solución para cada una de las entradas binarias posibles, que en este caso sería la combinación de unos y ceros de 2 vectores de n elementos, con n la cantidad de pasos a las que se quiere hacer la predicción, esto da un total de  $2^{2 \cdot n}$  posibles vectores. Para la decisión a una predicción de 10 pasos para cada bomba hace que eso sean  $2^{20}$  pruebas. La segunda opción es el algoritmo genético, que finalmente se usa, debido a que se demora más de 100 veces menos de lo que se demora probar todas las acciones posibles. Además, para tomar en cuenta las restricciones, para ambos métodos, se deben incluir en la misma función de fitness que se le entrega al algoritmo genético, multiplicadas por una función que se active en el cambio de signo. Se escogió la función sigmoide, quedando una restricción genérica:

$$y_{min} \leq y \leq y_{max} \quad (53)$$

De la forma:

$$c_1 \cdot \text{sigm}(c_2 \cdot (y - y_{max})) + c_3 \cdot \text{sigm}(c_4(y_{min} - y)) \quad (54)$$

La función sigmoide ( $\text{sigm}()$ ) en la ecuación 49) en este caso es:

$$\frac{1}{1 + e^{-x}} \quad (55)$$

Generando que, en el caso de que la diferencia sea positiva, la sigmoide actúe de forma similar a un escalón, provocando que el fitness empeore, mientras más altas las constantes  $c_1$  y  $c_3$ , mas penaliza el hecho de no cumplir las restricciones y mientras más grande las constantes  $c_2$  y  $c_4$  la función tiende a un escalón ideal.

Por lo tanto, según lo anterior y las restricciones en términos del estanque y las bombas la función objetivo para el algoritmo genético quedaría:

$$\sum_{j=1}^n (h_1(k+j)-r_1)^2 + \sum_{j=1}^n (h_2(k+j)-r_2)^2 + \lambda \sum_{i=1}^n (\Delta u(k+i-1))^2 + R \quad (56)$$

En donde el último término corresponde a las restricciones, que sería el siguiente escrito de forma expandida:

$$\begin{aligned} R = & \sum_{j=1}^n c_1 \cdot \text{sigm}(c_2 \cdot (h_1(k+j) - h_{1max})) + \sum_{j=1}^n c_1 \cdot \text{sigm}(c_2 \cdot (h_2(k+j) - h_{2max})) \\ & + \sum_{j=1}^n c_1 \cdot \text{sigm}(c_2 \cdot (h_{1min} - h_1(k+j))) + \sum_{j=1}^n c_1 \cdot \text{sigm}(c_2 \cdot (h_{2min} - h_2(k+j))) \\ & + \sum_{i=1}^n c_1 \cdot f_{ep}(P_{ex}, u(k+i-1)) \end{aligned} \quad (57)$$

En donde las constantes  $c_1$  y  $c_2$  son 100 y 1000 respectivamente como forma de asegurar de que cada restricción se cumpla y  $f_{ep}(P_{ex}, u(k+j))$  es una función que compara la potencia disponible con la potencia usada por las bombas, penalizando el uso de estas cuando no hay energía suficiente y en el caso de que haya suficiente para el funcionamiento de una sola bomba, prioriza la que esté más lejos de la referencia, penalizando el uso de la otra la otra.

#### 4. Simulador del sistema de gestión de agua acoplado a una micro-red

Se pueden identificar 2 grandes bloques en la simulación, estos son la parte eléctrica y la parte hidráulica, las cuales están vinculadas a través de la bomba, como se observa en la parte de los antecedentes, se cuenta con las ecuaciones de cada uno de estos componentes, pero para realizar la simulación, se debe tomar en cuenta, además de la precisión de los modelos, el esfuerzo computacional. Es por esto, que se toma la decisión de tomar algunos supuestos que se explicarán a continuación, para que no haya un gasto de tiempo excesivo. Y además se definen criterios mínimos de acuerdo con los cuales estas simplificaciones son válidas a partir de un análisis cualitativo de sus resultados.

Además, no se simulará una micro-red completa, si no solo su perfil de energía porque dependiendo de la generación de las unidades y el consumo de la comunidad, se busca optimizar la energía del sistema, se tomará como dato el tiempo, debido a que se asume que existe la posibilidad de acceder a algún registro o predicción externa.

##### **Supuestos.**

Las variables que se encuentran en el sistema se pueden separar en dos grupos; Variables de comportamiento rápido y lento. En este caso se puede hablar de variables que se estabilizan en tiempos del orden segundos o menores (comportamiento rápido), en contraste con las que toman minutos e incluso horas para hacerlo (comportamiento lento).

A partir de cierto instante desde que se enciende la bomba, se observa un comportamiento estacionario. Pero durante la partida existen variables que tienen cambios significativos, éstas corresponden a las variables rápidas y son: Potencia [ $W$ ], Par [ $N \cdot m$ ], Velocidad angular [ $RPM$ ], corriente [ $A$ ], caudal [ $\frac{m^3}{s}$ ] y presión [ $m$ ] de altura manométrica.

Por otro lado, las variables hídricas de nivel de napas, pozos y estanques son las consideradas lentas y, por lo tanto, el transiente de las demás variables (las rápidas), no afecta de forma significativa en su dinámica. El efecto de las variables rápidas sobre las lentas está dado principalmente en el estado estacionario, que corresponde al punto de operación calculado para las bombas.

Independiente del instante de operación de la bomba, las variables rápidas siempre tienen el mismo comportamiento, por lo que se puede decir que son invariantes temporalmente.

Donde hay un mayor esfuerzo computacional es en las variables rápidas (Potencia  $[W]$ , Par  $[N \cdot m]$ , Velocidad angular  $[RPM]$ , corriente  $[A]$ , caudal  $\left[\frac{m^3}{s}\right]$  y presión), debido a que su dinámica varía mucho en poco tiempo, por lo que el tiempo de simulación supera al tiempo real. Una de las formas en las que se puede hacer un ahorro, es conociendo cómo se comporta la planta en esas variables y generar un modelo tipo función de transferencia con una entrada escalón equivalente a la del modelo que se quiere simplificar. Esto se hace mucho más implementable partiendo del hecho de que cada vez de que se enciende una bomba, existe un comportamiento invariante en el tiempo.

En el caso de las variables lentas, se puede implementar sin mayores problemas directamente como ecuaciones diferenciales, debido a que toma mucho menos tiempo en simular en comparación con su comportamiento en tiempo real.

Para generar el modelo simplificado de la bomba, se toma como base un modelo no lineal que está incluido en un bloque de Simulink en el programa MATLAB. Este modelo corresponde al “Space Vector PWM VSI Inductor Motor Drive”. De este modelo no lineal, se observa el comportamiento transiente que se usará para verificar el modelo generado.

Se define como criterio de selección del modelo, el error cuadrático medio entre lo que arroja la simulación y el modelo propuesto.

Las variables de interés para esta simplificación de los motores son la potencia y la velocidad angular para los puntos de operación de cada bomba. Estos se eligen debido a que la potencia se necesita para el gasto de energía y la velocidad de angular, que es lo que define el caudal y la presión como vínculo con las variables lentas (niveles de napa, pozos y estanques).

### **Obtención de modelos simplificados de potencia y velocidad angular de las bombas.**

Los modelos que se buscan son las de potencia y velocidad angular, porque son las variables que importan al momento de utilizar el sistema por el controlador. La potencia como variable de interés al ser uno de los criterios de decisión del sistema, y la velocidad angular porque tiene una influencia directa sobre las variables Caudal y Presión.

Para construir las se debe simular el escenario del motor con la carga a usar, que para el caso del problema está asociado a la potencia mecánica y por lo tanto el torque de levantar la columna de agua. Luego de que se tienen estas condiciones de operación, se procede a construir la función a partir de un modelo de segundo orden, que al aplicar un escalón se comporte imitando la magnitud

original [25]. De forma gráfica, viendo el comportamiento de la función con respecto a la curva deseada, se van ajustando los parámetros variando amortiguamiento y velocidad según corresponda. Quedando la siguiente expresión:

$$G(s) = K \cdot \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2 \cdot \xi \cdot \omega_n s + \omega_n^2} \quad (58)$$

Donde

$\omega_n$ : Frecuencia natural  $\left[\frac{rad}{s}\right]$ .

$K$ : ganancia.

$\xi$ : Coeficiente de amortiguamiento.

Para el caso de un caudal de  $1.89\left[\frac{m^3}{h}\right]$  y una altura de  $12 [m]$  según el modelo no lineal de la bomba, del cual se dispone en MATLAB, se genera realimentando el torque y tomando en cuenta las pérdidas de presión mencionadas anteriormente. Se obtiene para la velocidad angular, la curva de la figura 19, en la que solo fue necesaria una curva de segundo orden.

Para los mismos datos se hace el análisis con la potencia consumida por el motor. Esto se puede observar en la figura 20. Se logra una curva que es una suma y multiplicación de funciones de segundo orden, como las mostradas anteriormente, debido a que la forma de la onda de la potencia es más compleja que la de velocidad. Entre las funciones sumadas existen grados de participación, que son contenidos en la ganancia, de la misma forma para la multiplicación. La topología tanto de la potencia como de la velocidad angular se pueden apreciar en la figura 18. En el caso de la potencia, se tienen 3 funciones de segundo orden, en las que las dos primeras se suman y su resultado se multiplica con la tercera, mientras que, para la velocidad angular, se usa solamente una función. Las constantes obtenidas para estas curvas se pueden ver en la tabla 3.

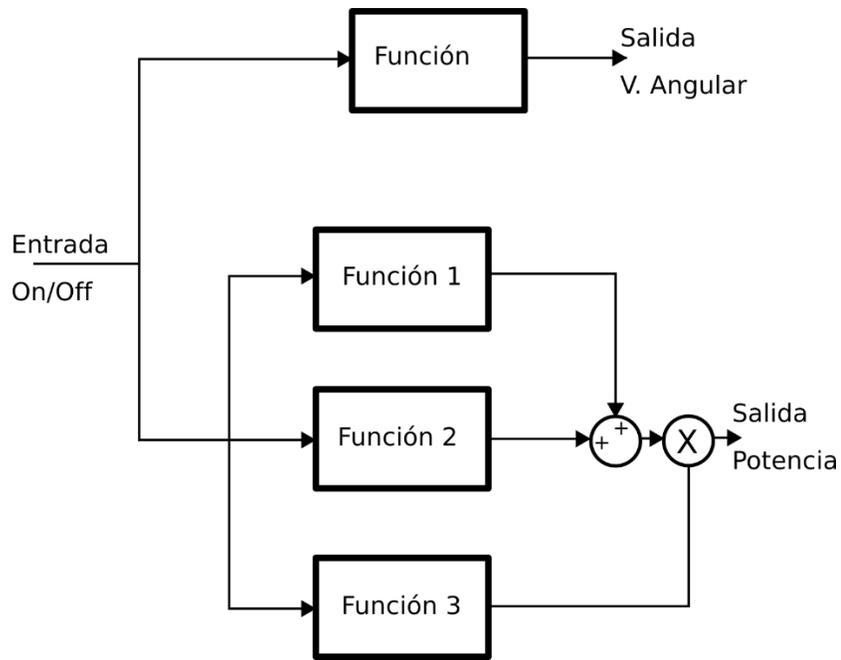


Figura 18. Topología del modelo para potencia y velocidad angular. Fuente: elaboración propia.

Tabla 3. Valores de parámetros para aproximación primera bomba.

