



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

CONTROL SECUNDARIO DISTRIBUIDO CON DESPACHO ECONÓMICO ELÉCTRICO-HÍDRICO PARA MICRO-REDES AGUA-ENERGÍA

TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE MAGÍSTER EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA,
MENCION ELÉCTRICA.

MEMORIA PARA OPTAR AL TITULO DE INGENIERO CIVIL ELÉCTRICO.

MATIAS ANDRE ALEGRÍA SOTO

PROFESORA GUÍA:

Doris Sáez Hueichapan.

PROFESORES CO-GUÍAS:

Constanza Ahumada Sanhueza.

Alex Navas Fonseca.

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:

Rodrigo Moreno Palma.

Enrique Espina González.

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por: ANID/FONDECYT 1220507,
ANID PIA AFB230002 Instituto Sistemas Complejos de Ingeniería (ISCI),
ANID/Vinculación Internacional/FOVI230056, ANID/FONDECYT de Iniciación 11240510,
ANID/FONDECYT de Iniciación 11200866, ANID/Basal FB0008 (AC3E)

SANTIAGO DE CHILE

2024

RESUMEN DE LA TESIS PARA OPTAR
AL GRADO DE MAGÍSTER EN CIENCIAS
DE LA INGENIERÍA, MENCIÓN ELÉCTRICA
Y MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL ELÉCTRICO
POR: MATIAS ANDRE ALEGRÍA SOTO
FECHA: 2024
PROF. GUÍA: DORIS SÁEZ HUEICHAPAN

CONTROL SECUNDARIO DISTRIBUIDO CON DESPACHO ECONÓMICO ELÉCTRICO-HÍDRICO PARA MICRO-REDES AGUA-ENERGÍA

La escala de tiempo necesaria para resolver el despacho económico óptimo de una micro-red agua-energía es de varios minutos. Esto impide que el sistema de control reaccione rápidamente ante las variaciones de generación de las fuentes renovables y otros fenómenos de la red, lo que genera instancias de tiempo donde las acciones de control no son óptimas.

Por lo anterior, se propone elaborar un controlador distribuido cooperativo que utilice la información local y la información de unidades vecinas comunicadas para poder llevar a cabo el despacho económico eléctrico-hídrico en la escala de tiempo del control secundario de una micro-red, que ronda los segundos, con el objetivo de desarrollar un controlador robusto, flexible y capaz de poder afrontar con rapidez los cambios en la red.

Para ello se define un problema de optimización centrado en los costos operacionales de la red eléctrica e hídrica, al cual se le extraen las condiciones de optimalidad, de Karush-Khun-Tacker, para emularlas mediante un esquema de control y con ello realizar el despacho económico. Los resultados obtenidos mediante simulación y emulación validan la técnica propuesta, alcanzando un control óptimo con una reducción de costos de un 7% del costo total.

Agradecimientos

Me gustaría expresar mi gratitud a mi profesora guía Doris Sáez, por creer en mí y motivarme a realizar el magíster. La realización de este trabajo no hubiera sido posible sin su guía y apoyo. De igual manera, me gustaría agradecer a mis profesores co-guías, profesora Constanza Ahumada y profesor Alex Navas, por su compromiso y buena disposición en todo momento. También me gustaría agradecer a mis colaboradores, Yeiner Arias y Luis Jiménez, por ayudarme en momentos claves del trabajo. Extiendo mis agradecimientos a los miembros del comité: profesor Rodrigo Moreno y profesor Enrique Espina por contribuir en la corrección de este trabajo.

De igual manera, me gustaría agradecer a todos mis amigos y compañeros del laboratorio de control avanzado 1 de la Universidad de Chile: Óscar P., Benjamín, Joaquín, Óscar C., Javier, Juan Pablo, Kevin, Claudio por sus recomendaciones, intercambios de ideas y apoyo durante el desarrollo de mi trabajo de tesis.

Tabla de Contenido

Abstract	I
Lista de Símbolos	VIII
1. Introducción	1
1.1. Motivación	1
1.2. Hipótesis	5
1.3. Objetivos	5
1.3.1. Objetivo general	5
1.3.2. Objetivos específicos	5
1.4. Estructura de la tesis	6
2. Control de micro-redes eléctricas	7
2.1. Control jerárquico de micro-redes eléctricas	7
2.1.1. Control primario	7
2.1.2. Control secundario distribuido	9
2.1.3. Control terciario	12
2.2. Control secundario distribuido proporcional integral (DAPI)	13
2.3. Control <i>leader-follower</i> distribuido	14
2.4. Estrategia de control distribuido con despacho óptimo y restauración de frecuencia	14
2.5. Discusión	16
3. Micro-redes agua-energía y despacho económico	18
3.1. Micro-red agua-energía	18
3.2. Sistemas de gestión de energía	20
3.3. Sistemas de gestión agua-energía	21
3.4. Control secundario distribuido con despacho económico	23
3.5. Análisis y discusión	24
4. Control secundario propuesto con despacho económico eléctrico-hídrico	26
4.1. Planteamiento del problema	27
4.2. Despacho económico eléctrico	30
4.3. Despacho económico hídrico	31
4.4. Seguimiento de demanda hídrica	35
5. Resultados mediante simulación	39
5.1. Configuración de la micro-red	39

5.2.	Diseño de escenarios de prueba para evaluar la estrategia de control	43
5.2.1.	Escenario 1 (caso base): cambios de demanda	44
5.2.2.	Escenario 2: retardo en la comunicación	47
5.2.3.	Escenario 3: falla de comunicación	49
5.2.4.	Escenario 4: plug-and-play	53
5.2.5.	Escenario 5: cambio en los costos de operación	54
5.3.	Discusión	55
6.	Resultados mediante emulación	57
6.1.	Requisitos de la red	58
6.2.	<i>Setup</i> experimental	59
6.3.	Configuración de la micro-red agua-energía	63
6.4.	Diseño de escenarios de prueba para evaluar la estrategia de control	64
6.4.1.	Escenario 1 (caso base): cambios de carga	65
6.4.2.	Escenario 2: retardo en la comunicación	68
6.4.3.	Escenario 3: falla de comunicación	69
6.4.4.	Escenario 4: <i>plug-and-play</i>	74
6.4.5.	Escenario 5: cambio en los costos de operación	76
6.5.	Discusión	77
7.	Conclusiones	78
7.1.	Trabajo futuro	79
	Bibliografía	80
	Anexos	86
A.	Diseño control primario	86
A.1.	Lazo de corriente	86
A.2.	Lazo de tensión	86
A.3.	Control droop	87
A.4.	PLL	88
B.	Otras topologías del control secundario	88
B.1.	Control secundario centralizado	88
B.2.	Control secundario descentralizado	89
C.	Diseño control secundario	89

Índice de Tablas

3.1.	Comparación del estado del arte del control de micro-redes.	25
5.1.	Parámetros de la micro-red.	41
5.2.	Potencias y pendientes de Droop.	41
5.3.	Parámetros de las bombas de agua.	41
5.4.	Parámetros del costo de generación de los inversores.	42
5.5.	Parámetros del costo de consumo de las bombas de agua.	42
5.6.	Constantes del controlador primario.	43
5.7.	Constantes del controlador secundario.	43
5.8.	Nuevos parámetros del costo de consumo de las bombas de agua	55
6.1.	Mediciones necesarias para controlar la micro-red.	58
6.2.	Salida de los controladores.	58
6.3.	Parámetros de interés del RTBox.	59
6.4.	Parámetros de interés del MicroLabBox.	62
6.5.	Parámetros del costo de generación de los inversores.	64
6.6.	Nuevos parámetros del costo de consumo de las bombas de agua.	76

Índice de Figuras

1.1.	Participación relativa según fuente de generación. Extraído de [13].	2
1.2.	Relación entre oferta y demanda de agua en Chile. Extraído de [19].	3
2.1.	Esquema del Sistema de Control Primario. Autoría propia.	8
2.2.	Curvas de <i>droop</i> de tensión y frecuencia. Adaptado de [30].	9
2.3.	Esquema del Sistema de Control Secundario. Autoría propia.	10
2.4.	Arquitectura de Control Distribuido. Autoría propia.	11
2.5.	Ejemplo de matriz de adyacencia para una red eléctrica con 4 unidades de generación. Autoría propia.	12
2.6.	Sistema de Control Jerárquico. Autoría propia.	12
3.1.	Ejemplo de micro-red agua-energía AC. Autoría propia.	19
3.2.	Ejemplo de esquema de control secundario con despacho económico.	23
4.1.	Estructura general del controlador eléctrico a diseñar.	30
4.2.	Diagrama de la propuesta de control eléctrico.	31
4.3.	Estructura general del controlador hídrico a diseñar.	32
4.4.	Ejemplo de red de comunicación, sin comunicación cruzada entre inversores y bombas de agua.	33
4.5.	Ejemplo de red de comunicación, con comunicación cruzada entre inversores y bombas de agua.	35
4.6.	Ejemplo de red de comunicación, con comunicación cruzada entre inversores y bombas de agua, y un líder.	37
4.7.	Diagrama de la propuesta de control cooperativo distribuido.	38
5.1.	Diagrama de la micro-red.	39
5.2.	Diagrama de un inversor de la red.	40
5.3.	Matriz de adyacencia del escenario base	44
5.4.	Resultados simulación, red hídrica, escenario 1	45
5.5.	Resultados simulación, relación potencia-caudal, escenario 1	46
5.6.	Resultados simulación, red eléctrica, escenario 1	46
5.7.	Retardos en la red de comunicación.	48
5.8.	Resultados simulación, escenario 2	49
5.9.	Matriz de adyacencia del escenario 3, caso 1.	50
5.10.	Matriz de adyacencia del escenario 3, caso 2.	50
5.11.	Matriz de adyacencia del escenario 3, caso 3.	50
5.12.	Matriz de adyacencia del escenario 3, caso 4.	51
5.13.	Resultados simulación, escenario 3, caso 1	51
5.14.	Resultados simulación, escenario 3, caso 2, 3 y 4	52
5.15.	Matriz de adyacencia del escenario 4.	53
5.16.	Resultados simulación, escenario 4	54
5.17.	Resultados simulación, escenario 5	55

6.1.	RTBox 1 de PLEXIM. Extraído de [74].	59
6.2.	Filtro inductivo-capacitivo de salida de un inversor.	60
6.3.	División de la planta entre dos RTBox.	61
6.4.	MicroLabBox de dSPACE. Extraído de [75].	62
6.5.	Implementación del <i>Hardware-in-the-loop</i>	63
6.6.	Micro-red agua-energía a emular.	64
6.7.	Matriz de adyacencia del escenario base.	66
6.8.	Resultados emulación, red hídrica, escenario 1	66
6.9.	Resultados emulación, relación potencia-caudal, escenario 1	67
6.10.	Resultados emulación, red eléctrica, escenario 1	67
6.11.	Resultados emulación, escenario 2	69
6.12.	Matriz de adyacencia del escenario 3, caso 1.	70
6.13.	Matriz de adyacencia del escenario 3, caso 2.	70
6.14.	Matriz de adyacencia del escenario 3, caso 3.	70
6.15.	Matriz de adyacencia del escenario 3, caso 4.	71
6.16.	Resultados emulación, escenario 3, caso 1	72
6.17.	Resultados emulación, escenario 3, caso 2, 3 y 4	73
6.18.	Matriz de adyacencia del escenario 4.	75
6.19.	Resultados emulación, escenario 4	75
6.20.	Resultados emulación, escenario 5	76
B.1.	Arquitectura de Control Centralizado. Autoría propia.	89
B.2.	Arquitectura de Control descentralizado. Autoría propia.	89

Lista de Símbolos

$x=\{a,b,c\}$	Fases de la micro-red.
N	Número de inversores en la micro-red.
M	Número de bombas de agua en la micro-red.
i_{abc}^i	Corriente trifásica del inversor i-ésimo.
i_{dq}^i	Corriente en transformada dq del inversor i-ésimo.
E_{abc}^i	Tensión trifásica del inversor i-ésimo.
E_{dq}^i	Tensión en transformada dq del inversor i-ésimo.
E_0	Tensión nominal de la micro-red.
E_i	Tensión del inversor i-ésimo.
E_i^*	Tensión de referencia para el lazo interno del inversor i-ésimo.
E_i^{max}	Tensión máxima que puede alcanzar el inversor i-ésimo.
E_i^{min}	Tensión mínima que puede alcanzar el inversor i-ésimo.
ω_0	Frecuencia nominal de la micro-red.
ω_i	Frecuencia del inversor i-ésimo.
ω_i^*	Frecuencia de referencia para el lazo interno del inversor i-ésimo.
ω_i^{max}	Frecuencia máxima que puede alcanzar el inversor i-ésimo.
ω_i^{min}	Frecuencia mínima que puede alcanzar el inversor i-ésimo.
θ_i	Angulo de referencia del inversor i-ésimo.
P_G^i	Potencia activa generada por el inversor i-ésimo.
$[P_G^i]^*$	Potencia activa de referencia del control terciario.
Q_i^G	Potencia reactiva generada por el inversor i-ésimo.
$[Q_i^G]^*$	Potencia reactiva de referencia del control terciario.
S_i^{max}	Potencia aparente máxima que puede alcanzar el inversor i-ésimo.

m_i	Pendiente de droop de frecuencia.
n_i	Pendiente de droop de tensión.
k_1	Regulador de velocidad de la restauración de frecuencia.
k_2	Regulador de velocidad de la restauración de tensión.
k_3	Regulador de velocidad del despacho económico eléctrico.
k_4	Regulador de velocidad del despacho económico hídrico.
$\Omega_i(t)$	Secundario de frecuencia.
$E_{sec}^i(t)$	Secundario de tensión.
k_{pf}, k_{if}	Constantes proporcional e integral del controlador.
k_{pE}, k_{iE}	Constantes proporcional e integral del controlador.
β_i	Constante de consensus del controlador de restauración de tensión.
$x = \{a_i, b_i, c_i\}$	Coefficientes del costo cuadrático de generación del inversor i-ésimo.
$C_G^i(t)$	Costo operacional del inversor i-ésimo.
$P_L(t)$	Demanda total de potencia eléctrica.
$\lambda_i(t)$	Costo marginal del inversor i-ésimo
$\alpha_{i,j}(t)$	Término de adyacencia entre el inversor i-ésimo y el inversor j-ésimo.
$Q_p^k(t)$	Caudal extraído por la bomba k-ésima.
$x = \{d_k, e_k, f_k\}$	Coefficientes del costo cuadrático de la bomba de agua k-ésima.
$C_p^k(t)$	Costo operacional de la bomba de agua k-ésima.
$C_o^k(t)$	Costo operacional total de la micro-red.
$Q_p^L(t)$	Demanda total de agua.
$\delta_k(t)$	Aproximadamente el costo marginal de la bomba de agua k-ésima.
$\bar{\lambda}_k(t)$	Promedio de lambdas medido por la bomba k-ésima.
$\mu_{i,j}$	Término de adyacencia entre inversores.
$\beta_{k,l}$	Término de adyacencia entre bombas de aguas.
$\eta_{k,l}$	Término de adyacencia entre bombas de aguas e inversores.
$\alpha_{k,0}$	Término de adyacencia entre bombas de aguas y el nodo líder.
$\delta_0(t)$	Estimación de costo marginal óptimo de las bombas de agua.

Capítulo 1

Introducción

1.1. Motivación

El agua y la energía son parte de la infraestructura esencial de cualquier comunidad [1]. Por ende, su preservación y garantía son parte de los desafíos de los gobiernos. Dichos desafíos se han vuelto más complicados, debido a múltiples factores tales como: la sequía que ha azotado al país desde el 2010 [2], la continua expansión de la urbanización [3], el calentamiento global [4], el cambio climático [5] y el permanente crecimiento de la población [6].