Parámetro	Velocidad angular [RPM]	Potencia [W]		
		Función 1	Función 2	Función 3
$K$	2900	93.3	40	300
$\omega_n$	2.2398	40.1753	20.4502	2.5
$\xi$	0.8504	0.02	0.6286	0.2

**Comparación velocidad angular simulador y modelo de simulador, Bomba 1**

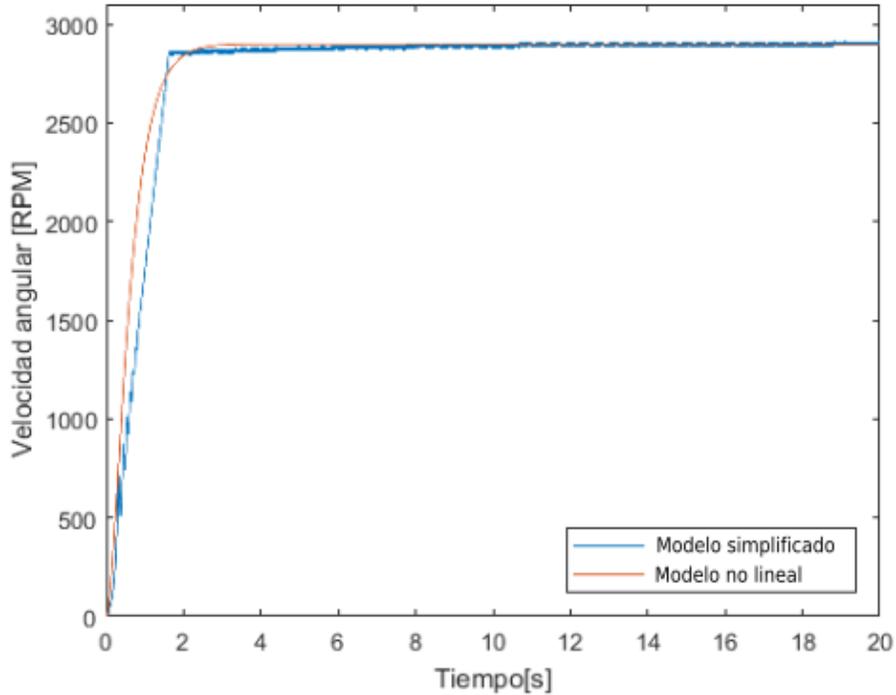


Figura 19. Ajuste de una curva de segundo orden a la velocidad angular de bomba 1. Fuente: Elaboración propia.

**Comparación potencias simulador y modelo de simulador, Bomba 1**

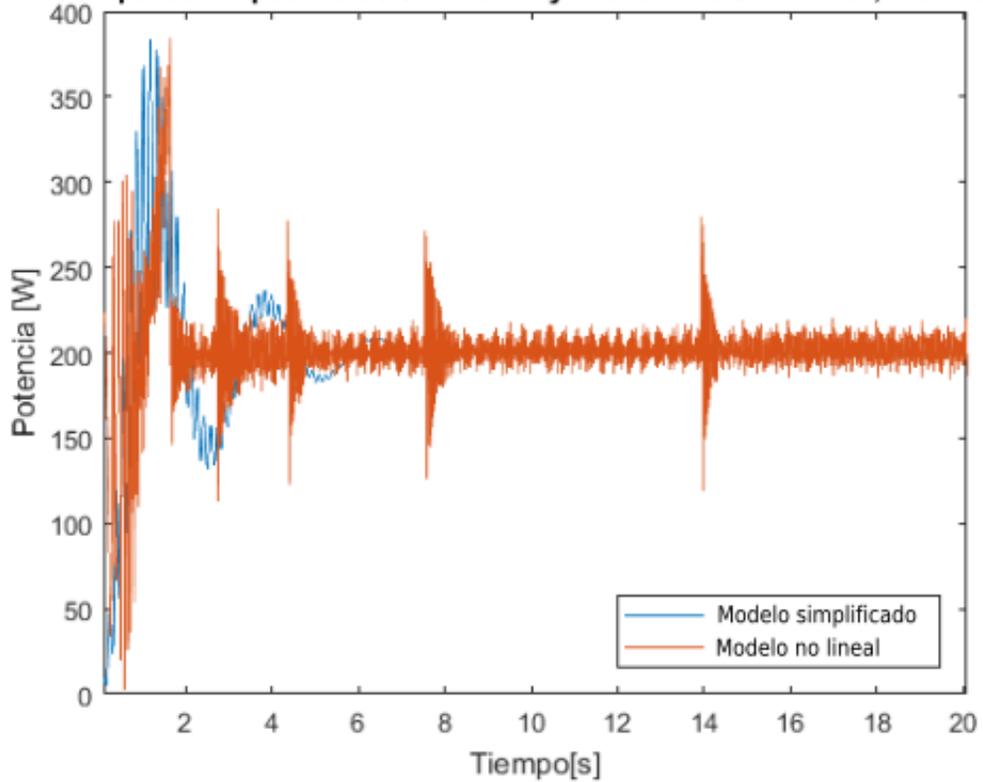


Figura 20. Ajuste de una curva de segundo orden a la potencia simulada de la bomba 1. Fuente: Elaboración propia.

Para la segunda bomba, de caudal  $1.112 \left[ \frac{m^3}{h} \right]$  y  $14[m]$  de nivel se procede de forma similar, y cualitativamente se puede notar que, aunque con algunas variaciones, se tienen prácticamente las mismas formas de onda, por lo tanto, solo se ajustan las ganancias y participaciones de las funciones usadas para el modelo. En la figura 21 y figura 22, se pueden apreciar los resultados mencionados. Ambos resultados también quedan registrados en la tabla 4.

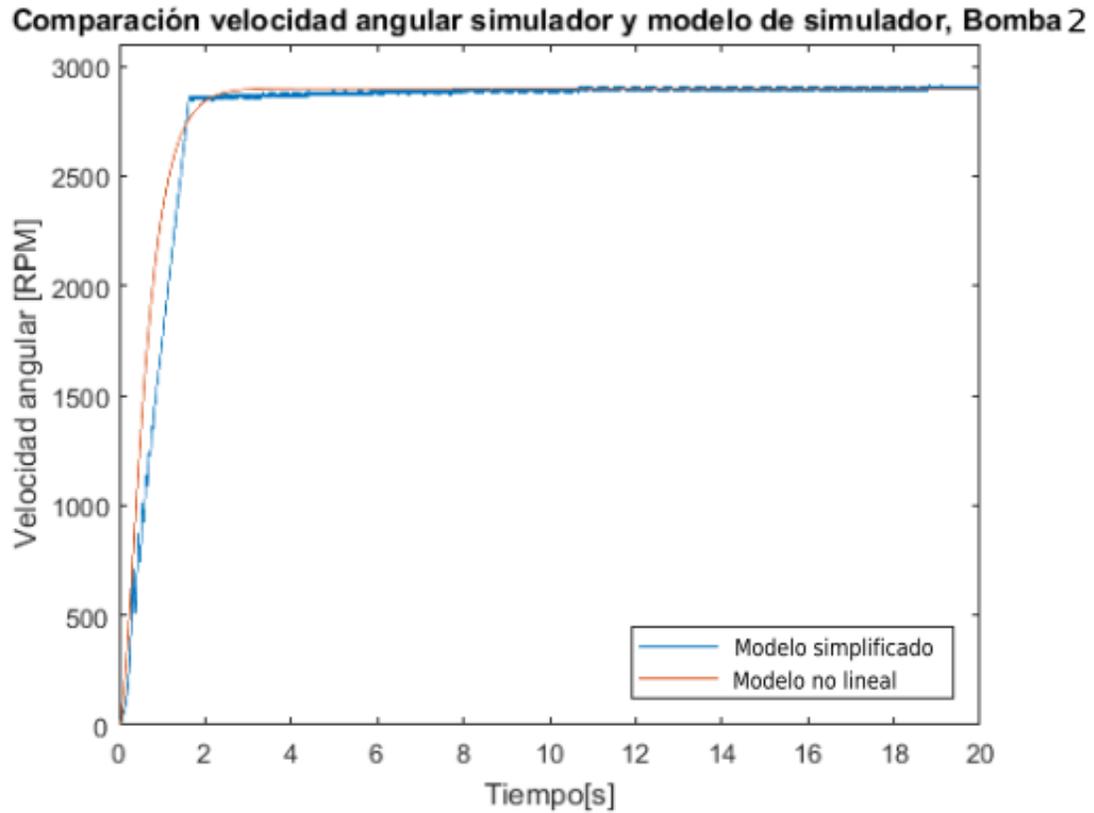


Figura 21. Ajuste de una curva de segundo orden a la velocidad angular de bomba 2. Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4. Valores de parámetros para aproximación segunda bomba.

Parámetro	Velocidad angular [RPM]	Potencia [W]		
		Función 1	Función 2	Función 3
$K$	2900	72.3	31	232.5
$\omega_n$	2.2398	40.1753	20.4502	2.5
$\xi$	0.8504	0.02	0.6286	0.2

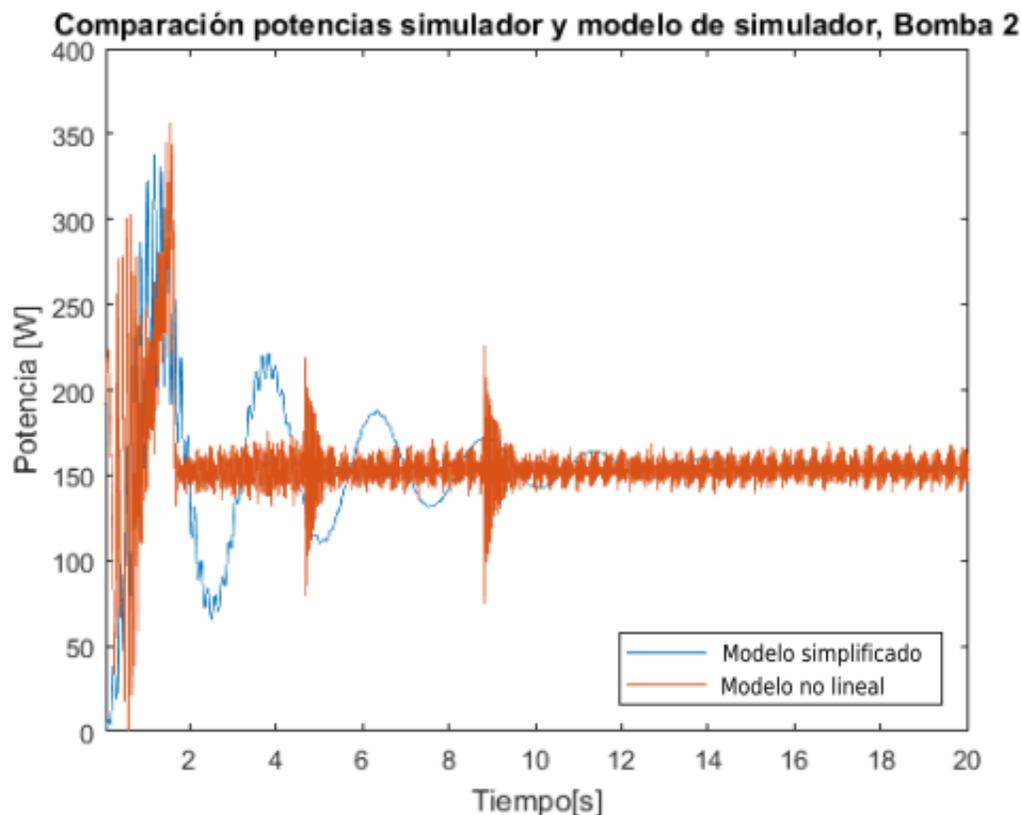


Figura 22. Ajuste de una curva de segundo orden a la potencia simulada de la bomba 2. Fuente: Elaboración propia.