Las proyecciones de dichos factores no son favorables, debido a que *Renewable Energy Agency* proyecta, un aumento del 50% en la demanda hídrica y alimenticia, y un aumento del 100% de la demanda eléctrica [7]. Por otro lado, la plataforma de investigación MacroTrends señala que Chile tiene una tasa de crecimiento de población del 0.13% [8], que históricamente se va reduciendo. Esto no implica que la población se esté estancando, debido a que la población flotante, causada por la migración, ha ido en aumento. Según la revista “Si somos Americanos”, desde el 2002, se puede observar un aumento continuo de la población migrante en Chile, alcanzando un 7.5% del total de la población chilena en el 2020 [9]. Finalmente, *United States Environmental Protection Agency* proyecta que, de no haber cambios, habrá un aumento en la acidificación de los mares, un aumento brusco de las temperaturas y un aumento del nivel del mar, entre otros factores que afectarán tanto la infraestructura como los recursos hídricos [10].

En el caso de Chile, para solucionar los problemas eléctricos mencionados, el gobierno propuso la “Ruta energética 2018-2022” [11]. Documento en el cual se señala una serie de estrategias, tales como, la modernización de la institucionalidad energética y las regulaciones de distribución, y el aumento de plantas de generación de energía renovable, con el objetivo de que la matriz energética sea más sustentable, robusta y eficiente. Producto de estas estrategias, ha aumentado la inyección de energías renovables no convencionales (ERNNC) y sistemas de almacenamiento de energía a la red eléctrica [12]. Esta afirmación se corrobora en la Figura 1.1, donde se observa que en los últimos años ha habido una proliferación en la cantidad de energía aportada por las ERNCs a la red principal.

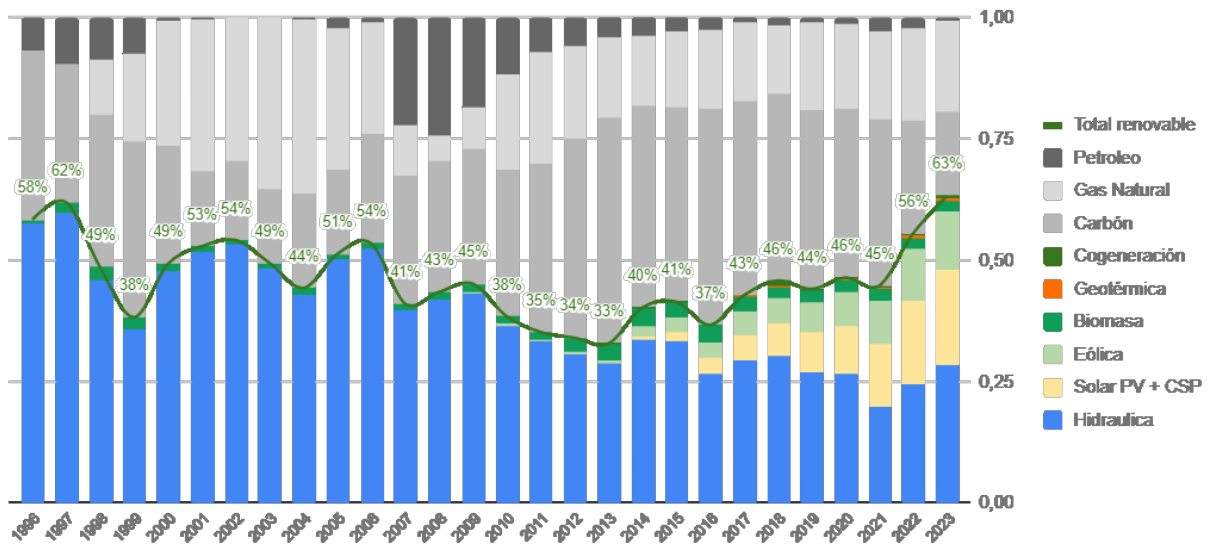


Figura 1.1: Participación relativa según fuente de generación. Extraído de [13].

De la Figura 1.1 se puede extraer que, la mayoría de las energías renovables no convencionales (ERNC) se concentran en tres tecnologías: energía solar, energía eólica y energía hidráulica, las cuales, en conjunto, superan el 50 % de la participación relativa de generación, mientras que en total, las energías renovables alcanzan un 63 % de participación relativa total. La energía eólica y solar son las preferidas en sistemas de pequeña escala por su flexibilidad y menor incidencia en el entorno.

La generación a partir de ERNCs está sujeta a diversos recursos que se caracterizan por ser estocásticos, como la radiación solar o la velocidad del viento, por ello, se requiere una mayor flexibilidad y regulación en el control de las plantas de generación renovable y los sistemas a los cuales se incorporan. Una alternativa que permite incorporar de manera sencilla las energías renovables, además de otros componentes como sistemas de almacenamiento a la red son las micro-redes eléctricas, las cuales se definen como un conjunto de fuentes de generación, cargas y sistemas de almacenamientos, interconectados entre sí mediante líneas de transmisión, protecciones y sistemas de aislación, que actúan como una sola entidad controlable [14].

La ventaja de las micro-redes eléctricas es que, mediante un esquema de control jerárquico, son capaces de regular la operación de la red y administrar la generación de energía de manera local, con tal de cumplir un objetivo de control, como la minimización de costos operacionales, minimización de consumo de potencia, minimización en la emisión de contaminantes, entre otros. Dicho esquema jerárquico requiere ser diseñado, para poder operar la red de manera eficiente acorde a los objetivos de control impuestos, por ello se plantea el diseñar un controlador jerárquico como uno de los desafíos de este trabajo.

Tradicionalmente, su implementación se ha realizado mediante una topología de control centralizada, es decir, se controla toda la micro-red mediante un solo controlador central

encargado de calcular todas las acciones de control de la red [15]. Las mayores complicaciones de esta topología son que requieren una extensa red de comunicación bidireccional, que comunique todos los agentes de la red con el controlador, hecho que puede ser costoso o complejo acorde a la geografía del emplazamiento, como también una alta capacidad de procesamiento de señales y alta capacidad computacional. Por lo tanto, se propone como desafío de este trabajo implementar topologías de control alternativas al control centralizado.

Por otro lado, para solucionar los problemas hídricos mencionados, el gobierno propuso la “Estrategia nacional de recursos hídricos 2012-2025” la cual, dentro de sus principales tópicos, contempla **realizar una gestión eficiente y sustentable del agua**, explotando los recursos hídricos disponibles y protegiendo la calidad de estos, y **enfrentar la escasez**, mediante la implementación de medidas a largo plazo, como son la construcción de embalses, acuíferos artificiales o desalinizadoras [16].

El problema de dicha medida es que no contemplaba la prolongada sequía que afecta a Chile en los últimos 13 años [16–18]. Por ello han aparecido áreas con escasez extrema de agua, zonas de sacrificio y medidas de racionamiento de agua a lo largo de Chile. El gobierno estima que la cantidad de agua disponible ha disminuido entre un 10 % y un 37 % en los últimos 30 años y puede disminuir otro 50 % en la zona norte y centro de Chile para el 2060 [18]. Producto de ello, la escasez de agua en la zona centro-norte del país ha aumentado y la cantidad de agua demandada se ha vuelto superior al agua disponible, como señala la Figura 1.2.

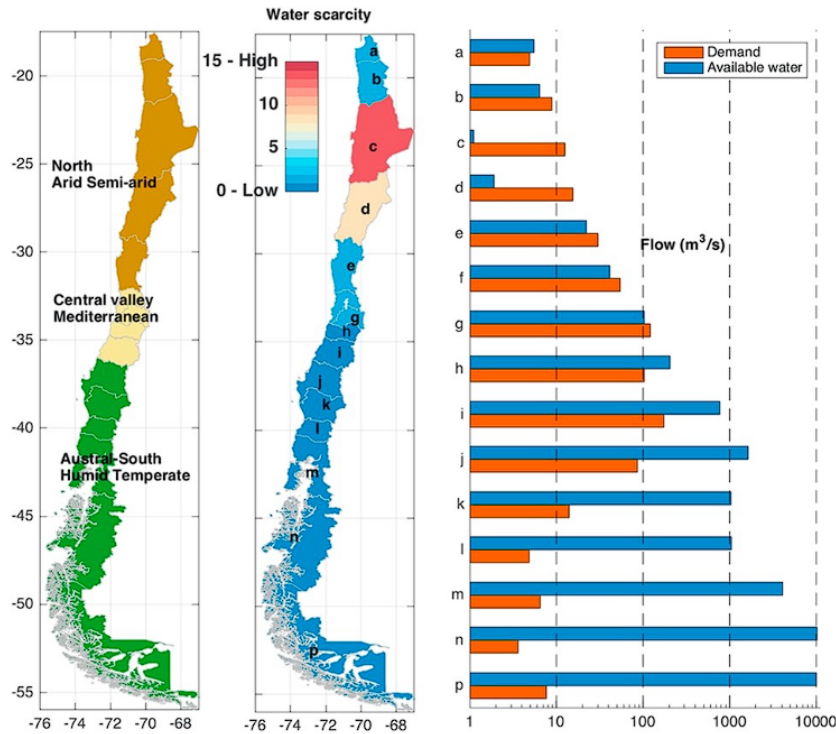


Figura 1.2: Relación entre oferta y demanda de agua en Chile. Extraído de [19].

Adicionalmente, se puede observar en la Figura 1.2 que el recurso hídrico se reparte de manera dispar a lo largo de Chile, siendo escaso en la zona norte del país y abundante en la

zona sur del mismo. Producto de ello se han sugerido proyectos como la carretera hídrica [20] que consistía en la elaboración de canales artificiales cuyo objetivo era trasladar el exceso hídrico de la zona sur del país a la zona norte.

Con base en la información anteriormente presentada, se puede señalar que, a pesar de que hay estrategias y planes de acción para salvaguardar el recurso hídrico, las medidas implementadas no son suficientes para garantizar la seguridad y calidad del recurso hídrico. Por lo tanto, se plantea como desafío el incorporar al esquema de control la gestión óptima del recurso hídrico, con tal de resguardar y utilizar de manera costo-eficiente el agua.

Todo lo presentado anteriormente se ve agravado en las áreas rurales, debido a que las comunidades que los integran suelen tener acceso parcial o limitado a la red eléctrica [21] y a una alta demanda hídrica, centrada en la agricultura, utilizando un 73% del recurso hídrico disponible [22]. Por ello, se propone como desafío co-gestionar el agua y la energía de micro-redes agua-energía aisladas.

Para satisfacer los desafíos mencionados anteriormente, se requiere buscar nuevas estrategias de control enfocadas en la coordinación, operación y eficiencia de las redes eléctricas e hídricas. Los desafíos que se abordarán en la tesis se listan a continuación.

1. Debido a que Chile presenta una extensa geografía, es complejo garantizar el acceso a servicios de electricidad y agua potable de calidad a localidades aisladas, por ello, en la literatura se ha propuesto como solución implementar micro-redes agua-energía aisladas, con tal de obtener un servicio más estable. Ante esta realidad, se propone que el esquema de control diseñado sea capaz de operar de manera eficiente micro-redes agua-energía que operen en modo isla.
2. La topología de una micro-red es diversa, por la variedad de configuraciones del sistema de potencia o las topologías de comunicación. Por ello, se requiere elaborar una estrategia de control genérica capaz de controlar el sistema, sin importar su arquitectura y topología.
3. Como se mencionó con anterioridad, la topología de control centralizada tiene varios aspectos no favorables, como son las restricciones de procesamiento de información, las restricciones de *hardware* y el *single point of failure*, por lo que se requiere desarrollar sistemas de control flexibles, confiables y distribuidos [23].
4. Para desconectar y reconectar unidades a la micro-red de manera sencilla y sin cambios en el esquema de control, es necesario contar con tecnología *plug-and-play*, la cual es útil en el reemplazo y actualización de componentes. Debido a que el *plug-and-play* afecta la topología de la red [24] y los esquemas de control, es importante estudiar su efecto en diseño del controlador.
5. Tradicionalmente, el control de las micro-redes eléctricas e hídricas se ha realizado de manera independiente, debido a la complejidad de ambos sistemas [25], dejando de lado la interconexión existente entre ambos sistemas, por ello, se plantea diseñar un controlador capaz de co-optimizar el costo operacional de ambos sistemas de la red, considerando la interdependencia existente entre ambos sistemas.

1.2. Hipótesis

Las hipótesis asociadas a esta tesis se listan a continuación:

- La cogestión de los recursos eléctricos e hídricos de una micro-red agua-energía puede llevarse a cabo mediante un esquema de control cooperativo distribuido, basado en información local e información compartida, que opera en el nivel secundario de control.
- Es posible resolver el despacho económico, eléctrico e hídrico en la misma escala de tiempo que la restauración de frecuencia y tensión, es decir, en el control secundario de micro-redes agua-energía.
- Se puede minimizar el costo de operación de la micro-red agua-energía al gestionar el recurso hídrico simultáneamente con la gestión de la potencia de la red eléctrica.
- Se puede diseñar un controlador secundario distribuido capaz de restaurar la frecuencia y tensión de la red, y de co-gestionar los recursos eléctricos e hídricos de la red, con tal de generar una disminución en los costos operacionales de la red.
- Se puede implementar y validar la propuesta de control mediante simulación y emulación, a través de *Hardware-in-the-Loop*, utilizando una micro-red agua-energía genérica.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

El objetivo general de la tesis es diseñar, implementar y evaluar un sistema de control secundario distribuido que pueda realizar la restauración de tensión y frecuencia del sistema eléctrico, además del despacho económico de la potencia activa y la gestión del agua, que abarca el despacho económico hídrico y el seguimiento de demanda, para garantizar el funcionamiento eficiente y estable de micro-redes agua-energía aisladas.

1.3.2. Objetivos específicos

1. Diseñar, implementar y validar una estrategia de control secundario distribuido, para micro-redes agua-energía, capaz de realizar el despacho económico de potencia activa y gestión de agua, junto con restaurar la frecuencia y la tensión simultáneamente.
2. Comparar la estrategia de control propuesta con un caso base que solo considere despacho económico eléctrico con tal de estudiar el efecto del despacho económico hídrico en la operación del sistema.
3. Evaluar la eficiencia del esquema de control propuesto ante escenarios de interés, que analicen el efecto de los retardos de comunicación, las fallas de comunicación, desconexión y conexión de unidades de generación (DG), conexión y desconexión de bombas de agua, variación en los costos de operación y demanda de agua variable.
4. Validar la estrategia de control propuesta mediante la simulación y emulación en *Hardware-in-the-Loop* (HIL) de una micro-red agua-energía, compuesta por múltiples unidades de generación distribuidas (DG) y bombas de agua distribuidas.

1.4. Estructura de la tesis

El trabajo de tesis se encuentra dividido en 6 capítulos:

Capítulo 2: Se presenta todos los esquemas de control a utilizar a lo largo del trabajo, tales como, el control jerárquico de micro-redes eléctricas, el esquema de control distribuido, el control DAPI y el esquema de control *leader-follower*. Además, se presenta el trabajo investigativo de [26], con tal de exponer las estrategias, bases de control que sustentan el trabajo realizado.

Capítulo 3: Se estudia el estado del arte, primero se presenta el concepto de micro-red agua-energía que representa la planta objetivo de estudio. Posteriormente, se revisan el estado del arte respectivo a los sistemas de gestión de energía y sistemas de gestión agua-energía, para definir el trabajo de investigación.

Capítulo 4: Se plantea la propuesta de control secundario distribuido para micro-redes agua-energía, capaz de realizar simultáneamente la restauración de la frecuencia y tensión del sistema eléctrico, el despacho económico de la potencia activa del sistema eléctrico y el despacho económico del caudal del sistema hídrico.

Capítulo 5: Se presentan los resultados obtenidos de simular la aplicación del controlador a una micro-red agua-energía, bajo 5 escenarios de estudio distintos. Posteriormente, se analizan los resultados obtenidos y se discute la validez de la estrategia propuesta.

Capítulo 6: Se vuelve a estudiar la efectividad del controlador, esta vez mediante *HIL*, por ello, primero se extraen los requisitos de la emulación, para luego diseñar el *setup* experimental y con el reiterar los 5 escenarios de estudio.

Capítulo 7: Se presentan las conclusiones del trabajo realizado y el trabajo a futuro que nace del mismo.