Al analizar curvas de las figuras 19,20,21,22 se puede notar que tienen un tiempo de establecimiento y una amortiguación similar, teniendo el mismo estado estacionario para la variable en cuestión y se complementa con la medida del error cuadrático medio de un 10% aproximadamente para potencia en ambos casos y de 2% para velocidad angular, también en ambos casos. Tomando en cuenta la variabilidad y complejidad de la señal de potencia comparado con la de velocidad angular, se toma como un valor aceptable. Además, se suman los datos de potencia para cada instante en una simulación de 50 segundos y se comparan las señales del simulador y los modelos, estos dan un error menor al 1%. Se menciona esto último porque este trabajo también debe considerar la energía consumida y en estado estacionario se tiende a igualar.

Las variables que conectan la parte de la bomba a la parte de estanques y pozos son caudal y presión manométrica y para su simulación, se toma la velocidad del rotor y a partir de las leyes de afinidad en las ecuaciones (11) y (13), se van calculando a cada instante. El caudal obtenido se agrega como flujo de salida a los pozos y como flujo de entrada a los estanques. Para verificar su funcionamiento, se analiza en estado estacionario para el llenado de un estanque, para ambas bombas se puede observar, en las figuras 23 y 24 para la bomba 1 y 2 respectivamente, que el caudal utilizado para llenar el estanque es constante durante todo el proceso debido a que se trabaja en un punto de operación fijo, reflejándose en la pendiente de la curva de nivel en función del tiempo. Además de que el caudal sea constante, otra forma de verificación tiene que ver con el tiempo de llenado,

donde se puede apreciar que con un flujo de  $1.896 \left[ \frac{m^3}{h} \right]$  el estanque alcanza su nivel máximo aproximadamente en cerca de 32 minutos o 1930 segundos. Análogamente, para la segunda bomba que tiene un flujo de  $1.112 \left[ \frac{m^3}{h} \right]$ , el estanque alcanza su nivel máximo en un tiempo cercano a 54 minutos o 3300 segundos. Ambos casos se comportan de forma coherente a lo esperado, por lo tanto, los integradores están cumpliendo su función de acumular el agua que levantan las bombas en la simulación.

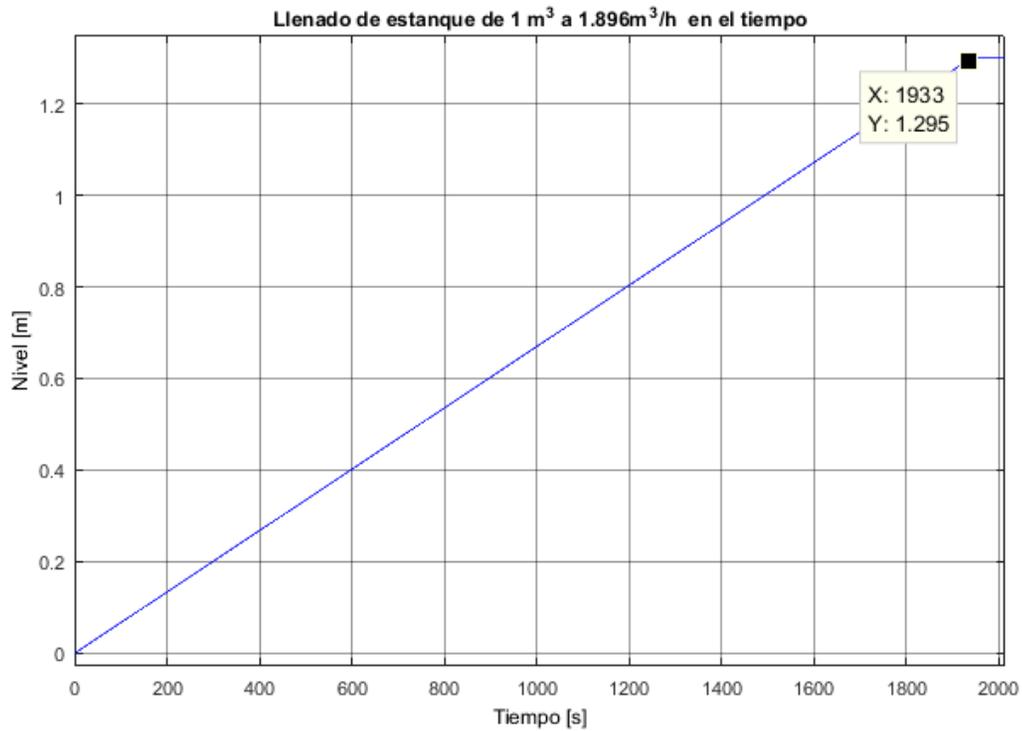


Figura 23. Tiempo de llenado de estanque para bomba 1. Fuente: Elaboración propia.

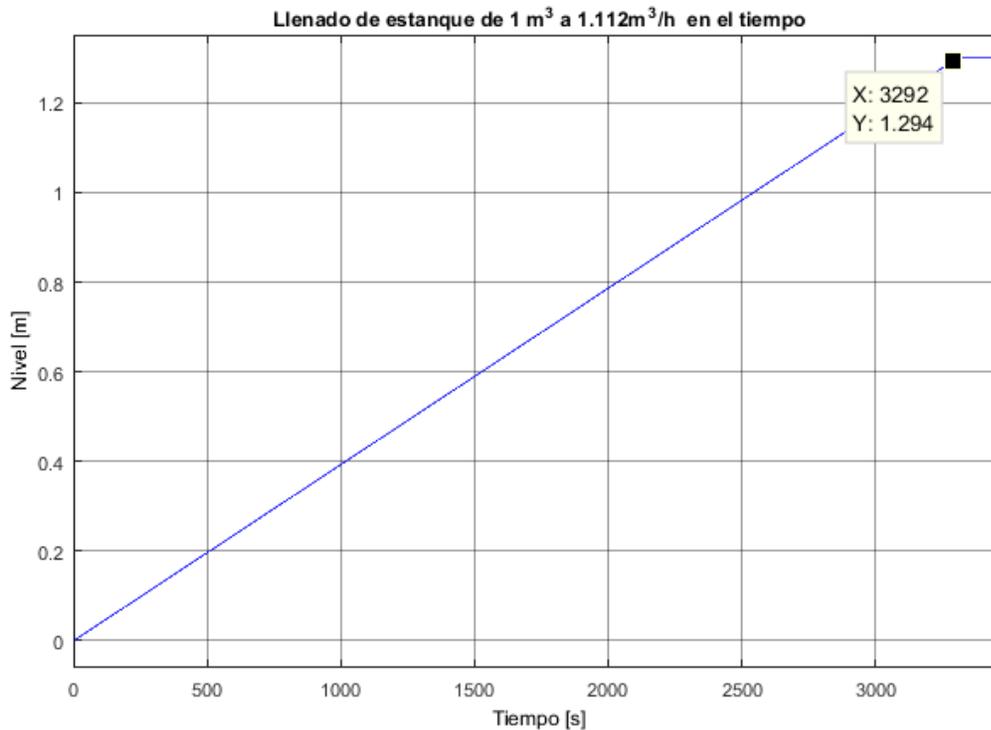


Figura 24. Tiempo de llenado de estanque para bomba 2. Fuente: Elaboración propia.

Habiendo comprobado el funcionamiento de la parte hídrica, se continúa hacia la parte de energía, que activará las bombas permitiendo el funcionamiento del sistema. Desde el punto de vista de la micro-red, se usarán datos reales obtenidos en la comunidad José Painecura para varios meses de radiación solar muestreados cada 10 minutos, de los cuales se tomarán días representativos de alta y baja disponibilidad de energía. En el caso de la demanda de energía se tomarán datos de perfiles de consumo obtenidos también en la comunidad José Painecura, tabulados cada 1 hora [22]. Se asumirá que la radiación y el consumo de energía son variables conocidas en los 10 pasos de la predicción y se propone como trabajo futuro implementar un predictor para este parámetro complementando el sistema. De esta forma se podrá obtener el excedente de energía para la simulación. En las figuras 25 y 26, se muestran ejemplos de los datos de la radiación solar y de perfiles de consumo respectivamente.

Ejemplos de radiación solar en la comunidad José Painecura

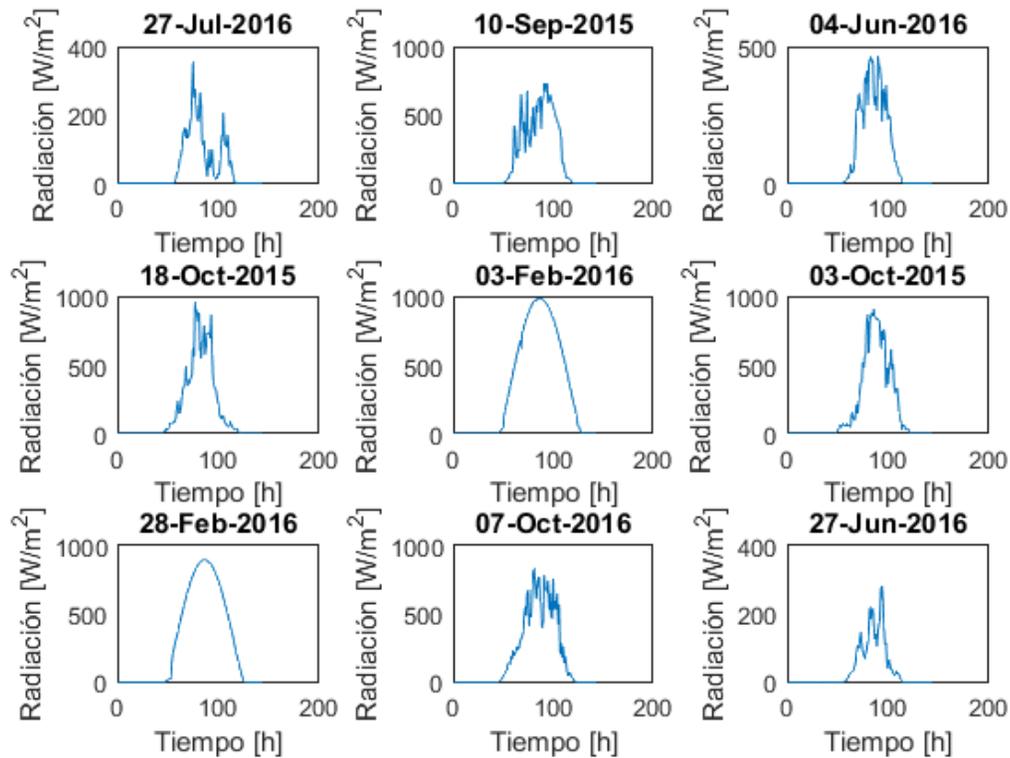


Figura 25. Ejemplos de medidas de radiación solar en la comunidad José Painecura. Fuente: Elaboración propia.

Se puede comentar en términos de la radiación, que existe una fuerte influencia del mes en el que se toma la medición, debido a su correspondencia con las estaciones del año como puede ser las mediciones de septiembre o junio en comparación con las de febrero, que son más limpias (puede deberse a un día despejado) y más altas en promedio. Por el otro lado, en los perfiles de consumo se observa que sobre las 20 horas todos los perfiles comienzan a tener un aumento en el consumo, por que a esa hora está de noche, o está empezando a oscurecer, también dependiendo de la época del año, pero también se observa que en algunas viviendas los peak son más altos que en otras.

Integradas la parte hídrica y la parte eléctrica, se está en condiciones de hacer pruebas del controlador predictivo diseñado para ver su comportamiento frente a distintos escenarios y restricciones utilizando los datos reales de radiación y perfiles de demanda asociados. En el siguiente capítulo se muestran los resultados obtenidos.

**Perfiles de consumo de ejemplo de la comunidad José Painecura**

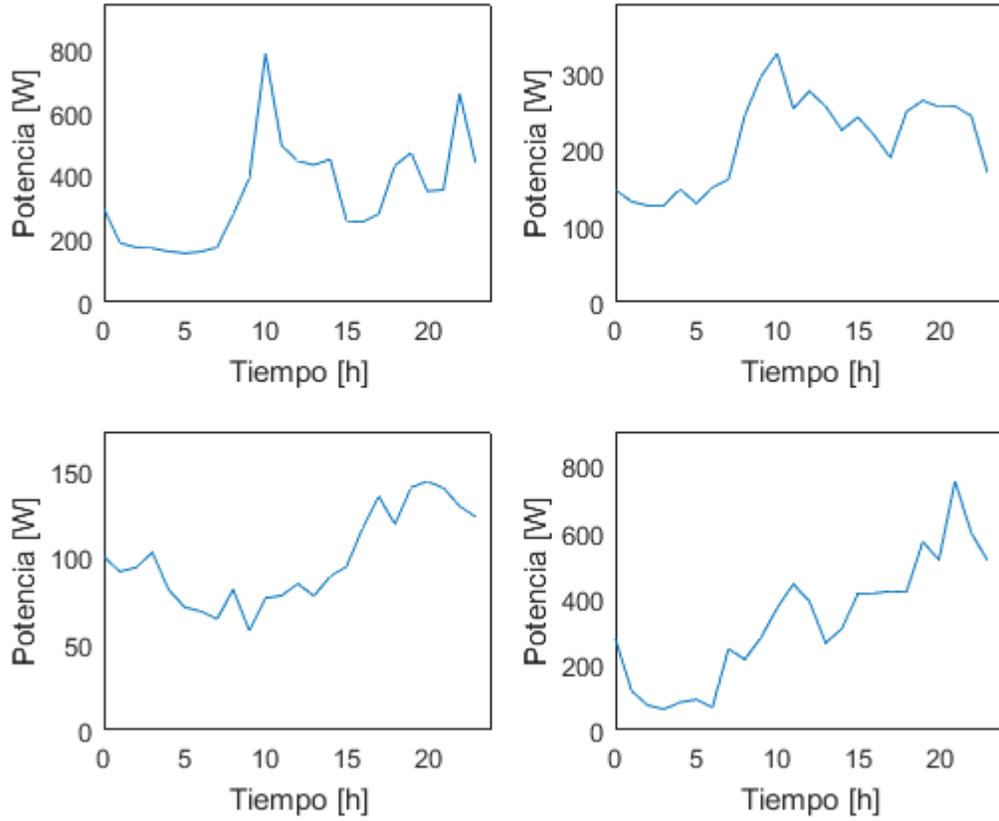


Figura 26. Perfiles de consumo de familias de la comunidad José Painecura. Fuente: Elaboración propia.

## 5. Resultados

En esta sección se muestra la comparación de los resultados obtenidos del controlador predictivo (MPC) diseñado con un controlador on/off. Se comienza con el problema de optimización sin restricciones, hasta la integración de las restricciones planteadas en el problema, con escenarios reales. En principio se asume energía ilimitada hasta las pruebas de energía con los perfiles de radiación y consumo conocidos.

Primero se compara para una referencia constante, sin considerar el esfuerzo de control ni las referencias. Esto se puede observar las figuras 27, 28, 29 y 30, que están sujeta a las siguientes condiciones iniciales:

Niveles de estanque inicial: 2 [m].

Niveles de pozo inicial: 2 [m].

Nivel napa inicial: 1.5 [m].

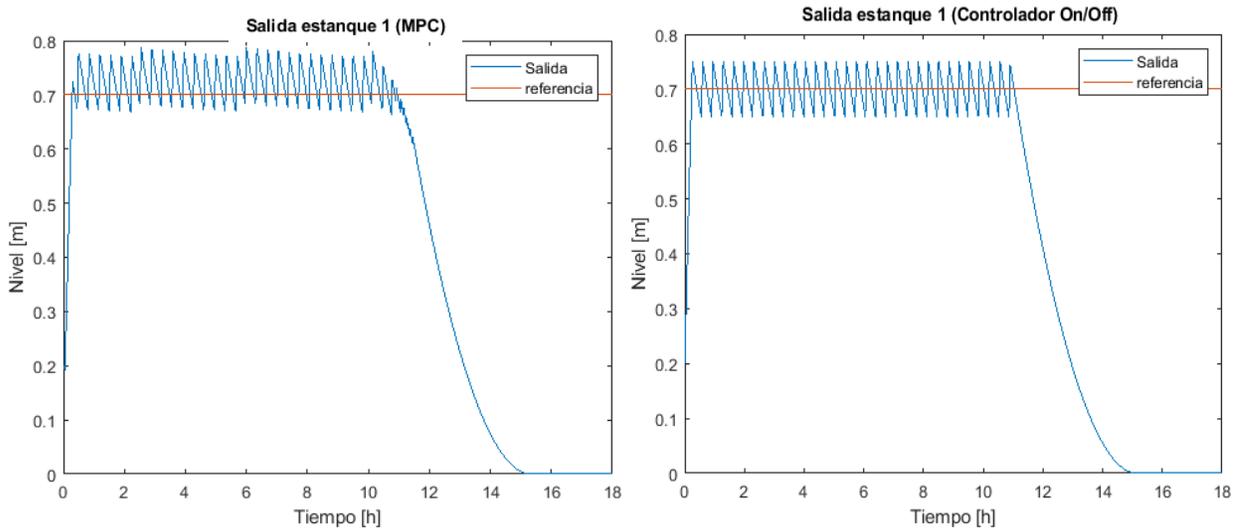


Figura 27. Comparación de salida para estanque 1, MPC vs On/Off. Fuente: Elaboración propia.

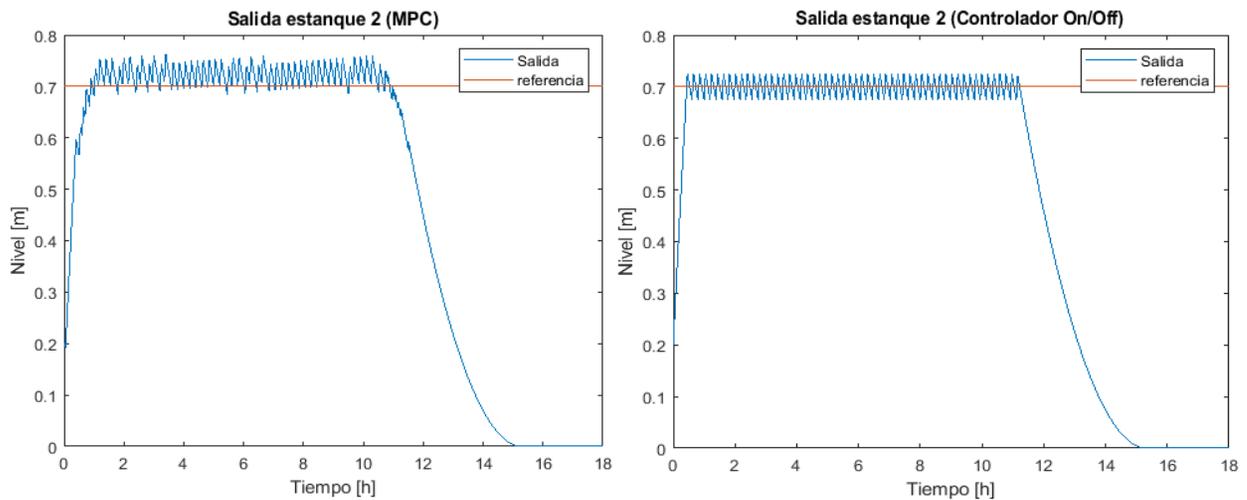


Figura 28. Comparación de salida para estanque 2, MPC vs On/Off. Fuente: Elaboración propia.

Como se puede observar, los sistemas tienden a comportarse de forma similar, tanto en amplitud como en el tiempo que se vacía el estanque para ambos sistemas, alrededor de 15 horas. Esto se debe a que tanto el MPC como el control On/Off están enfocados únicamente en el seguimiento de la referencia. Las diferencias vienen principalmente dadas por la naturaleza de los controladores. El MPC depende, en términos del modelo, de las salidas y acciones de control anteriores, lo que genera pequeñas variaciones al tomar la decisión sobre el funcionamiento de las bombas. En el caso del controlador on/off se tienen valores fijos del nivel de agua que indican el encendido y el apagado de las bombas generando picos regulares como salida.

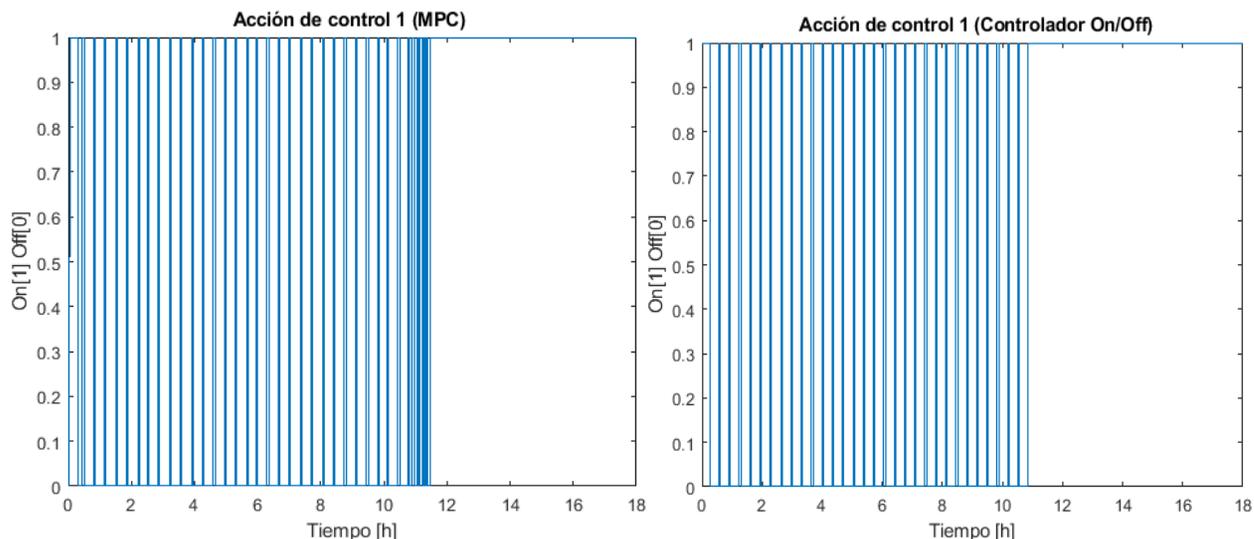


Figura 29. Comparación de acción de control estanque 1, MPC vs On/Off. Fuente: Elaboración propia.

En el caso de las acciones de control puede verse que para el MPC es más flexible generando tiempos de operación de las bombas, no depende exclusivamente del nivel como en el control on/off en donde se tienen picos periódicos bajo cualquier condición de caudal de salida constante (de 45 litros por hora aproximadamente). Esto se cumple de la misma forma para ambas bombas y es la causa de que la referencia tenga partes más suaves cuando actúa el MPC.

Para tener una visión más general del sistema, se puede observar en la figura 27 cómo funciona el sistema completo, incluyendo los pozos que se secan en la prueba mostrada, provocando que los estanques no reciban más agua y, por lo tanto, que se vacíen.