Capítulo 2

Control de micro-redes eléctricas

Este capítulo presenta de manera general los conceptos relevantes para entender el trabajo desarrollado. Primero, se estudian los esquemas de control de una micro-red eléctrica, con tal de establecer la base de control de la red eléctrica. Luego, se define la estrategia de control proporcional-integral de media distribuida (DAPI), utilizada para configurar la topología de control de la red en una topología distribuida. Posteriormente, se define el método de control *leader-follower* distribuido utilizado en la propuesta de control. Finalmente, se detalla el trabajo realizado en [26], con tal de dar un entendimiento general del desarrollo, puesto que su procedimiento se utilizará como base para formular posteriormente la propuesta de control.

2.1. Control jerárquico de micro-redes eléctricas

La preocupación más grande de la red eléctrica recae en alcanzar la estabilidad global de frecuencia y voltaje, mientras satisface la demanda energética [27]. Para ello, la micro-red debe suplir una serie de requisitos [28]:

- Regular el voltaje y la frecuencia del sistema.
- Repartir la carga entre unidades de generación y coordinación de DGs.
- Sincronizar la micro-red con la red principal.
- Controlar el flujo de potencia entre la micro-red y la red principal.
- Optimizar el costo de operación de la micro-red.

La resolución de cada uno de estos requisitos conlleva distintas escalas de tiempo, lo que origina un control jerárquico, el cual se encuentra compuesto por un control primario, un control secundario y un control terciario. A continuación, se definirán cada uno de los controladores mencionados.

2.1.1. Control primario

El control primario se encuentra implementado de manera local en cada una de las unidades de generación distribuidas [29] y está constituido por dos lazos de control: el lazo interno encargado de regular la tensión y corriente del inversor y el control *droop* encargado de emular el comportamiento de una máquina síncrona en la red [26] y con ello controlar el

comportamiento de los inversores ante variaciones de carga. El esquema que integra ambos lazos de control en la micro-red agua-energía se observa en la Figura 2.1.

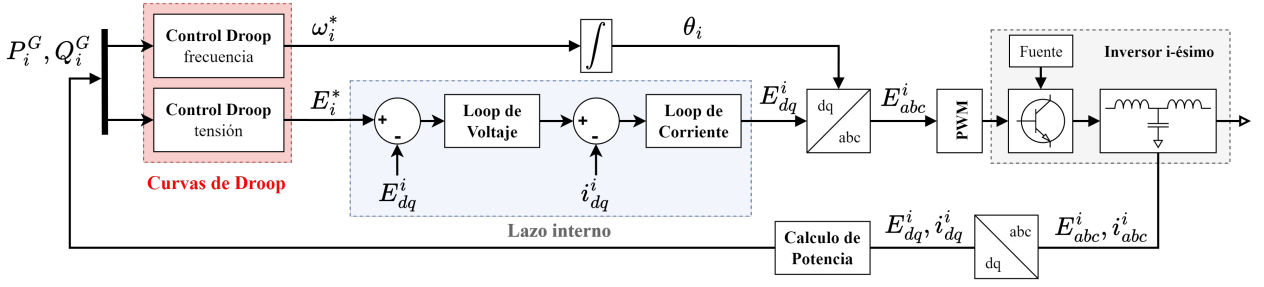


Figura 2.1: Esquema del Sistema de Control Primario. Autoría propia.

Como se observa en la Figura 2.1, el funcionamiento conjunto de ambos lazos de control comienza por el control *droop*, el cual proporciona tensiones y frecuencias de referencia al lazo interno, acorde a las pendientes de *droop* del controlador y a la potencia activa y reactiva de la unidad de generación. Posteriormente, el lazo interno hace el seguimiento de referencia mediante un lazo anidado de tensión y corriente, regulando la unidad de generación *i*-ésima [26, 29].

Las plantas del lazo interno y sus controladores, se discuten en profundidad en el anexo A, mientras que el esquema del control *droop* se define por las ecuaciones de *droop*, que se presentan en las ecuaciones (2.1) y (2.2).

$$\omega_i^*(t) = \omega_0 - m_i \cdot P_G^i(t) \quad (2.1)$$

$$E_i^*(t) = E_0 - n_i \cdot Q_i^G(t) \quad (2.2)$$

Las variables ω_i^* y E_i^* son la referencia de frecuencia y tensión que entrega el control *droop* al lazo interno de la unidad *i*-ésima. ω_0 y E_0 son la frecuencia y voltaje nominal del sistema. P_i y Q_i son las potencias activa y reactiva generadas por el inversor *i*-ésimo [27]. Finalmente, las variables m_i y n_i representan las pendientes de *droop*, que se encargan de reflejar el efecto de variar la potencia activa y reactiva sobre la frecuencia y la tensión de la unidad *i*-ésima respectivamente. Visualmente, el efecto de las pendientes sobre las referencias se observa en la Figura 2.2.

Dado que los inversores tienen limitaciones físicas de potencia, corriente, etc., pueden escribirse las pendientes de *droop* en función de estas. Utilizando la Figura 2.2 como referencia, se definen las pendientes m_i y n_i en las ecuaciones (2.3) y (2.4) respectivamente.

$$m_i = \frac{\omega_i^{max} - \omega_i^{min}}{S_i^{max}} \quad (2.3)$$

$$n_i = \frac{E_i^{max} - E_i^{min}}{S_i^{max}} \quad (2.4)$$

Las variables ω_i^{max} y ω_i^{min} son las frecuencias máximas y mínimas del inversor *i*-ésimo, así

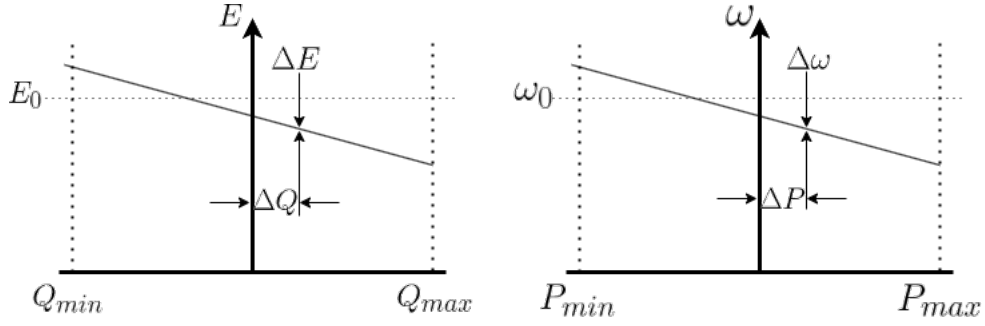


Figura 2.2: Curvas de *droop* de tensión y frecuencia. Adaptado de [30].

como E_i^{max} y E_i^{min} son las tensiones máximas y mínimas del mismo. Por otro lado, S_i^{max} es la potencia total máxima del inversor i -ésimo.

Debido a que el control *droop* emula una máquina síncrona y que las pendientes de *droop* que utiliza son acorde a la capacidad máxima de generación de la unidad, el controlador distribuye la carga del sistema de manera proporcional entre unidades [26, 28].

2.1.2. Control secundario distribuido

El controlador secundario distribuido es uno de los principales soportes de la operación de la micro-red. Su objetivo primordial se centra en garantizar la controlabilidad global de la micro-red, mediante la restauración de la frecuencia y la tensión provocadas por el control *droop* ante una variación de potencia [26]. Su incidencia en el sistema de control se observa en la adición de variables a las ecuaciones de *droop* del control primario [26]; por ello, a continuación, se presenta las ecuaciones de *droop* modificadas y sus controladores secundarios centralizados respectivos.

A la curva de *droop* de frecuencia (2.1), se le añade la variable $\Omega_i(t)$, que corresponde al controlador secundario encargado de desplazar la curva y restaurar el valor nominal de frecuencia. La curva de *droop* modificada y el control secundario asociado se presentan en las ecuaciones (2.5) y (2.6) respectivamente.

$$\omega_i^*(t) = \omega_0 - m_i \cdot P_G^i(t) + \Omega_i(t) \quad (2.5)$$

$$k_1 \Omega_i(t) = k_{pf}(\omega_0 - \omega_i(t)) + k_{if} \int (\omega_0 - \omega_i(t)) dt \quad (2.6)$$

El término $\Omega_i(t)$ es un controlador proporcional-integral (PI), de constantes $k_{p,f}$ y $k_{i,f}$, que actúa sobre la diferencia existente entre la frecuencia del inversor y la frecuencia nominal, mientras que la constante k_1 regula la velocidad de $\Omega_i(t)$.

Por otro lado, a la curva de *droop* de tensión se le añade el término $E_{sec}^i(t)$, que corresponde al controlador secundario encargado de desplazar la curva y restaurar el valor nominal de tensión. La curva de *droop* de tensión y el controlador secundario asociado se presentan en las ecuaciones (2.7) y (2.8) respectivamente.

$$E_i^*(t) = E_0 - n_i \cdot Q_i(t) + E_{sec}^i(t) \quad (2.7)$$

$$k_2 E_{sec}^i(t) = k_{pE}(E_0 - E_i(t)) + k_{iE} \int (E_0 - E_i(t)) dt \quad (2.8)$$

El término $E_{s,i}(t)$ es un controlador PI, de constantes k_{pE} y k_{iE} , que actúa sobre la diferencia existente entre la tensión del inversor y la tensión nominal, mientras que la constante k_2 regula la velocidad de $E_{s,i}(t)$. La incorporación del control secundario al esquema de control primario se observa en la Figura 2.3.

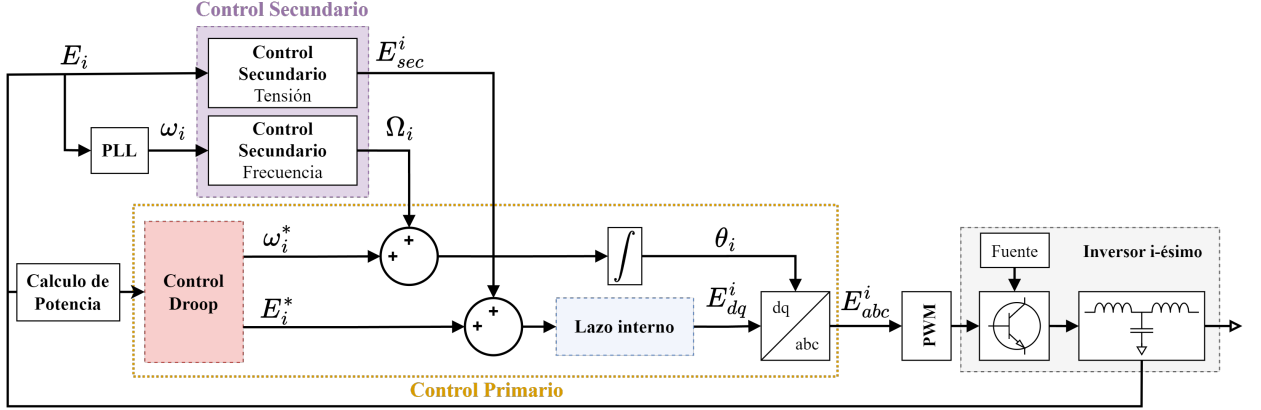


Figura 2.3: Esquema del Sistema de Control Secundario. Autoría propia.

Debido a limitaciones geográficas o de procesamiento de datos por parte del controlador, la implementación del control secundario puede llevarse a cabo de tres maneras: centralizado, distribuido y descentralizado, siendo la arquitectura distribuida la alternativa de control utilizada en este trabajo. A continuación se definirá el control secundario distribuido, mientras que la arquitectura centralizada y descentralizada se definen en la sección B del anexo.

El control secundario distribuido implementa tantos controladores locales como unidades de generación haya, con tal de que las acciones de control se calculen de manera local, utilizando mediciones locales y la red de comunicación para obtener información de unidades vecinas. El esquema que representa el control secundario distribuido se visualiza en la Figura 2.4.

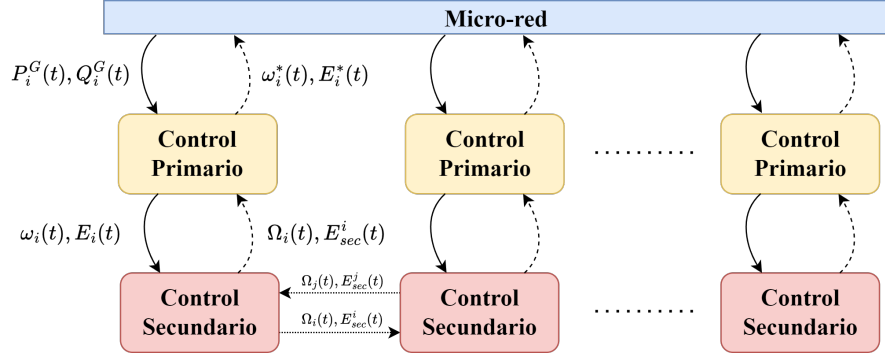


Figura 2.4: Arquitectura de Control Distribuido. Autoría propia.

Dado que el control secundario distribuido tiene varios controladores interconectados, operando en paralelo, se requiere aumentar el número de líneas de comunicación, que a su vez trae consigo problemas como latencia o pérdida de datos, que pueden afectar el funcionamiento de los controladores y por ende de la micro-red. Esto se compensa con un aumento en la resiliencia de la red, debido a que el controlador es capaz de soportar fallas de comunicación, que normalmente harían fallar al control centralizado [26, 31]. Otra ventaja del control secundario distribuido, es que permite la tecnología *plug-and-play*, es decir, la conexión y desconexión de unidades de generación [26].

Para alcanzar los objetivos globales del sistema, se requiere una alta tasa de intercambio de información entre unidades [26, 31] y para ello se implementa una estructura de comunicaciones variable, cuya visualización se realiza mediante una **matriz de adyacencia**.

La matriz de adyacencia corresponde a una matriz ponderada de dimensión $N \times N$, con N el número de unidades en el sistema, que representa la conectividad gráfica entre los componentes de la red. Los componentes $a_{i,j}$ de la matriz se denominan término de adyacencia [32] y representan la comunicación del nodo i con el nodo j , acorde a como se muestra en (2.9).

$$a_{i,j}(t) = \begin{cases} 1 & \text{si llega la información de la unidad } j \text{ a la unidad } i, \text{ al instante } t \\ 0 & \text{si no llega la información de la unidad } j \text{ a la unidad } i, \text{ al instante } t \\ 0 & \text{si } i = j \end{cases} \quad (2.9)$$

A modo de ejemplo, se representa gráficamente en la Figura 2.5, la matriz de adyacencia para una micro-red compuesta por 4 unidades de generación.

Dentro de las ventajas de la matriz de adyacencia se destaca su utilidad para analizar la topología de comunicación [26] y el poder explorar las propiedades de las micro-redes, para realizar análisis de estabilidad del sistema [26, 31, 33], mediante el estudio de la respuesta del sistema a variaciones en el traspaso de información entre unidades.

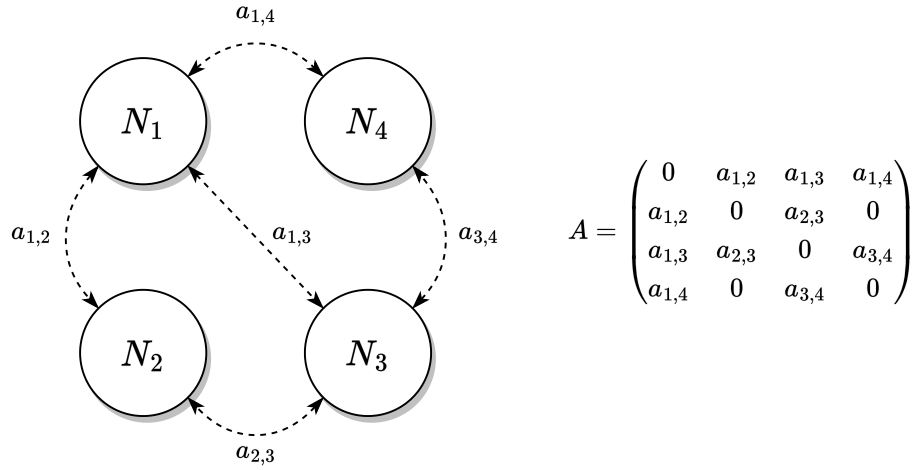


Figura 2.5: Ejemplo de matriz de adyacencia para una red eléctrica con 4 unidades de generación. Autoría propia.