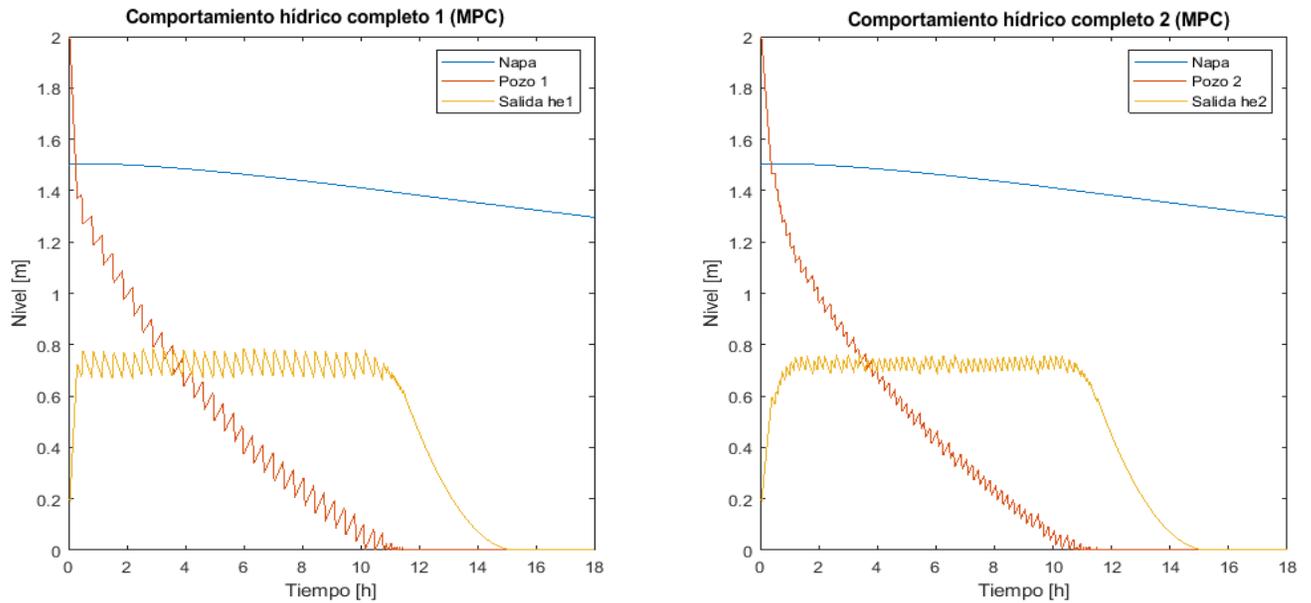


Figura 30. Comportamiento hídrico completo para MPC. Fuente: Elaboración propia.

Como la prueba anterior fue realizada sin tomar en cuenta en la decisión el uso de las bombas, en los siguientes resultados se integra el esfuerzo de control y se muestra una sensibilidad en el parámetro que multiplica a la variación de la acción de control en la función objetivo de la ecuación (56). Para las mismas condiciones iniciales y referencia de la prueba anterior se agregan  $\lambda = 1, 0.1, 0.01$  y  $0.001$ . Los resultados para estas pruebas se pueden ver en las Figuras 31 a), 31 b), 31 c), 31 d).

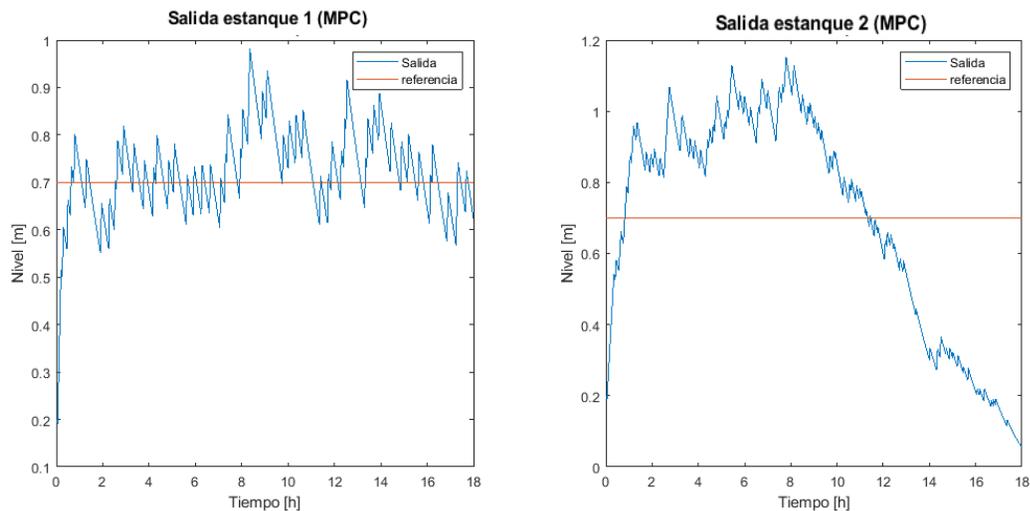


Figura 31 a). Prueba de sensibilidad  $\lambda = 1$  (importancia de la variación de la acción de control). Fuente: Elaboración propia.

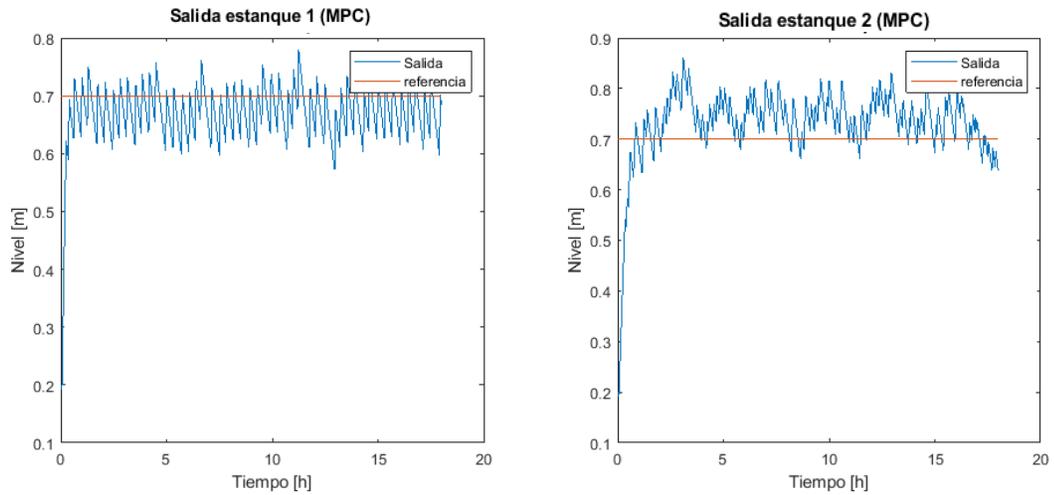


Figura 31 b). Prueba de sensibilidad  $\lambda = 0.1$  (importancia de la variación de la acción de control). Fuente: Elaboración propia.

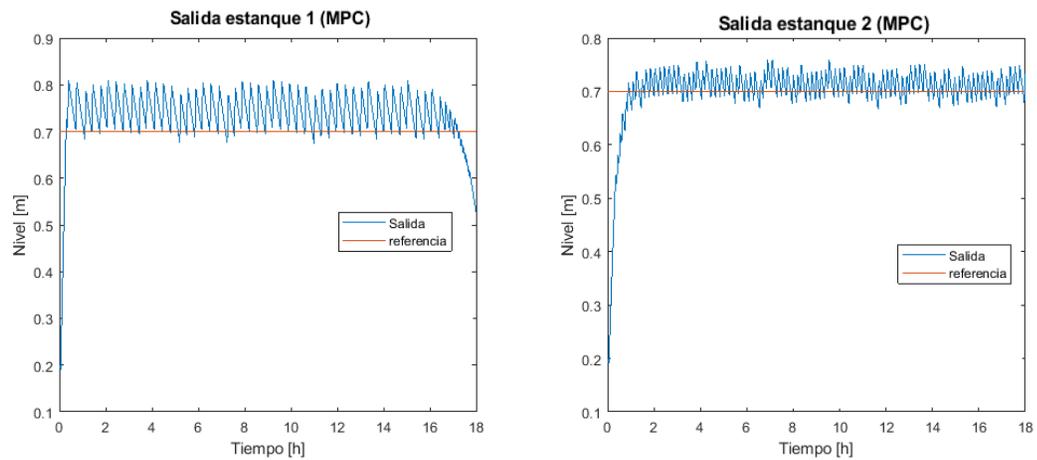


Figura 31 c). Prueba de sensibilidad  $\lambda = 0.01$  (importancia de la variación de la acción de control). Fuente: Elaboración propia.

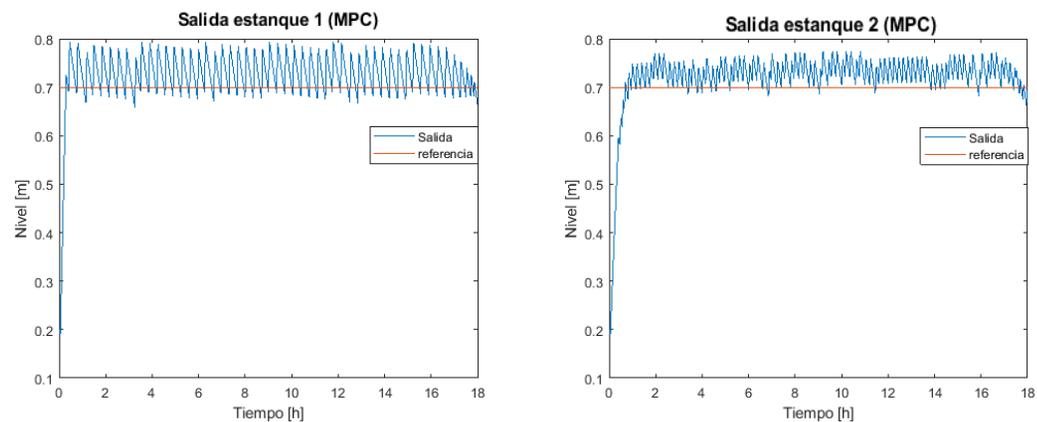


Figura 31 d). Prueba de sensibilidad  $\lambda = 0.001$  (importancia de la variación de la acción de control). Fuente: Elaboración propia.

A partir de los resultados de las curvas generadas por la salida, se puede notar que mientras más ponderación se le da a la variación de la acción de control, más difícil para el sistema es seguir la referencia, debido a que se cambia el foco de la variable controlada a la variable manipulada. Esto también genera que la acción de control sea más periódica, y como se mostró en la parte anterior, cuando no existe este parámetro, es cuando más se acerca la curva on/off con la del controlador predictivo.

De los valores de lambda usados, se eligen el 0.001 y el 0.01 para continuar con los resultados. Ahora se analiza la capacidad del controlador de responder al cambio de referencia. Luego para las mismas condiciones de cambio de referencia, se incluyen las restricciones, fijando algunas referencias para que no puedan ser cumplidas. Lo anterior se muestra en las figuras 32, 33 y 34. Esta prueba sigue manteniendo las condiciones iniciales anteriores.

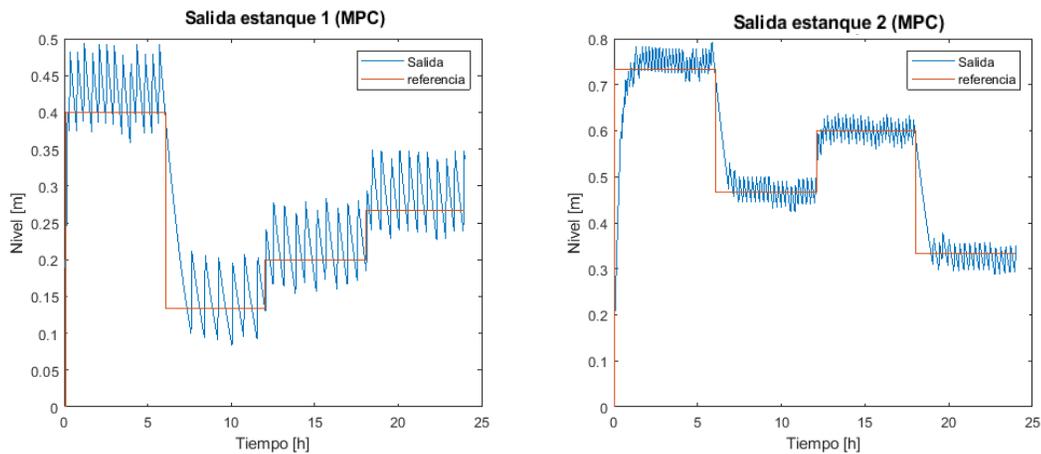


Figura 32. Prueba de sensibilidad de seguimiento de referencia variable, MPC con  $\lambda = 0.01$  Fuente: Elaboración propia.

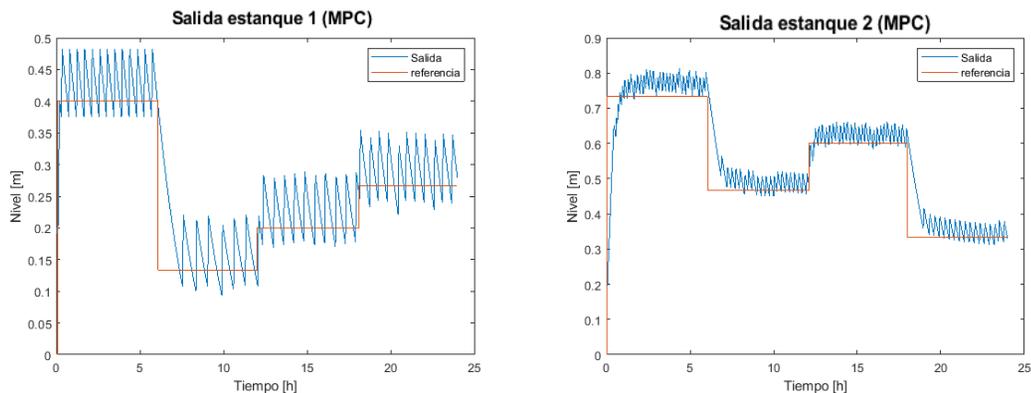


Figura 33. Prueba de sensibilidad de seguimiento de referencia variable, MPC con  $\lambda = 0.001$  Fuente: Elaboración propia.

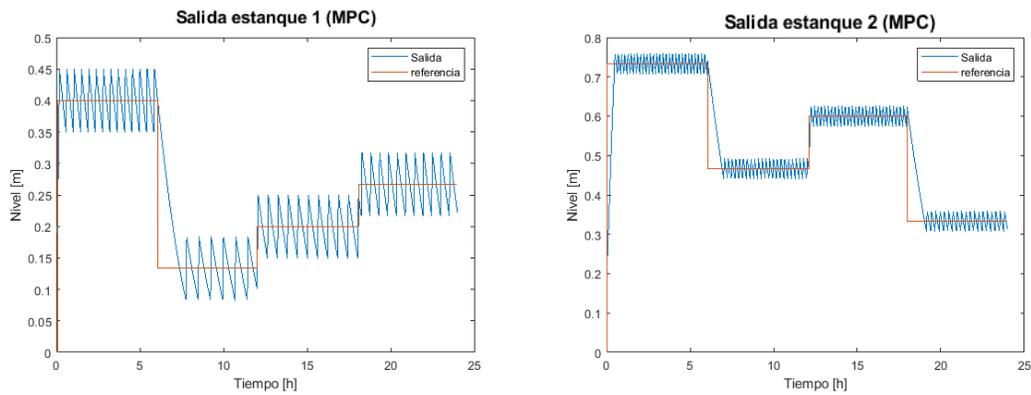


Figura 34. Prueba de seguimiento de referencia variable control on/off. Fuente: Elaboración propia.

Se parte notando que hay un comportamiento similar al de la primera prueba, logrando seguir la referencia variable. Sigue siendo una característica distintiva de los resultados del MPC, las curvas más suaves debido a que la duración de los pulsos está sujeta a la optimización por parte del algoritmo genético teniendo como base mínima el tiempo de muestreo (3 minutos) y como en el controlador on/off, que no se considera en las predicciones ni decisiones.

A la hora de integrar las restricciones de niveles mínimos y máximos, se toma la prueba anterior, pero se dejan fuera de los límites algunas de las referencias seguidas anteriormente. Como se puede ver en la figura 35. Se usa  $\lambda = 0.01$  para esta prueba. Los límites se establecieron tomando en:

$$h_{emax1} = 0.8$$

$$h_{emax2} = 0.8$$

$$h_{emin1} = 0.4$$

$$h_{emin2} = 0.4$$

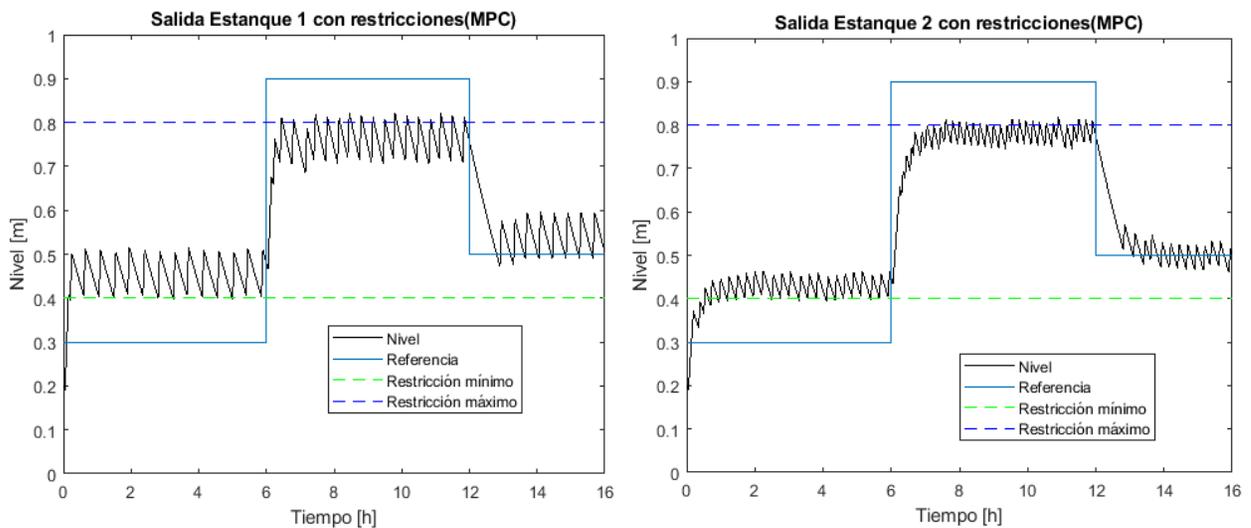


Figura 35. Prueba de restricciones en el seguimiento de referencia para MPC. Fuente: Elaboración propia.

Se puede ver que en ambos casos se cumplen las restricciones, no estrictamente, debido a que en este caso son parte de la función a minimizar. Un cambio que se hizo a la formulación original de las restricciones con sigmoides de la ecuación 57, fue en el caso del máximo que se cambió por una función que es cero para valores bajo cero y es cuadrática cuando los valores son mayores de que cero. Se podría explicar este comportamiento debido a que el modelo tiende a tener un error más grande al predecir los máximos. Por lo que, en este caso, se distorsiona la decisión. Esto también explica que la señal de salida no esté centrada perfectamente a la referencia como se puede observar en la Figura 36, que se trata del mismo escenario que se usó para la figura 35.

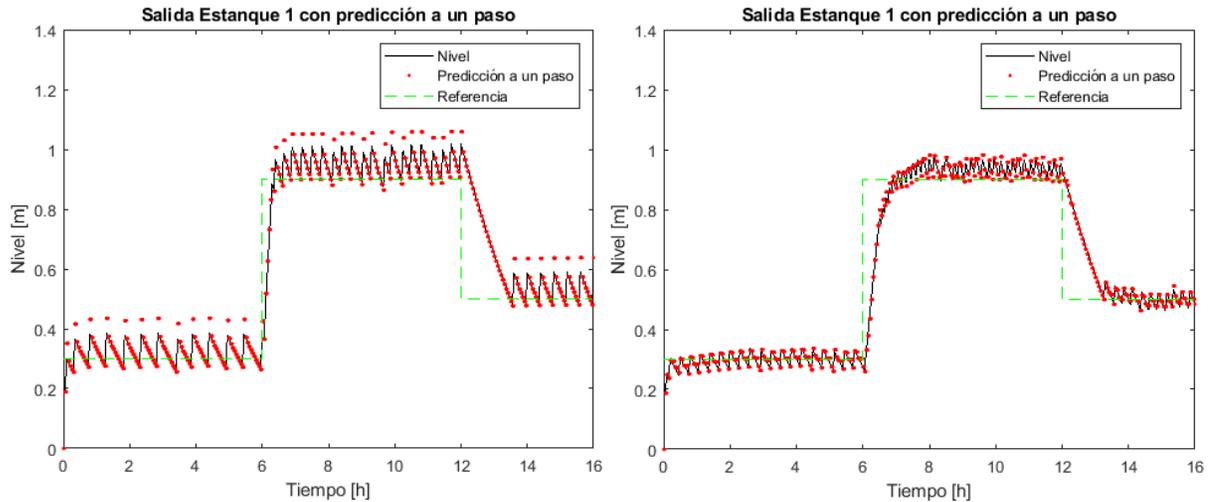


Figura 36. Salidas reales y predicción para 1 paso adelante. Fuente: Elaboración propia.

Anteriormente se ha asumido que no existen limitaciones energéticas, para ver el funcionamiento del controlador predictivo tomando en cuenta restricciones, por lo que en siguiente caso se incluirá la energía como una variable limitada. Se tienen perfiles de demanda y datos medidos de radiación, por lo que se puede calcular para cada momento si es que existe energía suficiente para poder encender las bombas. En el caso de que no se tenga suficiente no se podrá hacer funcionar las bombas y, como consecuencia, que no se pueda alcanzar la referencia, pero protegiendo a la micro-red desde el punto de vista eléctrico, al no pedirle más potencia de la que podría entregar.

Los resultados que se pueden observar en las figuras 37 y 38 corresponden a la implementación un controlador on/off ya no tomando en cuenta el nivel si no que la potencia disponible, en donde se activan cada una cuando hay energía disponible para hacerlo individualmente, pero sin tomar en cuenta si es que la otra bomba necesita encenderse.