2.1.3. Control terciario

El control terciario se encarga de la gestión de la energía de la red, es decir, del despacho económico y la coordinación con la red eléctrica principal, cuando la micro-red opera en modo *on-grid*. El despacho económico se basa en la resolución de un problema de optimización cuyo objetivo es la minimización de los costes de operación sujetos a las restricciones del sistema. Producto de la resolución del problema de optimización, el control terciario realiza una coordinación de servicios [28, 29].

El efecto que tiene el control terciario sobre las curvas de *droop* se observa en un cambio de la potencia activa y reactiva de referencia a la cual debe operar cada unidad de generación distribuida [34]. La integración del control terciario al sistema se observa en la Figura 2.6.

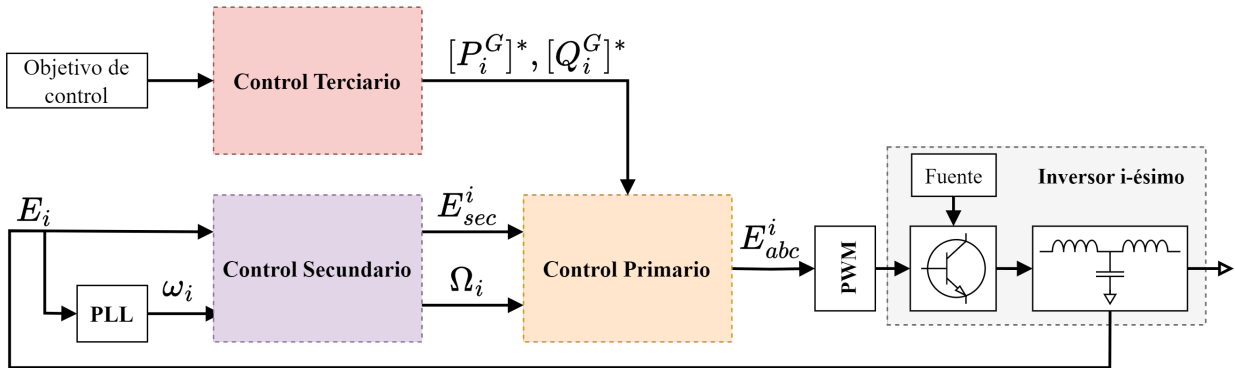


Figura 2.6: Sistema de Control Jerárquico. Autoría propia.

Una de las ventajas del control terciario es que es capaz de mejorar el intercambio de información con el operador del sistema de distribución para optimizar el funcionamiento de ambos [29, 35]. Cabe enfatizar que el controlador terciario se presenta para explicar por completo el control jerárquico de micro-redes, pero que no se abordará posteriormente, debido a que el trabajo se enfoca en micro-redes aisladas.

2.2. Control secundario distribuido proporcional integral (DAPI)

El control DAPI, propuesto por [36], busca descentralizar el cálculo de las acciones de control del control secundario mediante la implementación una red distribuida de controladores, interconectados por una red de comunicación, la cual les permite intercambiar información con las unidades vecinas y con ello alcanzar de manera global y efectiva la regulación de frecuencia, el compartir la generación de potencia activa, el regular la tensión y el compartir la generación de potencia reactiva [26, 33, 36–38]. En particular, las ventajas del control DAPI, son:

- Eliminación de la dependencia de un control central supervisor.
- Fácil integración de nuevas unidades de generación mediante enlaces de comunicación de bajo ancho de banda a unidades de generación existentes.
- El controlador DAPI no requiere un modelo, esto quiere decir, que no se requiere conocer a priori la topología de la red, impedancias de línea o demandas eléctricas.
- El controlador DAPI permite aplicar tecnología *plug-and-play* a la red, hecho que resulta atractivo para micro-redes cuyos componentes requieren ser desconectados o reemplazados constantemente o que requieren sincronizarse con la red eléctrica.

La ecuación de *droop* de frecuencia modificada y el nuevo controlador secundario asociado se presentan en las ecuaciones (2.10) y (2.11).

$$\omega_i^*(t) = \omega_0 - m_i P_G^i(t) + \Omega_i(t) \quad (2.10)$$

$$k_1 \dot{\Omega}_i(t) = (\omega_0 - \omega_i) + \sum_{j \neq i}^n \mu_{i,j}(t) \left(\frac{P_G^i}{S_{max}^i} - \frac{P_j^G}{S_j^{max}} \right) \quad (2.11)$$

De la ecuación (2.11), se tiene que la constante k_1 regula la velocidad del controlador secundario de frecuencia, mientras que $S_{max,i}$ corresponde a la potencia máxima aparente que puede generar el inversor i -ésimo. Por otro lado, la ecuación de *droop* de tensión modificada y el nuevo controlador secundario asociado se presentan en las ecuaciones (2.12) y (2.13) respectivamente.

$$E_i^*(t) = E_0 - n_i Q_i(t) + E_{sec}^i(t) \quad (2.12)$$

$$k_2 \dot{E}_{sec}^i(t) = \beta_i (E_0 - E_i) + \sum_{j \neq i}^n \mu_{i,j}(t) \left(\frac{Q_i^G}{S_{max}^i} - \frac{Q_j^G}{S_j^{max}} \right) \quad (2.13)$$

La constante k_2 regula la velocidad del controlador secundario de tensión, mientras que β_i es el peso que regula si la unidad i -ésima debe seguir la referencia de tensión o el igualar la cantidad de potencia reactiva que están entregando las demás unidades de generación, y $S_{max,i}$

corresponde a la potencia máxima aparente que puede generar el inversor i -ésimo. Finalmente, el término $\mu_{i,j}(t)$ de la ecuación (2.11) y (2.13) corresponde al término de adyacencia del segmento de la matriz de adyacencia que detalla la comunicación entre inversores.

2.3. Control *leader-follower* distribuido

El control *leader-follower* distribuido opera sobre un enjambre de agentes distribuidos, los cuales se pueden dividir en N seguidores y un líder. La dinámica del líder queda descrito por el sistema de la ecuación (2.14) [39].

$$\dot{x}_0(t) = A_L x_0(t) + B_L u_0(t) \quad (2.14)$$

Donde $u_0(t)$ es la acción de control del líder, acotada arbitrariamente con respecto al tiempo. Su objetivo de control puede variar acorde a los requerimientos del problema. $x_0(t)$ corresponde al estado del líder que deben seguir los seguidores y, A_L y B_L son las matrices de planta y de entrada, respectivamente. La numeración de los agentes del enjambre son numerados del 1 al N , mientras que el índice del líder será 0. Posteriormente, se presenta la dinámica de los seguidores [40] en la ecuación (2.15).

$$\dot{x}_i(t) = A_s x_i(t) + B_s u_i(t) \quad (2.15)$$

Donde $x_i(t) \in R_n$ es el estado del nodo i , $u_i(t) \in R_m$ es la acción de control del nodo i . A_s y B_s son las matrices de planta y de entrada, respectivamente. Posteriormente, se define la dinámica de $u_i(t)$, acorde con la ley de control de seguimiento dinámico basada en un observador distribuido [41]. Su planteamiento matemático se presenta en (2.16).

$$u_i(t) = a_0 - \gamma_k \sum_{j \in N} a_{i,j} (x_i - x_j) + \phi_i (x_i - x_0) \quad (2.16)$$

Con a_0 el valor inicial de $u_i(t)$, $a_{i,j}$ el término de la matriz de adyacencia que indica si existe comunicación entre el agente i y el agente j y ϕ_i el término de la matriz de adyacencia que indica si existe conexión entre el seguidor y el líder. En caso de no existir comunicación directa entre el seguidor y el líder, se le denomina al agente "nodo independiente".

La mayor diferencia entre el *leader-follower* tradicional y su alternativa distribuida es que la versión distribuida admite cambios en la topología de la red [41, 42], en forma de cambios en los enlaces de comunicación y la presencia de comunicación bidireccional entre componentes.

2.4. Estrategia de control distribuido con despacho óptimo y restauración de frecuencia

Como bien se mencionó anteriormente, el desarrollo del despacho económico, eléctrico e hídrico a realizar se basa en el trabajo de [26], por ello, en esta sección, se presentará su desarrollo, para posteriormente, en el siguiente capítulo, añadir los términos correspondientes al sistema hídrico, con el fin de adecuar el desarrollo realizado al problema a resolver.

En [26], inicialmente se le otorga un costo de operación cuadrático a los inversores de una micro-red, asociado a la potencia activa que estos generan. La función de costo de cada inversor C_G^i se presenta en la ecuación (2.17).

$$C_G^i(P_G^i(t)) = a_i[P_G^i(t)]^2 + b_iP_G^i(t) + c_i \quad (2.17)$$

En esta función de costos, los términos a_i , b_i , c_i , son los coeficientes del costo de generación y su valor es distinto para cada inversor, mientras que $P_G^i(t)$ corresponde a la potencia generada por la unidad i -ésima en el instante t .

Con la función de costos de operación definida para cada unidad, se define la función objetivo a optimizar, que corresponde a los costos operacionales del sistema, que en este caso particular corresponde a la suma de los costos operacionales de los inversores.

$$J(t) = \sum_{i=1}^n (a_i[P_G^i(t)]^2 + b_iP_G^i(t) + c_i) \quad (2.18)$$

Siendo $J(t)$ la función objetivo o el costo operacional del sistema en el instante t , mientras que n corresponde al número de inversores en el sistema. Dicha función objetivo está sujeta a la restricción del balance eléctrico.

$$\sum_{i=1}^n P_G^i(t) = P_L(t) \quad (2.19)$$

Con $P_L(t)$ la potencia eléctrica demandada en el instante t . Con el problema definido y acotado se procede a plantear el problema de optimización, para un sistema de n inversores.

$$\begin{aligned} \min \quad & J_1(t) = \sum_{i=1}^n a_i[P_G^i(t)]^2 + b_iP_G^i(t) + c_i \\ \text{s.a.} \quad & P_L(t) - \sum_{i=1}^n P_G^i(t) = 0 \end{aligned}$$

Aplicando Lagrange se tiene la ecuación (2.20).

$$L(t) = \sum_{i=1}^n [a_i[P_G^i(t)]^2 + b_iP_G^i(t) + c_i] + \lambda \left[P_L(t) - \sum_{i=1}^n P_G^i(t) \right] \quad (2.20)$$

Con $L(t)$ la ecuación de Lagrange en el instante t y λ el multiplicador de Lagrange asociado a la restricción del balance eléctrico. Imponiendo las condiciones de Karush-Khun-Tacker (KKT), se obtienen las siguientes igualdades:

$$\frac{dL(t)}{dP_G^i(t)} = 2a_iP_G^i(t) + b_i - \lambda = 0 \quad (2.21a)$$

$$\frac{dL(t)}{d\lambda} = P_L(t) - \sum_{i=1}^n P_G^i(t) = 0 \quad (2.21b)$$

El multiplicador de Lagrange λ se puede despejar de (2.21a), obteniendo la ecuación (2.22).

$$\lambda = 2a_i P_G^i(t) + b_i \quad (2.22)$$

Como λ es igual a la derivada de la función de costos de los inversores, se define λ_i como el costo marginal del inversor i .

Para alcanzar el óptimo, todos los λ_i deben converger a un único λ . Para esto, se diseña un control distribuido $\rho_i(t)$, que busca complementar el control secundario de frecuencia, con tal de satisfacer la condición de KKT encontrada. La curva de *droop* de frecuencia modificada con las variables de restauración de frecuencia y despacho económico se presenta a continuación:

$$\omega_i^*(t) = \omega_0 - m_i P_G^i(t) + \Omega_i(t) + \rho_i(t) \quad \forall i \in \mathbf{N} \quad (2.23)$$

$$k_1 \dot{\Omega}_i(t) = -[\omega_i(t) - \omega_0] - \sum_{i=1, j \neq i}^n \alpha_{i,j} [\Omega_i(t) - \Omega_j(t)] \quad \forall i, j \in \mathbf{N} \quad (2.24)$$

$$k_3 \dot{\rho}_i(t) = - \sum_{i=1, j \neq i}^n \alpha_{i,j}(t) [\lambda_i(t) - \lambda_j(t)] \quad \forall i, j \in \mathbf{N} \quad (2.25)$$

$$\lambda_i(t) = 2a_i P_G^i(t) + b_i \quad \forall i \in \mathbf{N} \quad (2.26)$$

La ecuación (2.23) corresponde a la ecuación de *droop* para frecuencia modificada presentada en la sección anterior, con restauración de frecuencia $[\Omega_i(t)]$ y despacho económico eléctrico $[\rho_i(t)]$.

Por otro lado, la ecuación (2.24) presenta la acción de control encargada de la restauración de frecuencia $\Omega_i(t)$. Dicha acción de control corresponde a una acción de control integral, que busca corregir la desviación de frecuencia de la unidad i e igualar la respuesta de los inversores ante un cambio de potencia.

Finalmente, la ecuación (2.25) corresponde a la acción de control propuesta en [26] asociada al despacho económico. La cual busca igualar los costos marginales de los inversores, ajustando con ello la cantidad de potencia que debe generar cada inversor. La ecuación (2.26) define los λ_i utilizados en la ecuación (2.25).

Presentada la propuesta de control de [26], se concluye el capítulo de Control jerárquico de micro-redes. En el siguiente capítulo, se presentará el estado del arte respectivo a la gestión de micro-redes, tanto a nivel terciario como a nivel secundario.

2.5. Discusión

Esta sección presentó una revisión general del esquema de control jerárquico eléctrico tradicional utilizado en el control de micro-redes eléctricas AC, los controles correspondientes en cada nivel de control y su funcionalidad explicada. También se discuten las ventajas del control distribuido en comparación con el control centralizado. Posteriormente, se realiza una revisión a dos de los métodos de control que se utilizarán en la propuesta de control, control DAPI y control *leader-follower* distribuido. Finalmente, se presenta el trabajo de [26], cuyo

desarrollo inspira el procedimiento a ejecutar para elaborar la propuesta de esquema de control.

Inicialmente, se presentó el controlador jerárquico y los controladores que lo integran a cabalidad debido a que forma parte esencial del esquema de la micro-red eléctrica. Por otro lado, no se presentó un esquema de control para el lado hídrico de la micro-red agua energía a estudiar, debido a que no existe controlador para la red hídrica.

Posteriormente, se presentó el controlador DAPI y el controlador *leader-follower* distribuido, los cuales tienen su esquema de control distribuido, lo cual facilita la incorporación de la tecnología *Plug-and-Play*, además de poseer un menor costo computacional y una mayor resiliencia ante fallas comunicacionales. Otras ventajas de la estructura distribuida son su fácil escalabilidad y su implementación es sencilla, debido a que no se requieren medidores adicionales ni cambios en el controlador ante cambios en la topología.

Finalmente, se presentó el trabajo de [26] con el objetivo de presentar el procedimiento aplicado y extrapolarlo, posteriormente, de la red eléctrica a la red hídrica y con ello elaborar un esquema de control capaz de cumplir los objetivos de este trabajo.

Con los conceptos básicos presentados, se procede a analizar el estado del arte en el siguiente capítulo, con tal de vislumbrar puntos de interés, sobre los cuales basar el trabajo investigativo.

Capítulo 3

Micro-redes agua-energía y despacho económico

Este capítulo presenta el estado del arte respecto a micro-redes agua-energía y la gestión de sus componentes. Por ello, se presenta inicialmente una definición general de micro-red agua-energía, para posteriormente analizar diversos sistemas de gestión, cuyas propuestas se centran en el despacho económico de micro-redes agua-energía. Finalmente, se discuten dichos estudios, para justificar la propuesta de trabajo.

El capítulo se organiza de la siguiente manera: la sección 3.1 define que es una micro-red agua-energía, posteriormente, en la sección 3.2 se presentan diversos estudios enfocados en la gestión de energía de micro-redes agua-energía y la sección 3.3 presenta estudios enfocados en la gestión de agua y energía de micro-redes agua-energía. Finalmente, la sección 3.4 discute lo presentado en las secciones 3.1, 3.2 y 3.3.

3.1. Micro-red agua-energía

Tradicionalmente, la implementación y control de la red eléctrica y la red hídrica, se ha realizado de manera independiente, debido a la complejidad de ambos sistemas [25, 43–45]. Sin embargo, ambos sistemas no están desacoplados, dado que, por ejemplo, la electricidad puede usarse para extraer, distribuir y tratar agua [46]. Producto de estos vínculos surgieron, en los últimos años, extensos estudios que analizan la interdependencia de ambos sistemas.

Utilizando bombas de agua y plantas de tratamiento como el nexo entre el sistema hídrico y eléctrico, dichos estudios se enfocaron en el diseño de controladores que co-optimizan el costo de operación del sistema eléctrico e hídrico, impulsando la creación del concepto de micro-red agua-energía [43].

Según *National Renewable Energy Laboratory (NREL)* [47], las micro-redes agua-energía son sistemas en los cuales el agua juega un rol esencial en el manejo de carga, y donde la interdependencia de ambos, agua y electricidad, son co-optimizados. Dadas sus características, pueden ser una solución amplia a problemas geográficos, económicos, comunidades aisladas o faltos de infraestructura crítica confiable. Un esquema genérico de una micro-red agua-energía se presenta en la Figura 3.1

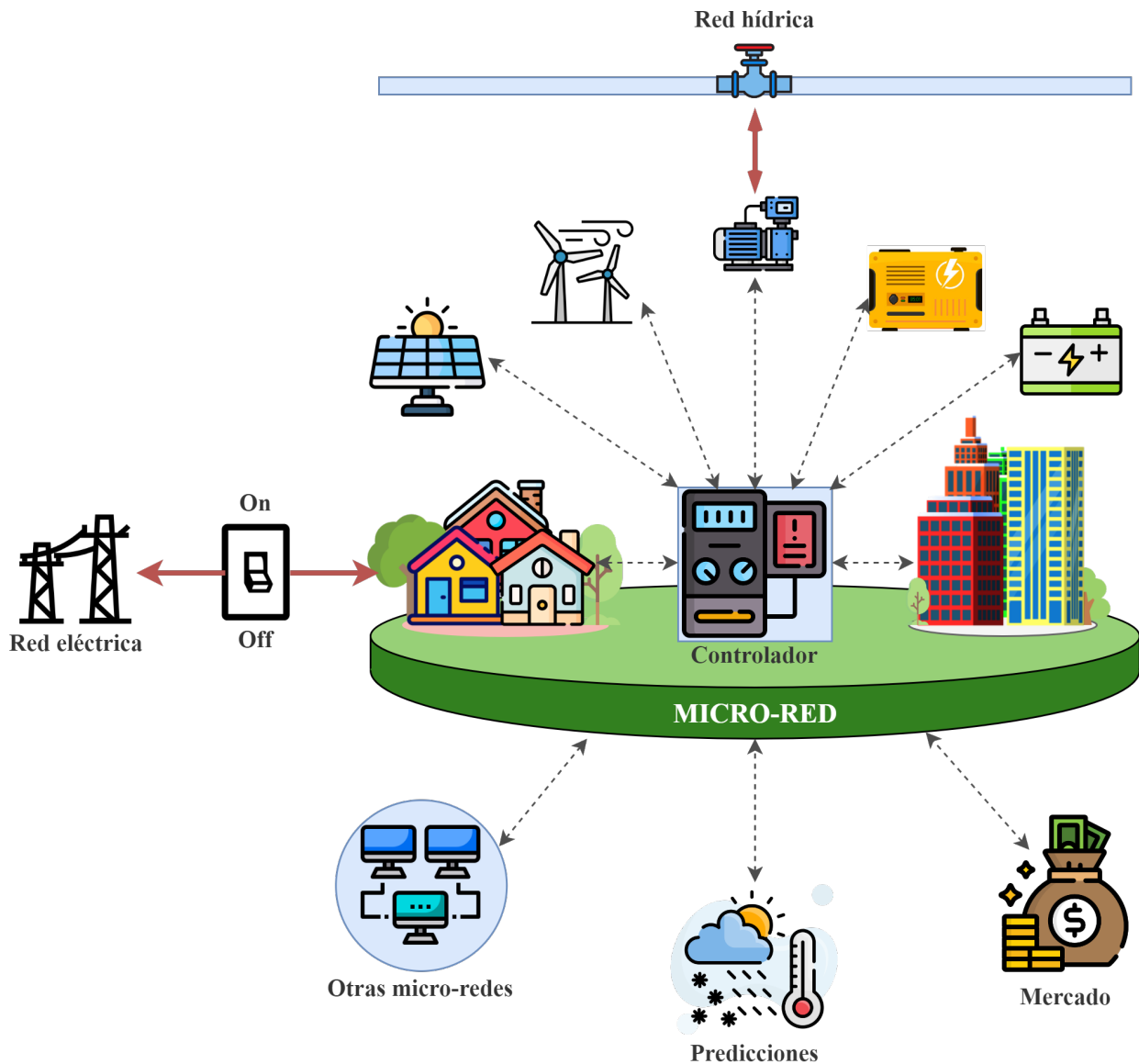


Figura 3.1: Ejemplo de micro-red agua-energía AC. Autoría propia.

Dado que una micro-red agua-energía se compone de una micro-red eléctrica y una micro-red hídrica, hereda las cualidades de ambas micro-redes, las cuales son:

1. Las micro-redes agua-energía son **locales**, es decir, la energía que genera y la cantidad de agua que extrae tienen por objetivo cubrir la demanda de consumidores cercanos a la red, a diferencia de las redes principales, que tienen sus consumidores lejos de las fuentes de generación y extracción, requiriendo implementar sistemas de transmisión extensos y por ello ineficientes [48, 49].
2. Las micro-redes agua-energía son **independientes**, es decir, la micro-red puede operar desconectada de la red principal eléctrica e hídrica, y encargarse de cubrir la demanda eléctrica e hídrica por sí sola. Salvo que la micro-red se emplace en un lugar remoto, suele operar conectada a la red principal, de manera simbiótica con la red [48–50].
3. Las micro-redes agua-energía son **inteligentes**, es decir, poseen esquemas de control

que gestionan los recursos eléctricos e hídricos a disposición con tal de poder cubrir la demanda y cumplir objetivos adicionales como disminuir los costos de operación, maximizar el uso de energía limpia, alcanzar mayor estabilidad en el sistema, entre otros [48, 49].

3.2. Sistemas de gestión de energía

Con tal de gestionar el uso de dispositivos de una micro-red, generar ahorros de energía, minimizar los costos de operación, aumentar la eficiencia o reducir las emisiones de carbono, se desarrollaron diversos sistemas de gestión de energía enfocados en micro-redes [51], cuya implementación ha sido estudiada mediante la aplicación de diversas estrategias de control. A continuación, se discutirán dichos estudios.

Un ejemplo de gestión de energía aplicada a micro-redes agua-energía se observa en [52], en el cual se propone gestionar una red compuesta por sistemas de generación renovables y una planta desalinizadora, mediante un problema de optimización multi-objetivo, con tal de: minimizar tanto el coste total del ciclo de vida, como el impacto de la red en la salud del ecosistema y la vida humana, y maximizar la confiabilidad del sistema. Para ello, se busca minimizar el costo capital, de mantenimiento, de compra de químicos y remplazo de membrana de la planta desalinizadora. Los resultados muestran que la operación más costo-eficiente, se tiene al operar fuertemente con energía solar sobre la generación híbrida.

Por otro lado, en [25], se busca incorporar la interdependencia existente entre los sistemas hídricos y eléctricos, tradicionalmente ignorados por su complejidad o por una aproximación a lazo abierto del problema de gestión de energía. Para ello, se propone un sistema de gestión de energía a lazo cerrado, que considere la interconexión existente entre las redes de agua y energía, capaz de proveer resiliencia, ahorro energético y manejo de demanda. Para esto, el estudio propone implementar un control predictivo basado en modelos (MPC) discreto, utilizando modelos dinámicos y programación cuadrática secuencial, que minimice el error de seguimiento de referencia y la variación en las acciones de control, tales como: el caudal extraído por las bombas de agua, el caudal de las válvulas, la energía de las baterías y la potencia generada por el Diesel. Los resultados muestran una óptima gestión de demanda sujeta a los estándares operacionales e interdependencias.

Una alternativa diferente es [53], dado que busca gestionar la energía térmica de edificios. En particular, su objetivo es despachar los generadores eléctricos, administrar la energía térmica de los edificios y cubrir la demanda hídrica de una micro-red agua-energía aislada. Para ello, se implementa una programación no lineal entera mixta (MINLP), que busca minimizar la potencia generada, sujeta a restricciones como el balance hídrico, el equilibrio térmico y otras restricciones operacionales como límites en la generación de energía y almacenamiento de energía. Los resultados muestran que la metodología propuesta es efectiva para un amplio rango de temperaturas, siendo el rango más efectivo en torno a los 20 [°C] - 25 [°C], lo que favorece la operación de la red, pero limita el rango de operación del usuario.

Una aplicación a mayor escala se observa en [54], en la cual se plantea realizar gestión de energía y demanda, con tal de coordinar de manera óptima un conjunto de micro-redes independientes conectadas a una misma red eléctrica. Para ello, se propone implementar un

control MPC a nivel local, en cada micro-red, y uno global, de modo tal que el controlador global entregue una referencia de generación y demanda al MPC local de cada micro-red, para que estos determinen cuanta energía han de comprar a la red y cuan desviados están de la referencia. Los resultados muestran una reducción en la probabilidad de pérdida de energía y una reducción general de los costos de operación de la red.

3.3. Sistemas de gestión agua-energía

La red eléctrica y la red hídrica pueden vincularse, debido a que el agua puede operar como una fuente de energía o una carga eléctrica mediante bombas de agua u otros sistemas, mientras que la red eléctrica posibilita la extracción y distribución de agua proveyendo la energía necesaria para dichos procesos [55–57], por ende co-gestionar la red eléctrica y la red hídrica requieren incorporar nuevas dinámicas al problema de optimización, que permitan obtener soluciones más eficientes.

Producto de lo anterior, se considera el desarrollo de sistemas de cogestión agua-energía para micro-redes agua-energía, con tal de alcanzar uno o varios objetivos, como: la minimización de costos de operación, la minimización de consumo eléctrico del sistema hídrico, garantizar la cobertura de demanda, entre otros. Para cumplir estos objetivos, se han propuesto alternativas de control en la literatura, las cuales serán discutidas a continuación.

En [58] se elabora un sistema de gestión de agua-energía, enfocado en minimización de los costos de operación para sustentar la demanda eléctrica e hídrica. Para ello, se propone una planificación simultánea de la energía eléctrica y el agua, con un día de antelación mediante la optimización conjunta del agua y la energía. Sus resultados demuestran que la metodología propuesta es efectiva, sin embargo, se considera que la micro-red opera *on-grid*, por ende no se estudia la autosuficiencia de la red. De igual manera, el control predictivo requiere conocer un modelo dinámico del sistema, lo suficientemente preciso, para operar, lo que puede traer problemas a largo plazo, si se considera que la dinámica de la red cambia con el tiempo producto de la degradación de sus componentes

En [59] se elabora un sistema de gestión agua-energía que no solo considera la dinámica de la red eléctrica e hídrica, sino que también considera la dinámica de la energía térmica del sistema, con el objetivo de minimizar el costo de operación de la red mediante la minimización del consumo de potencia de las bombas de agua y los refrigeradores eléctricos. Para ello se realiza despacho económico mediante programación lineal de enteros mixta (MILP). Los resultados muestran que la metodología propuesta es más efectiva para rangos de operación; sin embargo, para alcanzar dichos objetivos, se requiere linealizar parte de las ecuaciones del sistema, como las funciones de costos y los balances de masa, hecho que limita el rango de operación del controlador a los intervalos que están linealizados.

En [60] se plantea un sistema de gestión de energía aplicado a una micro-red agua-energía, cuyo objetivo es realizar la programación óptima hora a hora que minimice el costo operacional, mientras se satisface la demanda, considerando la presencia de una estación de bombeo. La solución a la programación se consigue mediante algoritmos genéticos, los cuales mediante exploración, comparación, cruce de soluciones y mutación encuentra la solución óptima. Los resultados muestran una reducción en los costos operacionales al aplicar algoritmos genéticos,

sin embargo, los algoritmos genéticos no aseguran convergencia y por ello, las soluciones que encuentran pueden ser óptimos locales.

En [61] se plantea un sistema de gestión de energía para una micro-red agua-energía, cuyo objetivo es minimizar los costos de operación eléctricos asociados a la generación eléctrica, el encender unidades de generación y el no suministrar la demanda solicitada. Para alcanzar los objetivos, se propone realizar manejo de la demanda mediante la optimización del costo operacional de la predicción a dos días, estimando las variables climatológicas mediante modelos estadísticos y la demanda mediante redes neuronales. Los resultados demuestran que la metodología propuesta cumple su objetivo; sin embargo, su aproximación del lado hídrico es bastante limitado, recurriendo únicamente a las ecuaciones de balance de masa, sin incorporar otras dinámicas asociadas a la extracción de agua.

En [1] se implementa un sistema de gestión de energía para un nexo agua-energía, con tal de minimizar el costo energético de satisfacer la demanda eléctrica e hídrica. En particular, el objetivo del controlador es optimizar tres funciones objetivos: el desplazamiento de carga, la compra de agua y el uso de la batería. Para ello se realiza gestión de demanda mediante la implementación de un MINLP adaptado para abarcar problemas convexos, con tal de minimizar los costos computacionales. Los resultados muestran que la metodología implementada logra alcanzar resultados óptimos con una reducción significativa del costo computacional, pasando de 2 [hr] a 1 [s] en el caso de estudio. Sin embargo, para llegar a dichos valores, se tuvo que realizar aproximaciones convexas a las dinámicas del problema, lo que provoca que el controlador solo opere de manera eficiente en torno a un punto de operación.

Finalmente, en [62] se comparan dos modelos de gestión de energía, uno determinístico y otro estocástico. El objetivo de ambos modelos es resolver dos problemas de optimización simultáneamente, el primer problema busca optimizar el dimensionamiento de la energía renovable a instalar, mientras que el segundo problema de optimización busca minimizar los costos de producir agua potable mediante una desalinizadora. Por lo anterior, la función objetivo a optimizar es la suma del costo de kWh renovable instalado más el costo de producir agua potable en la desalinizadora en dicho escenario. El método de control propuesto es de horizonte deslizante, con un horizonte de predicción de dos días. Las pruebas se realizaron resolviendo primero el problema determinístico, resolviendo de manera independiente 52 escenarios con un horizonte de estudio de 7 días, para posteriormente resolver el problema estocástico, con todos los 52 escenarios posibles equiprobables. Al comparar los resultados obtenidos en ambos modelos, se observa que el modelo estocástico posee mayor generación y almacenamiento que el modelo determinístico, permitiendo que el modelo estocástico gestione de mejor manera la micro-red ante incertezas. Sin embargo, solo se estudia la dinámica de la red en una escala diaria, dejando el análisis de la red y de los controladores que operan en una escala de tiempo menor.

3.4. Control secundario distribuido con despacho económico

La gestión de micro-redes se integra al esquema de control de una micro-red como un controlador de baja frecuencia, normalmente centralizado. El problema de dicha implementación, es que la red centralizada aumenta en gran medida la red de comunicación y los requisitos computacionales del controlador. De igual manera, el controlador, al ser de baja frecuencia, puede tener una respuesta tardía ante perturbaciones. Por lo anterior, se plantea trasladar el despacho económico al control secundario distribuido de una micro-red, con tal de optimizar el uso de la red de comunicación y aumentar la rapidez del controlador. El esquema de control con estrategia de control mencionada se presenta en la Figura 3.2.