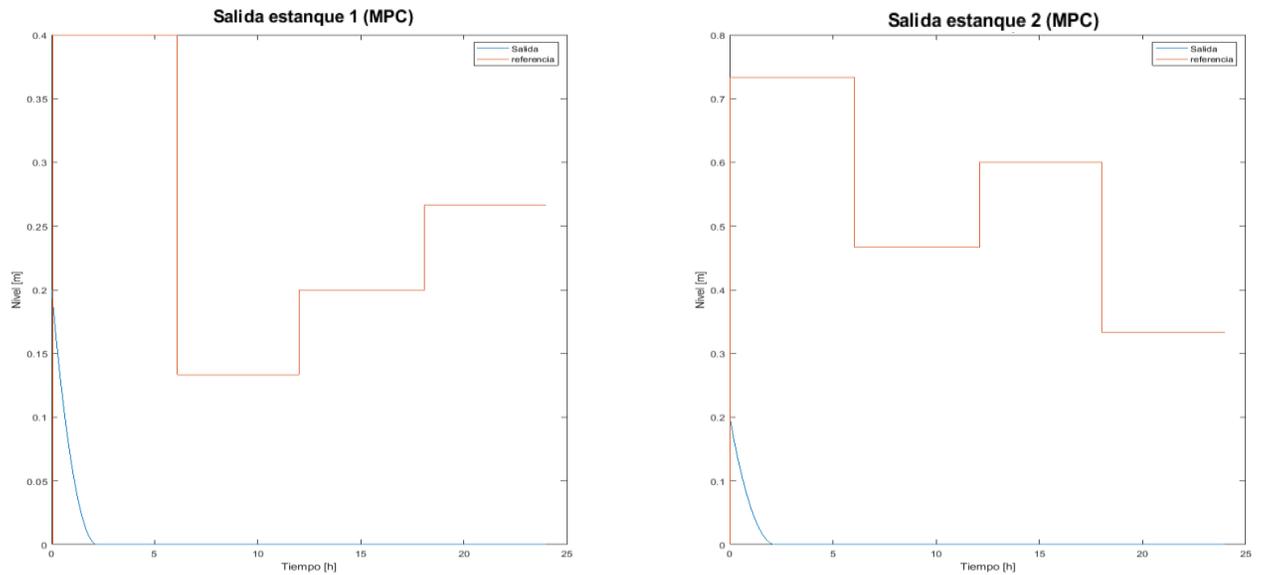


Figura 37. Sistema sin disponibilidad de energía. Fuente: Elaboración propia.

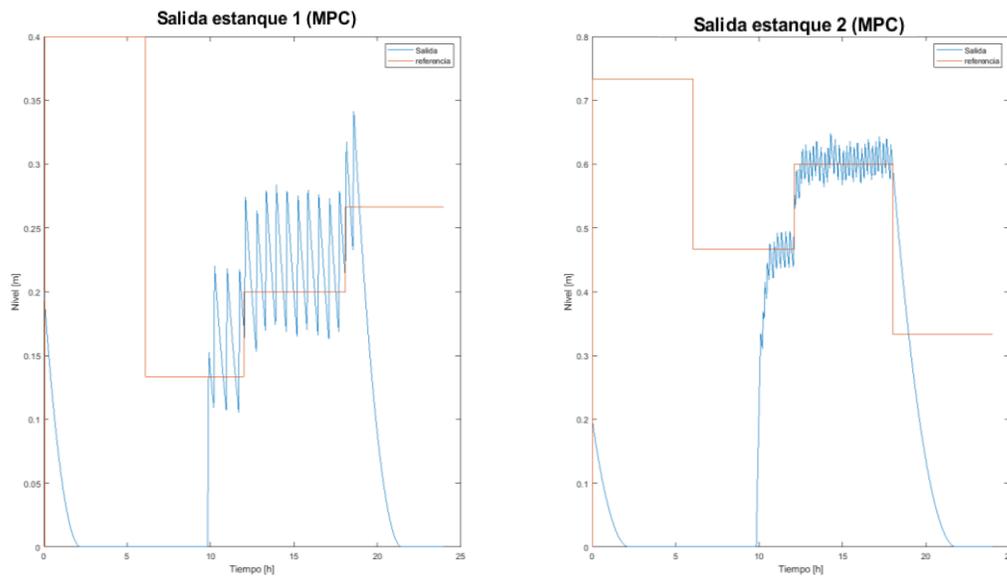


Figura 38. Sistema con disponibilidad de energía limitada, controlador on/off de uso de bombas por energía. Fuente: Elaboración propia.

De la figura 38 además se puede notar que la bomba 2 parte antes que la 1 debido a que necesita menos energía para funcionar. Uno de los problemas de esta forma de implementar la energía, es que no prioriza a quien está más lejos de la referencia si no simplemente al que le basta con la energía del momento. Además, en este caso estaría usando energía de la red porque hay momentos en los que ambas bombas, por separado, tienen potencia menor que la disponible pero si es que se suman sobrepasan el límite de potencia disponible. Este caso no es detectado sin que se agregue esta restricción.

Como la implementación anterior no produce coordinación entre las bombas, se agrega la restricción de energía dentro de la función fitness, esto se puede observar en las figuras 39 y 40, notándose que el resultado mejora debido a que, de esta manera, la condición no la toma cada bomba por separada, sino que se toma en conjunto priorizando la que esté más lejos de la referencia. Esto queda claro entre 10 y 15 horas cuando la energía es suficiente para que cada bomba actúe de forma individual, pero no para que lo hagan simultáneamente, de esto resulta que la bomba 2 actúa primero debido a que su error con respecto a la referencia es mayor.

Luego si se suman las acciones de control de ambas bombas de la figura 40, se obtiene un resultado en donde el valor máximo es 1, debido a que funcionan las dos bombas coordinadas, pero no simultáneamente, en el caso de que el uso las dos bombas fuera simultaneo el valor máximo de esta suma sería 2.

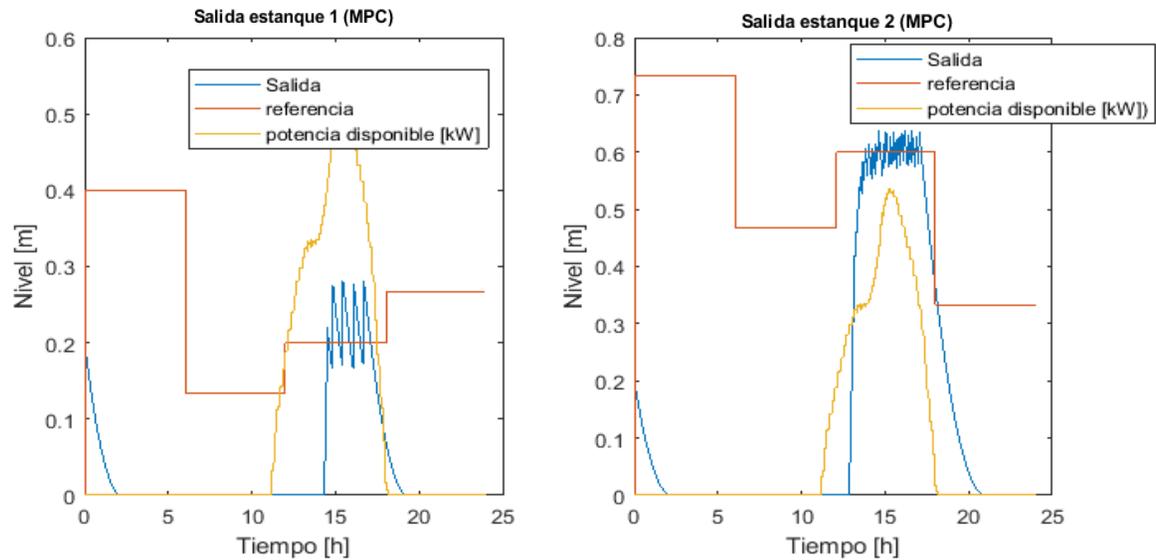


Figura 39. Sistema con disponibilidad de energía limitada, implementado como restricción. Fuente: Elaboración propia.

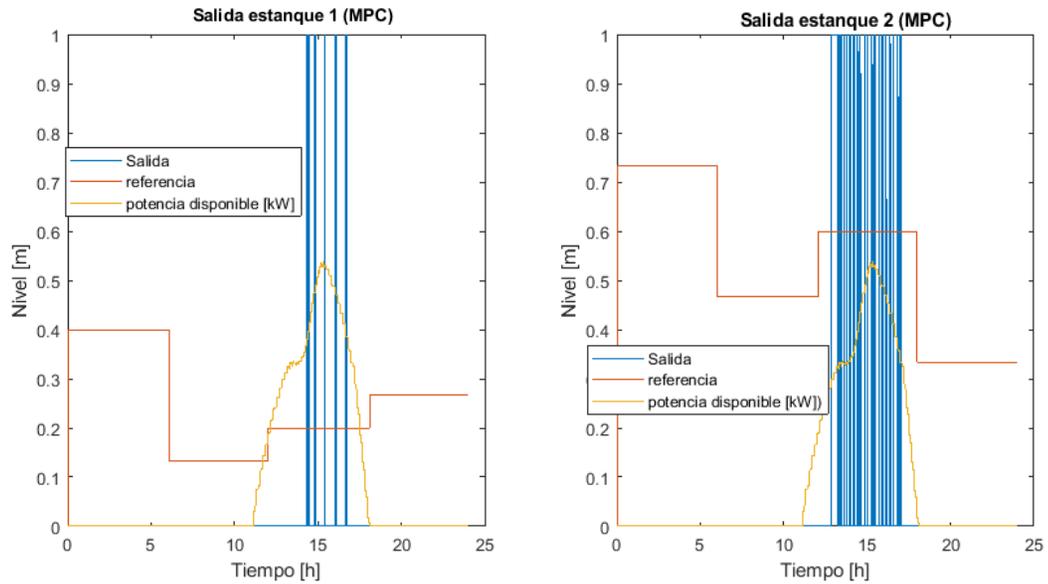


Figura 40. Sistema con disponibilidad de energía limitada, implementado como restricción. Fuente: Elaboración propia.

Finalmente se prueba el sistema en un escenario más real, en donde la energía es limitada y se riega en períodos limitados de tiempo, a diferencia de las partes anteriores en las cuales se tenía un flujo de salida constante para ambos estanques, de forma de poder probar que se estaba controlando los estanques. Este resultado se muestra en la figura 41 en donde se riega una hora cada día a las 22 horas, y no se limita la bomba más que por la energía disponible.

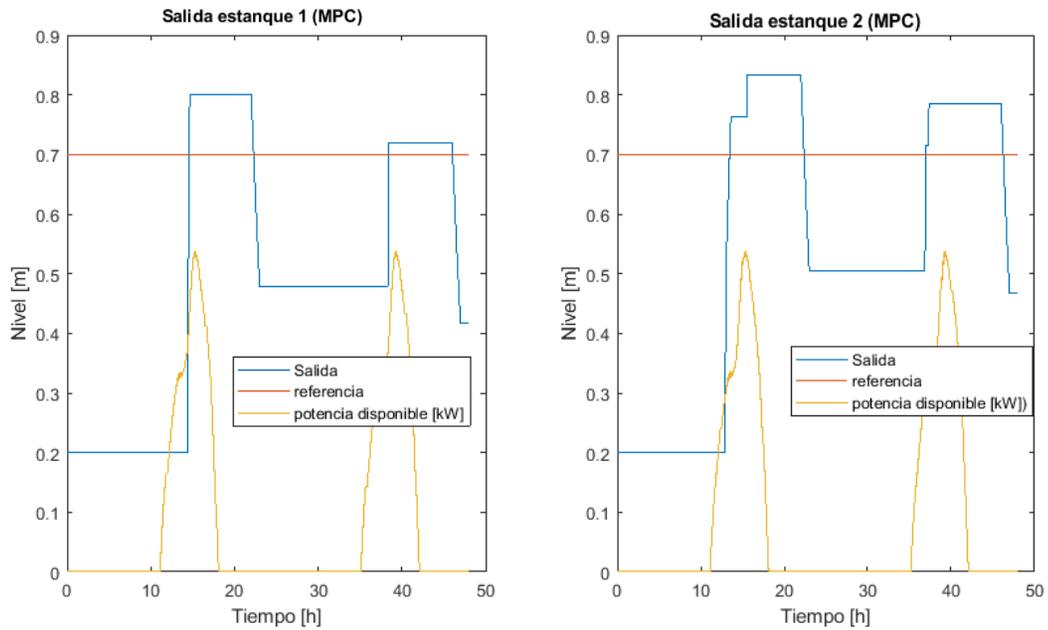


Figura 41. Escenario más real. Fuente: Elaboración propia.