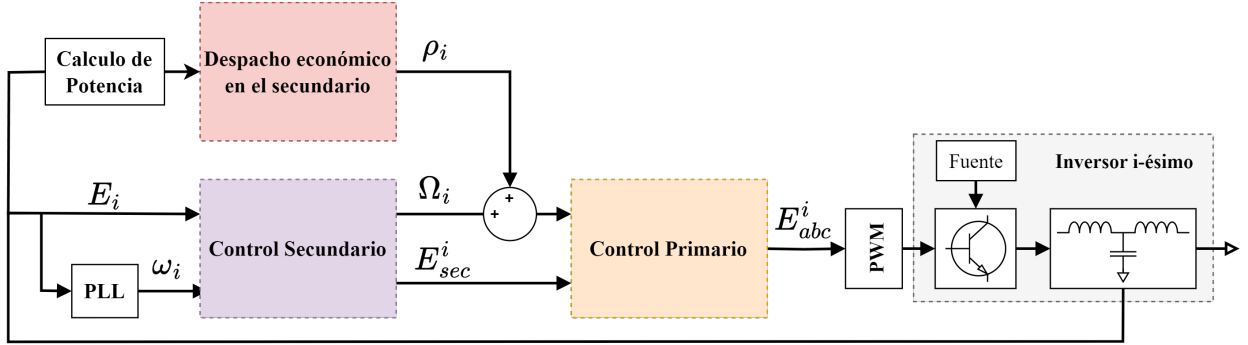


Figura 3.2: Ejemplo de esquema de control secundario con despacho económico.

A continuación se presentarán trabajos relacionados con la estrategia de control presentada.

En [63], se destaca que la generación distribuida renovable posee varios desafíos para el despacho económico y la restauración de frecuencia, como la baja inercia, la capacidad volátil de generación y la amplia distribución geográfica. Sobre todo, sí se considera que los esquemas de control propuestos en la literatura contemporánea son demasiado lentos para proporcionar despacho económico en presencia de una demanda fluctuante, producto de suposiciones imprácticas o grandes restricciones. Por lo anterior, se propone implementar un control secundario distribuido basado en MPC que garantice una convergencia rápida y robusta. Para ello, se busca minimizar el error en el seguimiento de referencia, considerando las restricciones operacionales de la red. Los resultados demuestran que el controlador es capaz de converger rápidamente, sobrellevando de buena manera la intermitencia e incerteza de las unidades.

Por otro lado, en [64] se busca resguardar la eficiencia de las micro-redes al minimizar los errores de predicción que ocurren debido a la diferencia en la escala de tiempo existente entre el despacho económico y la restauración de frecuencia de una micro-red. Por ello, se busca igualar las escalas de tiempo de ambas acciones de control. Para ello, se traslada el despacho económico a un control secundario activado por eventos, con tal de que se realice el despacho económico si hay un cambio significativo en el estado de la micro-red, disminuyendo la carga comunicacional. Los resultados presentados demuestran que la estrategia presentada es efectiva, al momento de resolver los objetivos de control y eficiente, al no saturar el enlace

de comunicación entre agentes.

Otra aplicación del controlador MPC se observa en el trabajo de [38], el cual mediante múltiples estudios lleva a cabo el desarrollo de 3 controladores distintos, el primero enfocado en restaurar la frecuencia de la red y realizar el despacho económico de los generadores de la red, mientras que el segundo controlador se enfoca en llevar a cabo la restauración de tensión y frecuencia de la red, además de realizar despacho económico de tanto la potencia activa, como reactiva de la red. Por último, el tercer controlador se enfoca en restaurar la frecuencia y la tensión, mientras reparte el desbalance de la red entre las unidades de generación. El más relevante a discutir es el segundo controlador, que tiene por objetivo controlar una micro-red híbrida compuesta de unidades AC y DC conectados mediante un *interlinking*. Para ello, se define el costo de generar potencia activa y reactiva como costos cuadráticos y se define la función objetivo como el consenso de los costos marginales de generar potencia activa de las unidades AC y DC, más el consenso del costo marginal de generar potencia reactiva de las unidades AC, más el seguimiento de referencia de tensión y frecuencia, y la penalización de las acciones de control. Los resultados se obtuvieron a partir de la implementación de los controladores en un *setup* experimental y estos indican que los controladores propuestos son capaces de cumplir sus objetivos de control, es decir, son capaces de llevar a cabo la restauración de tensión y frecuencia, y los distintos despachos económicos ante los diversos escenarios de estudio, como son los impactos de carga, retardos en la comunicación, fallas en la comunicación y el *plug-and-play*, resaltando el controlador como un controlador robusto y efectivo.

Finalmente, en [26], se elaboran dos controladores cooperativos distribuidos distintos con objetivos distintos: el primer controlador busca únicamente restaurar la frecuencia de la red y realizar el despacho económico eléctrico, considerando los límites de generación de las unidades, mientras que el segundo controlador busca, adicionalmente, resolver la congestión de demanda, considerando los límites de corriente que puede circular por línea. El primer controlador realiza la restauración de frecuencia siguiendo el control secundario elaborado en [36], mientras que el controlador del despacho económico se lleva a cabo mediante la emulación de las condiciones de KKT obtenidas a partir del problema de optimización, que corresponde a la minimización de los costos cuadráticos de operación sujetos al balance de potencia de la red y a los límites de generación. El segundo controlador suma al problema de optimización la restricción de corriente por línea y vuelve a resolverlo mediante KKT. Ambos controladores se implementaron en un *setup* experimental y sus resultados señalan que los métodos de control propuestos son capaces de cumplir los objetivos de control.

3.5. Análisis y discusión

En esta sección se ha presentado una definición general de que es una micro-red agua-energía. Se presentaron diversos trabajos enfocados en la gestión eléctrica de micro-redes eléctricas y de agua-energía y trabajos enfocados en la gestión de agua y energía de micro-redes agua-energía. Se presentaron sus principales objetivos de control y los resultados obtenidos en dichos trabajos, con tal de dar un contexto general de la gestión de micro-redes. Posteriormente, se presentaron distintas estrategias de control para trasladar el despacho económico eléctrico del control terciario al control secundario de una red eléctrica, debido a que ejemplifican la labor a realizar en este trabajo.

A partir de los trabajos mencionados en la sección 3.2 y 3.3, se puede extraer que la gestión de micro-redes agua-energía, al igual que la gestión eléctrica de micro-redes eléctricas, se enfocan principalmente en minimizar los costos de operación del sistema, teniendo como función objetivo la minimización de los costos de generación y la minimización del consumo de potencia de parte de la red hídrica.

De la sección 3.4, se puede extraer que la mayor motivación para llevar a cabo el despacho económico en el tiempo de establecimiento del control secundario es el afrontar rápidamente la variabilidad de las energías distribuidas renovables al momento de llevar a cabo el despacho económico ante una demanda variable. También se puede extraer ideas de escenarios ante los cuales evaluar la futura propuesta como son los retardos comunicacionales o las fallas de comunicación.

Se destaca que los trabajos presentados en las secciones 3.2 y 3.3 se limitan a realizar la optimización de la red, sin estudiar la evolución de la micro-red hídrica ante las decisiones del controlador. Es decir, como afectan las decisiones del optimizador a la red eléctrica y a la red hídrica en tiempo real. Por tal motivo, la mayoría de los trabajos presentados se limitan a evaluar la estrategia de control propuesta por simulación, algunos mediante datos reales y otros mediante escenarios ficticios, pero no mediante *Hardware-in-the-Loop* o *setups* experimentales, generando una apertura de estudio.

Finalmente, no se estudia el efecto de la co-optimización de las micro-redes agua-energía sobre fuentes limitadas de agua o cuyo volumen de agua disponible varía según las decisiones del optimizador, como son los acuíferos o acopios de agua, lo que podría llevar a soluciones poco sustentables.

A continuación se presenta en la Tabla 3.1 un resumen de los trabajos presentados a lo largo del estado del arte.

Tabla 3.1: Comparación del estado del arte del control de micro-redes.

Comparación	[52]	[25]	[53]	[54]	[58]	[59]	[60]	[61]	[1]	[62]	[63]	[64]	[38]	[26]
Micro-red aislada	✓	✓	✓	✗	✗	✓	✗	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Posee sistema hídrico	✓	✓	✓	✗	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✗	✗	✗	✗
Co-optimización agua-energía	✗	✗	✗	✗	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✗	✗	✗	✗
Despacho a nivel secundario	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✓	✓	✓	✓
Resultados por simulación	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Resultados por emulación	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗
Resultados experimental	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✓	✓

Capítulo 4

Control secundario propuesto con despacho económico eléctrico-hídrico

El núcleo del trabajo recae en el diseño e implementación de un esquema de control secundario, capaz de restaurar la frecuencia y tensión del sistema eléctrico, realizando, a la vez, el despacho económico de las unidades de generación y las bombas de agua. Para ello, se propone implementar una estrategia de control secundario distribuido denominado controlador integral proporcional de media distribuida o *DAPI* por sus siglas en inglés, con tal de restaurar la tensión y frecuencia del sistema y, sobre este, incorporar un controlador que se encargue del despacho económico eléctrico-hídrico.

Para llevar a cabo el despacho económico eléctrico-hídrico, se utiliza como base el trabajo realizado en [26], en el cual se busca llevar el despacho económico de potencia activa al control secundario de la micro-red, mediante la emulación de las condiciones de KKT necesarias para minimizar los costos de operación del sistema.

Para incorporar el nexo agua-energía de la micro-red al problema, se utilizan bombas de agua, puesto que relaciona ambos sistemas, eléctrico e hídrico, de manera intrínseca. Desde la red eléctrica son percibidas como una carga, mientras que desde la red hídrica son percibidas como una fuente de agua. Debido a que las bombas de agua operan a través de un inversor que se encarga de controlar la velocidad del motor de inducción que tienen dentro, se puede asumir que la velocidad es controlada y constante a lo largo del problema, lo que permite simplificar el modelo eléctrico a una carga eléctrica de potencia constante.

A continuación, se presentará en la sección 4.1 el planteamiento del problema, para posteriormente en la sección 4.2 y 4.3 presentar las propuestas de despacho económico, eléctrico e hídrico derivadas de la sección 4.1. Finalmente, en la sección 4.4 se profundiza el esquema de control utilizado para realizar el seguimiento de demanda hídrico.

4.1. Planteamiento del problema

Como se mencionó anteriormente, para llevar a cabo el despacho económico, eléctrico e hídrico, se utiliza como base el trabajo realizado por [26], el cual busca diseñar un controlador capaz de realizar el despacho económico eléctrico, mediante la emulación de las condiciones de optimalidad del dual del problema de optimización. Para ello, se plantea primero la función objetivo del problema, que en este caso particular corresponde a los costos de operación de la red.

En el caso de la micro-red agua-energía, los costos de operación de la micro-red agua-energía corresponden a la suma de los costos de operación de la red eléctrica e hídrica. Siendo el costo de operación de la red eléctrica, el costo de generación de los inversores dado por la ecuación 4.1.

$$C_G^i(P_G^i(t)) = a_i P_G^i(t)^2 + b_i P_G^i(t) + c_i \quad (4.1)$$

Con $C_G^i(\cdot)$ el costo de generación del inversor i , $P_G^i(t)$ la potencia generada por la unidad i en el instante $[t]$ y los coeficientes a_i , b_i y c_i los términos del costo cuadrático.

El costo de operación de los inversores se define cuadrático debido a que la eficiencia de un inversor aumenta de manera cuadrática hasta alcanzar su máximo en torno al 30% de su capacidad de generación [65] y posteriormente se estabiliza o decae; este valor máximo varía ampliamente según el diseño del inversor. Para este trabajo se asume que el costo cuadrático se mantiene a lo largo de la capacidad de generación del inversor.

Por otro lado, para definir el costo operacional de la red hídrica se requiere primero establecer el vínculo entre el sistema eléctrico e hídrico, que en este estudio en particular se realiza mediante las bombas de agua. Asumiendo que la bomba no tiene pérdida de potencia y que la tubería no afecta la energía del caudal extraído del agua, se puede definir la potencia consumida por la bomba k -ésima mediante la ecuación (4.2) [59, 66], señalando que la potencia eléctrica consumida es proporcional al caudal extraído.

$$P_p^k(t) = BQ_p^k(t)h_p \quad (4.2)$$

Con $P_p^k(t)$ la potencia eléctrica consumida por la bomba k -ésima en el instante $[t]$, B el peso del agua a $20[^\circ C]$ en $[\frac{kg}{m^3}]$, $Q_p^k(t)$ el caudal extraído por la bomba k -ésima en el instante $[t]$ en $[\frac{m^3}{s}]$ y h_p la altura $[m]$ a la cual se elevará el agua, desde el acuífero.

Definida la relación entre caudal y potencia, se define el costo de operación de las bombas de agua en la ecuación (4.3).

$$C_p^k(Q_p^k(t)) = d_k [BQ_p^k(t)h_p]^2 + e_k BQ_p^k(t)h_p + f_k \quad (4.3)$$

Con $C_p^k(\cdot)$ el costo de la potencia consumida por la bomba k -ésima, los coeficientes d_k , e_k y f_k los términos del costo cuadrático y B y h_p los parámetros de la bomba. La ecuación que define los costos de operación de las bombas de agua es cuadrática, debido a que los motores de inducción de las bombas de agua operan con mayor eficiencia cuando operan cerca de su máxima capacidad de operación [67], lo que permite aproximar su dinámica como una

ecuación cuadrática.

Sumando las ecuaciones (4.1) y (4.3), se tiene que, para un sistema de n inversores y m bombas, el costo de operación $C_o(t)$ de la micro-red agua-energía en el instante $[t]$ viene dado por la ecuación (4.4).

$$C_o(t) = \sum_{i=1}^n \left(a_i [P_G^i(t)]^2 + b_i P_G^i(t) + c_i \right) + \sum_{k=1}^m \left(d_k [BQ_p^k(t)h_p]^2 + e_k BQ_p^k(t)h_p + f_k \right) \quad (4.4)$$

Dicha función objetivo está limitada por las restricciones físicas del problema y la demanda impuesta sobre este. Para este estudio, se considerarán las siguientes restricciones:

- Balance eléctrico para garantizar la cobertura de la demanda eléctrica $P_L(t)$.
- Balance hídrico para garantizar la cobertura de la demanda hídrica $Q_p^L(t)$.

Dado que el estudio se enfoca en controlar micro-redes agua-energía en modo isla, el balance eléctrico de la red se enfoca en relacionar la generación y la demanda eléctrica. Como no hay bancos de baterías en el sistema, se tiene que la potencia generada debe ser igual a la potencia demandada por las cargas domiciliarias y el sistema hídrico. Por lo tanto, para un sistema de n inversores y m bombas, el balance eléctrico viene dado por la ecuación (4.5).

$$P_L(t) + \sum_{k=1}^m BQ_p^k(t)h_p - \sum_{i=1}^n P_G^i(t) = 0 \quad (4.5)$$

Siendo $P_L(t)$ la demanda eléctrica domiciliaria en el instante $[t]$. La red hídrica opera en modo isla, por ende el balance hídrico se enfoca en relacionar la generación y la demanda hídrica. Como no hay estanques de agua, se tiene que el caudal extraído es igual al caudal demandado por las cargas domiciliarias. Por lo tanto, para un sistema de m bombas, el balance hídrico viene dado por la ecuación (4.6).

$$Q_p^L(t) - \sum_{k=1}^m Q_p^k(t) = 0 \quad (4.6)$$

Siendo $Q_p^L(t)$ la demanda hídrica en el instante $[t]$. Con la función objetivo definida y las restricciones de igualdad especificadas, se procede a plantear el problema de optimización.

$$\begin{aligned} \min \quad & J(t) = \sum_{i=1}^n \left(a_i [P_G^i(t)]^2 + b_i P_G^i(t) + c_i \right) + \sum_{k=1}^m \left(d_k [BQ_p^k(t)h_p]^2 + e_k BQ_p^k(t)h_p + f_k \right) \\ \text{s.a.} \quad & P_L(t) + \sum_{k=1}^m BQ_p^k(t)h_p - \sum_{i=1}^n P_G^i(t) = 0 \\ & Q_p^L(t) - \sum_{k=1}^m Q_p^k(t) = 0 \end{aligned} \quad (4.7)$$

Al igual que en [26], la función objetivo es cuadrática, semidefinida positiva y con restricciones lineales, por lo tanto, es convexa y por ello, cumple las condiciones de Slater [68], por lo que se puede resolver el problema mediante su formulación dual de Lagrange. Reescribiendo

el problema de estudio como su dual de Lagrange se obtiene la ecuación (4.8).

$$L(t) = \sum_{i=1}^n \left(a_i [P_G^i(t)]^2 + b_i P_G^i(t) + c_i \right) + \sum_{k=1}^m \left(d_k [BQ_p^k(t)h_p]^2 + e_k BQ_p^k(t)h_p + f_k \right) \\ + \lambda \left(P_L(t) + \sum_{k=1}^m BQ_p^k(t)h_p - \sum_{i=1}^n P_G^i(t) \right) + \delta \left(Q_p^L(t) - \sum_{k=1}^m Q_p^k(t) \right) \quad (4.8)$$

Siendo λ y δ multiplicadores de Lagrange asociados al balance eléctrico e hídrico respectivamente. Para encontrar una solución óptima, se extraen las condiciones de KKT o condiciones de optimalidad, necesarias para que la solución encontrada sea óptima. Las ecuaciones resultantes se presentan a continuación:

$$\frac{dL(t)}{dP_G^i(t)} = 2a_i P_G^i(t) + b_i - \lambda = 0 \quad (4.9a)$$

$$\frac{dL(t)}{dQ_p^k(t)} = 2d_k B^2 Q_p^k(t) h_p^2 + e_k B h_p + \lambda B h_p - \delta = 0 \quad (4.9b)$$

$$\frac{dL(t)}{d\lambda} = P_L(t) + \sum_{k=1}^m BQ_p^k(t)h_p - \sum_{i=1}^n P_G^i(t) = 0 \quad (4.9c)$$

$$\frac{dL(t)}{d\delta} = Q_p^L(t) - \sum_{k=1}^m Q_p^k(t) = 0 \quad (4.9d)$$

Los multiplicadores de Lagrange λ y δ se pueden despejar de (4.9a) y (4.9b) respectivamente, obteniendo las siguientes igualdades:

$$\lambda = 2a_i P_G^i(t) + b_i \quad (4.10a)$$

$$\delta - \lambda B h_p = 2d_k B^2 Q_p^k(t) h_p^2 + e_k B h_p \quad (4.10b)$$

A partir de (4.9a) se despeja λ obteniendo la ecuación (4.10a), que señala que λ equivale al costo marginal de los inversores. Mientras que de (4.9b) se despeja $\delta - \lambda(t)Bh_p$, obteniendo la ecuación (4.10b), que señala que δ equivale al costo marginal de las bombas de agua más un término dependiente de λ que relaciona el lado eléctrico e hídrico.

Dado que los multiplicadores de Lagrange son únicos en torno al punto de operación, para alcanzar el óptimo, todos los multiplicadores de Lagrange deben de converger. En particular, todos los λ_i deben converger a un único λ y todos los $\delta_k - \lambda_k B h_p$ deben de converger a un único $\delta - \lambda B h_p$. Para ello, se diseñan dos controles distribuidos encargados de satisfacer ambas condiciones de KKT encontradas.

4.2. Despacho económico eléctrico

Debido a que el objetivo del trabajo busca trasladar el despacho económico al control secundario, el despacho económico ha de operar simultánea con la restauración de frecuencia y tensión del control secundario sobre el control *droop*, por lo tanto, la estructura general del esquema de control a diseñar se presenta en la Figura 4.1.

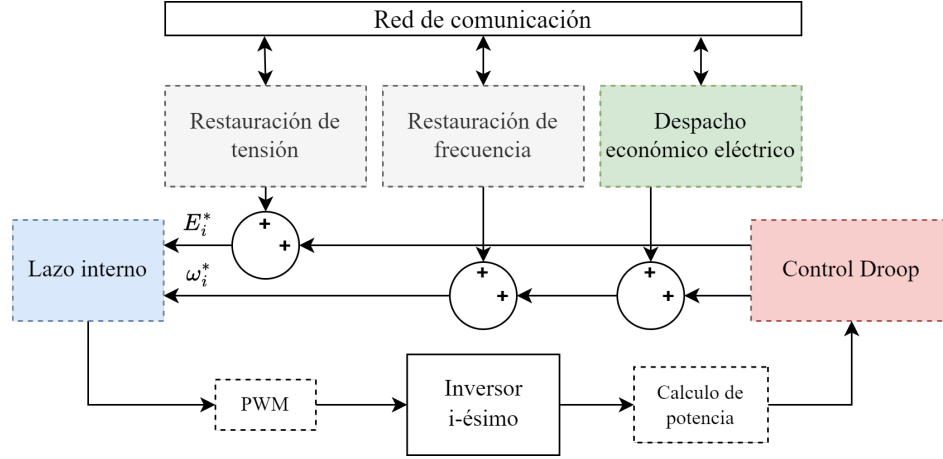


Figura 4.1: Estructura general del controlador eléctrico a diseñar.

A partir del multiplicador de Lagrange λ se diseña el controlador distribuido $\rho_i(t)$, que busca complementar el *droop* de frecuencia, con tal de que se restaure la frecuencia y se realice el despacho económico de potencia. La curva de *droop* de frecuencia resultante de añadir a la ecuación (2.5) el controlador propuesto se presenta a continuación:

$$\omega_i^*(t) = \omega_0 - m_i P_G^i(t-1) + \Omega_i(t-1) + \rho_i(t-1) \quad \forall i \in \mathbf{N} \quad (4.11)$$

$$k_1 \dot{\Omega}_i(t) = -[\omega_i(t) - \omega_0] - \sum_{i=1, j \neq i}^n \mu_{i,j} [\Omega_i(t) - \Omega_j(t)] \quad \forall i, j \in \mathbf{N} \quad (4.12)$$

$$k_3 \dot{\rho}_i(t) = - \sum_{j \neq i}^n \mu_{i,j} [\lambda_i(t) - \lambda_j(t)] \quad \forall i, j \in \mathbf{N} \quad (4.13)$$

$$\lambda_i(t) = 2a_i P_G^i(t) + b_i \quad \forall i \in \mathbf{N} \quad (4.14)$$

La ecuación (4.11) corresponde a la ecuación de *droop* para la frecuencia de un sistema eléctrico, presentada en la sección anterior, con restauración de frecuencia $[\Omega_i(t)]$ y despacho económico eléctrico $[\rho_i(t)]$.

Por otro lado, la ecuación (4.12) presenta la acción de control encargada de la restauración de frecuencia $\Omega_i(t)$. Dicha acción de control es de carácter integral y busca corregir la desviación de frecuencia de la unidad i -ésima e igualar la respuesta de los inversores ante un cambio de potencia.

Además, la ecuación (4.13) corresponde a la acción de control propuesta en [26] asociada al despacho económico, la cual busca el consenso de los costos marginales de los inversores mediante la red de comunicación, representada por el término de adyacencia $\mu_{i,j}$, ajustando

con ello la potencia activa que debe entregar cada inversor. La ecuación (4.14) define los λ_i utilizados en la ecuación (4.13).

El controlador presentado y las ecuaciones que lo componen pueden ser presentados en conjunto en un diagrama de control. El diagrama de la propuesta de control eléctrico se presenta en la figura 4.2.

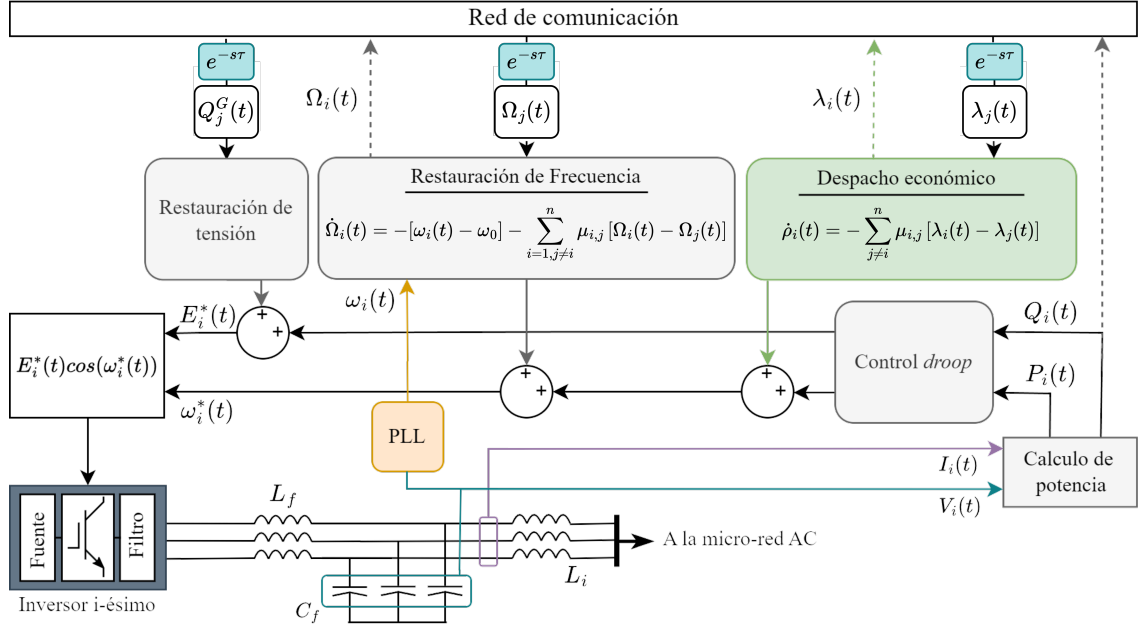


Figura 4.2: Diagrama de la propuesta de control eléctrico.

El controlador encargado de la gestión hídrica, diseñado a partir de la condición de optimalidad obtenida en (4.10b), se presenta en la sección siguiente.

4.3. Despacho económico hídrico

Debido a que no existe un esquema de control para la red hídrica, al trasladar el despacho económico hídrico al control secundario, será el unico controlador que opere sobre la bomba de agua. Por lo tanto, la estructura general del esquema de control a diseñar se presenta en la Figura 4.3.

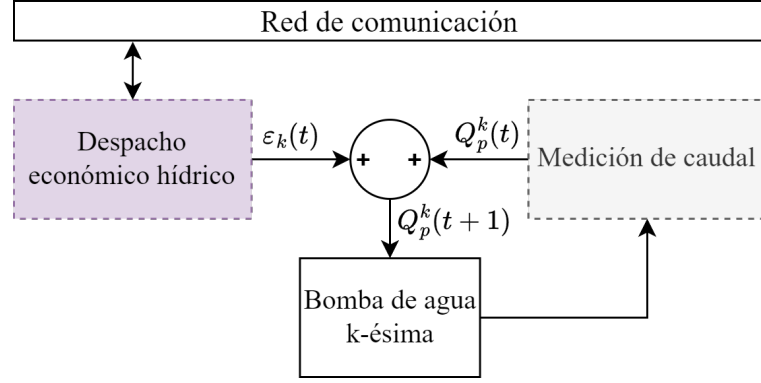


Figura 4.3: Estructura general del controlador hídrico a diseñar.

Si los costos de la función objetivo, presentada en la sección anterior, son únicos, existe una solución óptima única y por ende, los multiplicadores de Lagrange λ y δ son únicos, por ello $\delta - Bh_p\lambda$ también es único. Como $\delta - Bh_p\lambda$ equivale al costo marginal de las bombas de agua (ecuación 4.10b), se puede extrapolar que, en el punto de operación, los costos marginales de las bombas de agua también han de ser únicos e iguales. Producto de esto, se propone un esquema de control cooperativo y distribuido, cuyo objetivo es igualar los costos marginales de las bombas de agua, mediante el uso de las mediciones locales y mediciones próximas, a través de la red de comunicación.

$$Q_p^k(t) = Q_p^k(t-1) + \epsilon_k(t-1) \quad \forall k \in M \quad (4.15)$$

$$k_4 \dot{\epsilon}_k(t) = - \sum_{l \neq k}^m \beta_{k,l}(t) \left([2d_k B^2 Q_p^k(t) h_p^2 + e_k B h_p] - [2d_l B^2 Q_p^l(t) h_p^2 + e_l B h_p] \right) \quad (4.16)$$

La ecuación (4.15), señala que la potencia consumida por la bomba k en el instante $[t]$ depende de la potencia consumida en el instante $t-1$ más la acción de control ϵ del instante $t-1$. Mientras que, la ecuación (4.16) corresponde al controlador propuesto, el cual busca igualar los costos marginales de las bombas de agua vecinas, mediante la comunicación con unidades vecinas y el ajuste del caudal extraído por cada bomba.

Dado que el esquema de control es distribuido, se implementa una matriz de adyacencia, con tal de especificar la topología y la comunicación de los componentes internos de la micro-red. Como cogestión eléctrica-hídrica, se realiza de manera simultánea e independiente, la matriz de adyacencia no considerara enlaces de comunicación entre los inversores y bombas de agua. Un ejemplo de matriz de adyacencia para una red de 3 inversores y 3 bombas de agua se presenta en la figura 4.4.

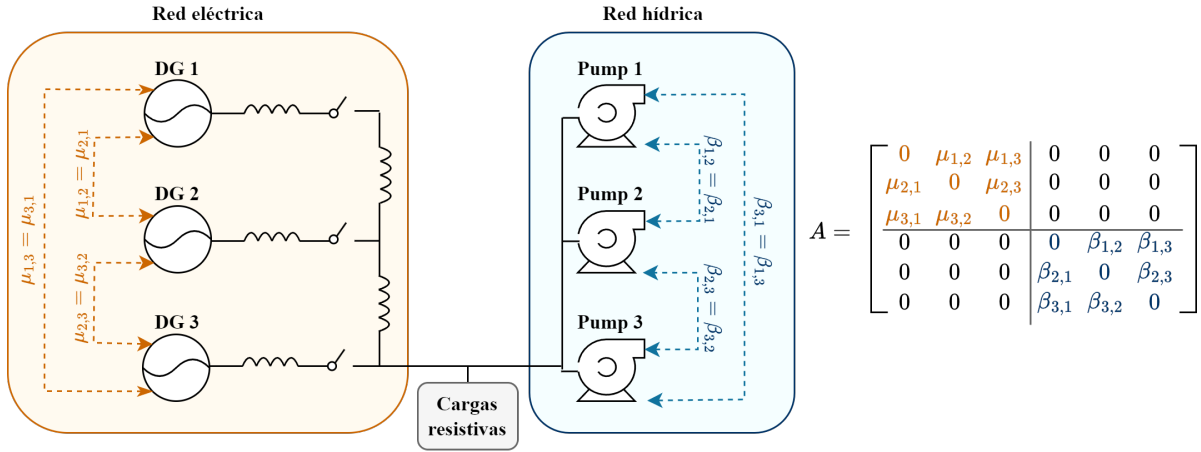


Figura 4.4: Ejemplo de red de comunicación, sin comunicación cruzada entre inversores y bombas de agua.

Para caracterizar la comunicación entre el inversor i -ésimo y el inversor j -ésimo se utiliza la letra $\mu_{i,j}$, mientras que, para caracterizar la comunicación entre la bomba k -ésima y la bomba l -ésima, se utiliza la letra $\beta_{k,l}$. Ambas letras griegas en conjunto conforman la matriz de adyacencia de una micro-red agua-energía.