En este escenario se puede apreciar que los gráficos de los niveles de agua ya no tienen picos debido a que al alcanzar un nivel superior al de la referencia, la única acción posible del MPC es dejar de bombear, porque si lo hace, se aumentará el error con respecto a la referencia. Además, al requerir una potencia menor para su funcionamiento, la bomba dos se acciona primero. Finalmente, en la figura 42 se observa que al graficar las acciones de control, y la suma de estas, el máximo vuelve a ser 1, comprobando que existe una coordinación de las bombas, usando turnos para alcanzar sus respectivas referencias.

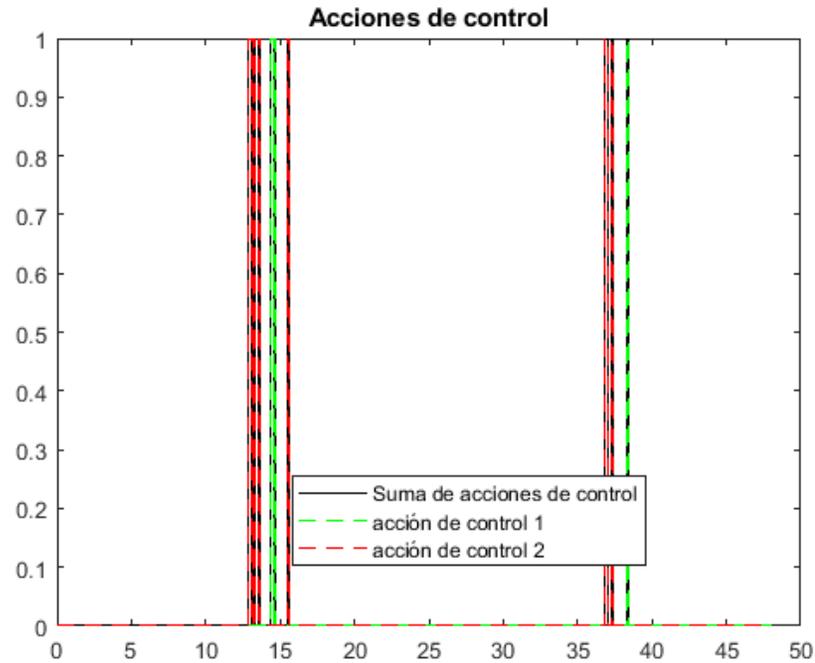


Figura 42. Coordinación de las acciones de control. Fuente: Elaboración propia.

## 6. Conclusiones

Se logró diseñar un sistema de gestión de agua para la micro-red, considerando energía y agua. Este diseño basado control predictivo basado en modelos, o MPC, se preocupa no solo de lo que está pasando, sino que también del tiempo futuro, apoyado en los modelos con los cuales se estiman las salidas futuras a partir de acciones de control futuras.

Se generó y validó un simulador del sistema hídrico para dos estanques y dos pozos conectados por una napa. Este modelo sirvió, además, para probar el sistema de coordinación de llenado de estanques de la estrategia diseñada en este trabajo. Cumpliéndose los objetivos específicos de la memoria.

Se observa que estos modelos predictivos son determinantes para tener un controlador que responda a las necesidades del problema a solucionar. En el caso de tener predicciones imprecisas, el modelo controlará lo necesario para que ese modelo impreciso funcione bien, haciendo que el caso real no necesariamente vea una solución adecuada. En el caso de este trabajo, se piensa que falta por mejorar los modelos de predicción, ligado a otro aspecto relevante que tiene que ver con los datos: su cantidad y diversidad que los escenarios de funcionamiento que podrían contener para realizar una identificación más general del sistema, tratando de que generalice, para evitar que aprenda casos particulares. Mientras más información diversa se le suministre, mejor quedará el modelo y por lo tanto las predicciones a largo plazo, volviendo más eficiente aún el proceso completo.

Las simulaciones se logran en tiempos acotados debido a que dentro de este trabajo se consideraron simplificaciones de los modelos, las cuales en algunos casos bajan hasta 100 veces la cantidad de tiempo necesaria para generar un escenario de simulación. A esto se suma la aproximación de manera eficiente a la solución problema de optimización por parte del algoritmo genético, dado que para llegar al óptimo global, se habría requerido un gasto computacional mucho más alto.

A pesar de que ambos controladores usados tienen una acción de control binaria, debido a que el control MPC incorpora restricciones y toma en cuenta la acción de control como parte de la optimización y que, en cambio, el controlador on/off solo toma en cuenta un umbral establecido alrededor de la referencia, la estrategia de control predictivo resultó ser más dinámica, tomando decisiones que la estrategia on/off no habría podido debido a que usa menos información para decidir.

Independiente del controlador, el hecho de que solo se tengan dos opciones de operación (encendido y apagado) hace que al no cumplir el valor mínimo de energía disponible la bomba no pueda actuar, esto quita la posibilidad de actuar en potencias menores a la nominal, cuestión que podría solucionarse incorporando un variador de frecuencia en la bomba para que se pueda aprovechar mejor la energía.

El controlador propuesto se vuelve más autónomo que el on/off, debido que se le dota de capacidad para tomar decisiones incluso en tiempos en los que existe energía limitada, haciendo que las dos bombas (en el caso de ser posible) se coordinen para poder acercarse a la referencia incluso tomando turnos para cada bomba.

## 7. Trabajo futuro

Como trabajo futuro se proponen las siguientes proyecciones:

**Parte hídrica:** Puede probarse la capacidad de coordinar más de dos sistemas. Probar el funcionamiento. Además, se puede ver cuanto crece el problema de optimización y con el tiempo de resolución para evaluar la factibilidad de implementar esto en la práctica tomando en cuenta un horizonte de predicción razonable.

Otro punto para considerar sobre los estanques es su funcionamiento análogo al de una batería que guarda energía al almacenar el agua en un momento de alta disponibilidad de energía eléctrica.

Se podría mejorar el modelo de la napa, verificar en terreno los parámetros que se podrían usar para modelarla de la forma más real posible, modelando lluvias y estaciones del año con mejor precisión.

La integración de la eficiencia en el riego y el uso de agua. Una posible automatización dependiendo de humedad, pH, temperatura, tipo de cultivo, tipos de riego (aspersión, goteo, inundación), tipo de suelo, etc., que permitiría hacer que los cultivos puedan crecer en mejores condiciones ahorrando agua y energía eléctrica.

**MPC:** En términos del controlador, se propone integrar más predictores de otras variables de interés, como perfiles de consumo, radiación, lluvia, viento y/o estado baterías en el caso de que se quieran incluir como otro tipo de fuente de energía.

También se pueden probar modelos con más variables, que tomen en cuenta el flujo de salida del estanque además del de entrada, niveles de los pozos.

Un tema interesante podría ser el comparar el método de algoritmo genético, que resuelve el problema de optimización, con otro método.

Otras propuestas de trabajo futuro pueden ser el integrar el variador de frecuencia para que sea controlado por el MPC, y se pueda alcanzar mejor el nivel deseado.

Finalmente, se debería estudiar su implementación en la realidad y luego implementarlo, para validar las técnicas y además hacer un aporte en la eficiencia del riego de familias en la comunidad.

## 8. Bibliografía

- [1] Guera Gajardo, C. y Mondaca Cortés, R. (2017). Consecuencias de las industrias de celulosa y forestal en la ciudad de Arauco y su entorno: 1960-1992. Disponible en <http://repositorio.uchile.cl/handle/2250/144176>
- [2] Llancaqueo, V. (2006). Pueblo Mapuche. Derechos colectivos y territorio: Desafíos para la sustentabilidad democrática. LOM Ediciones.
- [3] Wilson, J. Buffa, A y Bou L. (2007) Física, sexta edición, Ciudad de México, México, Editorial Pearson Educación.
- [4] García, M (2006). Modelación y simulación de redes hidráulicas a presión mediante herramientas informáticas. Universidad Politécnica de Cartagena, Escuela universitaria de ingeniería técnica civil. Cartagena, España.
- [5] Katsuhiko, O (2010). Ingeniería de control moderna. Madrid, España, Editorial Pearson Educación, S.A.
- [6] Courtin, S. (2006). Apuntes para el curso ME53B. Laboratorio de Máquinas. Departamento de Ingeniería mecánica, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile.
- [7] Chaurete, J. (2003) Pump system analysis and sizing. Published by Fluide Design Inc.
- [8] Romo, J., Vargas, L., Et Al. (2006) Apuntes de Conversión Electromecánica de la Energía, Santiago de Chile: Departamento de Ingeniería Eléctrica, Universidad de Chile.
- [9] Fernández, F (2015). Modelado y simulación de sistema de control de llenado de estanques mediante Simulink. Escuela Universitaria de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Universidad de Tarapacá, Iquique, Chile.
- [10] Sáez, D, Santis, P (2014), Apuntes de Control Avanzado de Sistemas. Departamento de Ingeniería Eléctrica, Universidad de Chile.
- [11] Rossiter, J (2004). Model Based Predictive Control. A Practical Approach. CRC Press.
- [12] Ubilla, K, Jiménez-Estévez, G, Hernández, Reyes-Chamorro, L, Hernández Irigoyen, C, Severino, B and Palma-Behnke, R. (2014) Smart Microgrids as a Solution for Rural Electrification: Ensuring Long-Term Sustainability Through Cadastre and Business Models. IEEE Transactions on Sustainable Energy, vol. 5, no. 4, pp. 1310-1318,
- [13] Wylie, B, Streeter, V. (1978) Fluid Transients. McGraw-Hill.
- [14] Osama, S. (2017). Pump types. (Obtenido de Research Gate). [https://www.researchgate.net/publication/318672582\\_Pump\\_types](https://www.researchgate.net/publication/318672582_Pump_types)

- [15] Arasmith, S (2009). Conservation. Capítulo 6: Introduction to Pumping Systems. Introduction to Small Water Systems. – Arasmith Consulting Resources Inc y Albany, Oregon in cooperation with the Alaska Department of Environmental.
- [16] Engineering ToolBox, (2003). Pump Affinity Laws. [online] Available at: [https://www.engineeringtoolbox.com/affinity-laws-d\\_408.html](https://www.engineeringtoolbox.com/affinity-laws-d_408.html) [revisado 26/06/2018]
- [17] Girdhar, P, Moniz, O, Mackay, S, (2005). Practical Centrifugal Pumps, editorial Newnes. pp89-120.
- [18] - Jaime C, Roa S, Maradey J. Modeling and Optimal Control of a Variable-Speed Centrifugal Pump With a Pipeline. ASME. ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Volume 4A: Dynamics, Vibration, and Control ():V04AT05A024. doi:10.1115/IMECE2016-67992.
- [19] Camacho, E, Bordons, C. (2007) Model Predictive Control. Springer London
- [20] Arafet P, Chang F y Dominguez H. (2018). Métodos de Identificación dinámica.
- [21] Vargas C, (2016). Propuesta metodológica sobre la selección de comunidades rurales aisladas, ara la inserción de un proyecto de micro-red, utilizando criterios socioambientales.
- [22] Caquilpan V, (2015). Estimación de la demanda eléctrica y potencial energético de recursos renovables para el diseño de micro-red en comunidades rurales.
- [23] Eiben, A.E., Smith, James E, (2003) Introduction to Evolutionary Computing. Springer.
- [24] Back, T, Fogel, D, and Michalewicz, Z. (1997) Handbook of Evolutionary Computation. IOP Publishing Ltd. Bristol, UK.
- [25] Dorf, R, Bishop R. (2005) Sistemas de control moderno, décima edición. Madrid, España, Editorial Pearson Educación, S.A.