Posteriormente, con el objetivo de resaltar la interconexión existente entre el sistema eléctrico e hídrico, se reescribe la igualdad presentada en (4.10b), dejando δ en función de λ y el costo marginal de la bomba. La igualdad resultante se presenta en (4.17).

$$\delta_k(t) = 2d_k B^2 Q_p^k(t) h_p^2 + e_k B h_p + \lambda(t) B h_p \quad (4.17)$$

Como λ puede variar ante cambios en la red, se propone calcular un promedio local de λ , denominado $\bar{\lambda}_k(t)$ con el cual definir el valor de $\delta_k(t)$. La ventaja de esta estrategia es que utiliza la información disponible en la red de comunicaciones, por lo tanto, no es necesario conocer la topología de la red y por ello, el esquema de control es totalmente distribuido. La nueva expresión que define $\delta_k(t)$ se presenta en 4.18.

$$\delta_k = 2d_k B^2 Q_p^k(t) h_p^2 + e_k B h_p + \bar{\lambda}_k(t) B h_p \quad (4.18)$$

$$\bar{\lambda}_k = \frac{\sum_{i=1}^n \eta_{k,i}(t) \lambda_i(t)}{\max \{ \sum_{i=1}^n \eta_{k,i}(t), 1 \}} \quad (4.19)$$

Siendo $\eta_{k,j}$ el segmento de la matriz de adyacencia que indica la comunicación entre la bomba de agua k -ésima y el inversor j -ésimo. Con este cambio, se redefine δ_k como la suma del costo marginal de la bomba de agua k -ésima y el promedio de los costos marginales de los inversores vecinos al nodo de control. Con base en lo anterior, se define un nuevo esquema de control para la red hídrica.

$$Q_p^k(t) = Q_p^k(t-1) + \epsilon_k(t-1) \quad \forall k \in M \quad (4.20)$$

$$k_4 \dot{\epsilon}_k(t) = - \sum_{k=1, l \neq k}^m \beta_{k,l}(t) ([2d_k B^2 Q_p^k(t) h_p^2 + e_k B h_p + \bar{\lambda}_k(t) B h_p] - [2d_l B^2 Q_p^l(t) h_p^2 + e_l B h_p + \bar{\lambda}_l(t) B h_p]) \quad (4.21)$$

$$\bar{\lambda}_k(t) = \frac{\sum_{i=1}^n \eta_{k,i}(t) \lambda_i(t)}{\max\{\sum_{i=1}^n \eta_{k,i}(t), 1\}} \quad (4.22)$$

$$\lambda_i(t) = 2a_i P_G^i(t) + b_i \quad (4.23)$$

La ecuación (4.20), señala que el caudal extraído por la bomba k en el instante $[t]$ depende del caudal extraído en el instante $t - 1$, más la acción de control ϵ . La ecuación (4.21) corresponde a la acción de control propuesta, la cual busca igualar los costos marginales de las bombas de agua vecinas y los promedios de los costos marginales de los inversores, mediante la comunicación con unidades vecinas, a través de la matriz de adyacencia y el ajuste de caudal que consume cada bomba. Las ventajas de esta alternativa de control se listan a continuación.

- La estrategia propuesta incorpora matemáticamente los efectos de la red eléctrica en la red hídrica, resaltando así la interconexión existente entre ambos sistemas.
- Para implementar esta estrategia de control no es necesario extender la red de comunicaciones, dado que se puede utilizar la red existente para calcular los $\bar{\lambda}_k(t)$.
- Se favorece el estudio de *plug-and-play*, dado que se puede observar el efecto que tiene conectar y desconectar unidades de generación, en el cálculo del $\bar{\lambda}_k(t)$.
- Si se pierde toda comunicación entre la red eléctrica y la red hídrica, el sistema seguiría funcionando, dado que se recuperarían las ecuaciones iniciales de la propuesta. En otras palabras, el controlador procedería a buscar únicamente el consenso del costo marginal de las bombas de agua.

Finalmente, se actualiza la matriz de adyacencia, con tal de incorporar la comunicación existente entre las bombas de agua y los inversores. La nueva matriz de adyacencia aplicada a una red con 3 inversores y 3 bombas de agua se presenta en la figura 4.5.

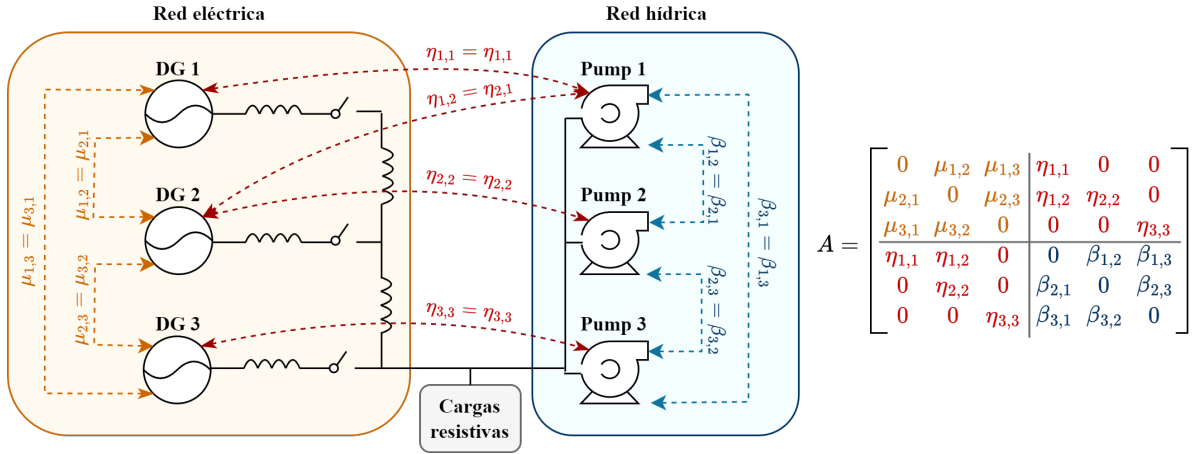


Figura 4.5: Ejemplo de red de comunicación, con comunicación cruzada entre inversores y bombas de agua.

$\mu_{i,j}$ corresponde al segmento de la matriz de adyacencia que visualiza la comunicación entre el inversor i -ésimo y el inversor j -ésimo. De igual manera, $\beta_{k,l}$ corresponde al segmento de la matriz de adyacencia que visualiza la comunicación entre la bomba k -ésima y la bomba l -ésima. Finalmente, $\eta_{k,j}$ y $\eta_{i,l}$ corresponde al segmento de la matriz de adyacencia que visualiza la comunicación entre la bomba k -ésima y el inversor j -ésimo y viceversa, entre el inversor i -ésimo y la bomba l -ésima, respectivamente. En conjunto, las 4 letras griegas conforman la matriz de adyacencia de la red.

La propuesta actual busca garantizar que se minimicen los costos operacionales del lado hídrico de la red, pero no garantiza la cobertura de demanda hídrica, por ende, en la siguiente sección, se diseñará un controlador adicional que lleve a cabo dicha tarea.

4.4. Seguimiento de demanda hídrica

Debido a que el controlador propuesto en la sección 4.3 opera mediante la búsqueda del consenso de los $\delta_k(t)$ de las bombas de agua instante a instante, puede ocurrir que, ante un cambio de demanda, se logren igualar los $\delta_k(t)$, pero que no se cumpla la demanda hídrica, puesto que no hay un controlador que lo garantice, por lo tanto, se propone elaborar un controlador cooperativo distribuido basado en el método *leader-follower* distribuido. Para ello, lo primero que se debe definir es la función objetivo del controlador del líder.

Al mezclar el controlador propuesto de la sección anterior, con el seguimiento de demanda deseado, se tiene que, en el punto de operación, para una demanda dada y precios de operación hídricos distintos, existe un único δ_0 que satisface la demanda hídrica y minimiza los costos operacionales de la red. Por lo anterior, se plantea como función objetivo del líder calcular dicho δ_0 que satisfaga la demanda y el despacho hídrico, con tal de entregárselo a los seguidores y con ello llevar el sistema al punto de operación deseado. La función objetivo se presenta en la ecuación (4.24).

encontrar δ_0 | $\delta_k(t) = \delta_l(t) \forall k \in M, l \neq k$

$$2d_k B^2 h_p^2 Q_p^k(t) + e_k B h_p + B h_p \bar{\lambda}_k = 2d_l B^2 h_p^2 Q_p^l(t) + e_k B h_p + B h_p \bar{\lambda}_l \quad (4.24)$$

$$Q_p^L(t) - \sum_{k=1}^m Q_p^k(t) = 0$$

Para encontrar dicho δ_0 óptimo, primero se busca una relación matemática que vincula los caudales de la red hídrica, para ello, se utiliza la igualdad de los multiplicadores de Lagrange δ , señalado en (4.24), obteniendo la igualdad de (4.25).

$$\delta_k(t) = \delta_l(t)$$

$$2d_k B^2 h_p^2 [Q_p^k(t)] + e_k B h_p + B h_p \bar{\lambda}_k = 2d_l B^2 h_p^2 [Q_p^l(t)] + e_k B h_p + B h_p \bar{\lambda}_l \quad (4.25)$$

$$Q_p^l(t) = \frac{d_k}{d_l} Q_p^k(t) + \frac{e_l - e_k}{2d_l B h_p} + \frac{\bar{\lambda}_l - \bar{\lambda}_k}{2d_l B h_p}$$

En el punto de operación se cumple que $\bar{\lambda}_k = \bar{\lambda}_l$, además, el parámetro $e_l - e_k$ es, aproximadamente, 10^6 veces más pequeño que $2d_l B h_p$, por lo tanto, se puede aproximar la igualdad obtenida en (4.25), por la igualdad de (4.26).

$$\hat{Q}_p^l(t) = \frac{d_k}{d_l} Q_p^k(t) \quad (4.26)$$

Obtenida la relación matemática que vincula los caudales de la red hídrica, se puede hacer un reemplazo de variables en el balance hídrico, obteniendo la estimación de caudal de (4.29).

$$Q_p^1(t) + Q_p^2(t) + \dots + Q_p^m(t) = Q_p^L(t) \quad (4.27)$$

$$\hat{Q}_p^k(t) \left(1 + \frac{d_l}{d_k} + \dots + \frac{d_m}{d_k} \right) = Q_p^L(t) \quad (4.28)$$

$$\hat{Q}_p^k(t) = \frac{Q_p^L(t)}{1 + \frac{d_l}{d_k} + \dots + \frac{d_m}{d_k}} \quad (4.29)$$

A partir de la estimación de caudal, se puede estimar el δ_0 óptimo que satisface la demanda hídrica y el despacho económico hídrico. Dicho cálculo se presenta en la ecuación (4.30).

$$\delta_0 = 2d_k B^2 h_p^2 \hat{Q}_p^k(t) + e_k B h_p + \bar{\lambda}_k B h_p \quad (4.30)$$

Las constantes B y h_p son conocidas, al igual que los parámetros del costo cuadrático d_k y e_k , mientras que $\bar{\lambda}_k$ se obtiene de cualquier seguidor que esté conectado al líder mediante la red de comunicaciones. Es suficiente con que un único seguidor esté conectado al líder para estimar $\delta_0(t)$.

Una vez calculado el δ_0 óptimo, el líder procede a enviarlo a todos los nodos seguidores, con tal de que lo consideren en el consenso de δ y con ello corregir cualquier desviación existente en el seguimiento de demanda. Lo comentado anteriormente, se visualiza en el nuevo esquema de control de los nodos seguidores.

$$Q_p^k(t) = Q_p^k(t-1) + \epsilon_k(t-1) \quad \forall k \in M \quad (4.31)$$

$$k_A \dot{\epsilon}_k(t) = - \sum_{k=1, l \neq k}^m \beta_{k,l}(t) [\delta_k(t) - \delta_l(t)] + \alpha_{k,0}(t) [\delta_k(t) - \delta_0(t)] \quad (4.32)$$

$$\delta_k(t) = 2d_k B^2 Q_p^k(t) h_p^2 + e_k B h_p + \bar{\lambda}_k(t) B h_p \quad (4.33)$$

$$\bar{\lambda}_k(t) = \frac{\sum_{i=1}^n \eta_{k,i}(t) \lambda_i(t)}{\max \{ \sum_{i=1}^n \eta_{k,i}(t), 1 \}} \quad (4.34)$$

$$\lambda_i(t) = 2a_i P_G^i(t) + b_i \quad (4.35)$$

El único cambio del esquema de control se observa en la ecuación (4.32), a la cual se le adiciona un término que corresponde a la diferencia entre el δ k-ésimo y el delta óptimo calculado por el líder, ponderado por $\alpha_{k,0}$ que corresponde al fragmento de la matriz de adyacencia que corrobora la comunicación entre el nodo seguidor y el líder.

La adición de $\alpha_{k,0}$ implica un cambio en la matriz de adyacencia. A continuación se muestra un ejemplo de matriz de adyacencia, para una red con 3 inversores, 3 bombas de agua, donde una sola bomba actúa como seguidor, es decir, tiene comunicación con el líder y las demás bombas son nodos independientes, como se aprecia en la Figura 4.6

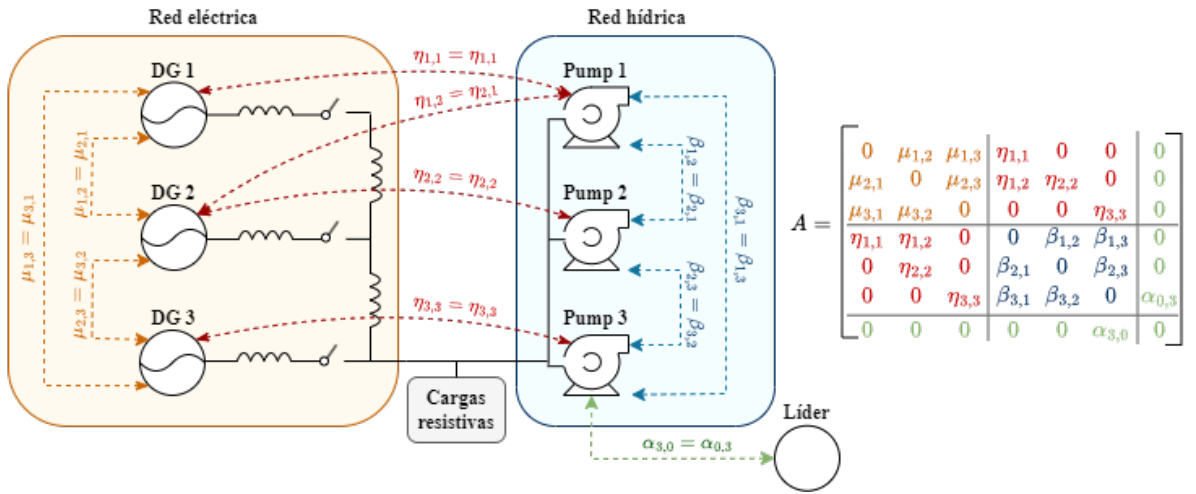


Figura 4.6: Ejemplo de red de comunicación, con comunicación cruzada entre inversores y bombas de agua, y un líder.

Por otro lado, los nodos independientes, que no poseen contacto directo con el líder, no consideran en su esquema de control el efecto de δ_0 en el consenso, manteniendo el esquema de control presentado en la sección anterior.

$$Q_p^k(t) = Q_p^k(t-1) + \epsilon_k(t-1) \quad \forall k \in M \quad (4.36)$$

$$k_3 \dot{\epsilon}_k(t) = - \sum_{k=1, l \neq k}^m \beta_{k,l}(t) [\delta_k(t) - \delta_l(t)] \quad (4.37)$$

$$\delta_k(t) = 2d_k B^2 Q_p^k(t) h_p^2 + e_k B h_p + \bar{\lambda}_k(t) B h_p \quad (4.38)$$

$$\bar{\lambda}_k(t) = \frac{\sum_{j=1}^n \eta_{k,j}(t) \lambda_j(t)}{\max \left\{ \sum_{j=1}^n \eta_{k,j}(t), 1 \right\}} \quad (4.39)$$

$$\lambda_i(t) = 2a_i P_G^i(t) + b_i \quad (4.40)$$

Las ecuaciones presentadas pueden ser presentadas en conjunto en un diagrama de control. El diagrama de la propuesta de control a llevar a cabo se presenta en la Figura 4.7.

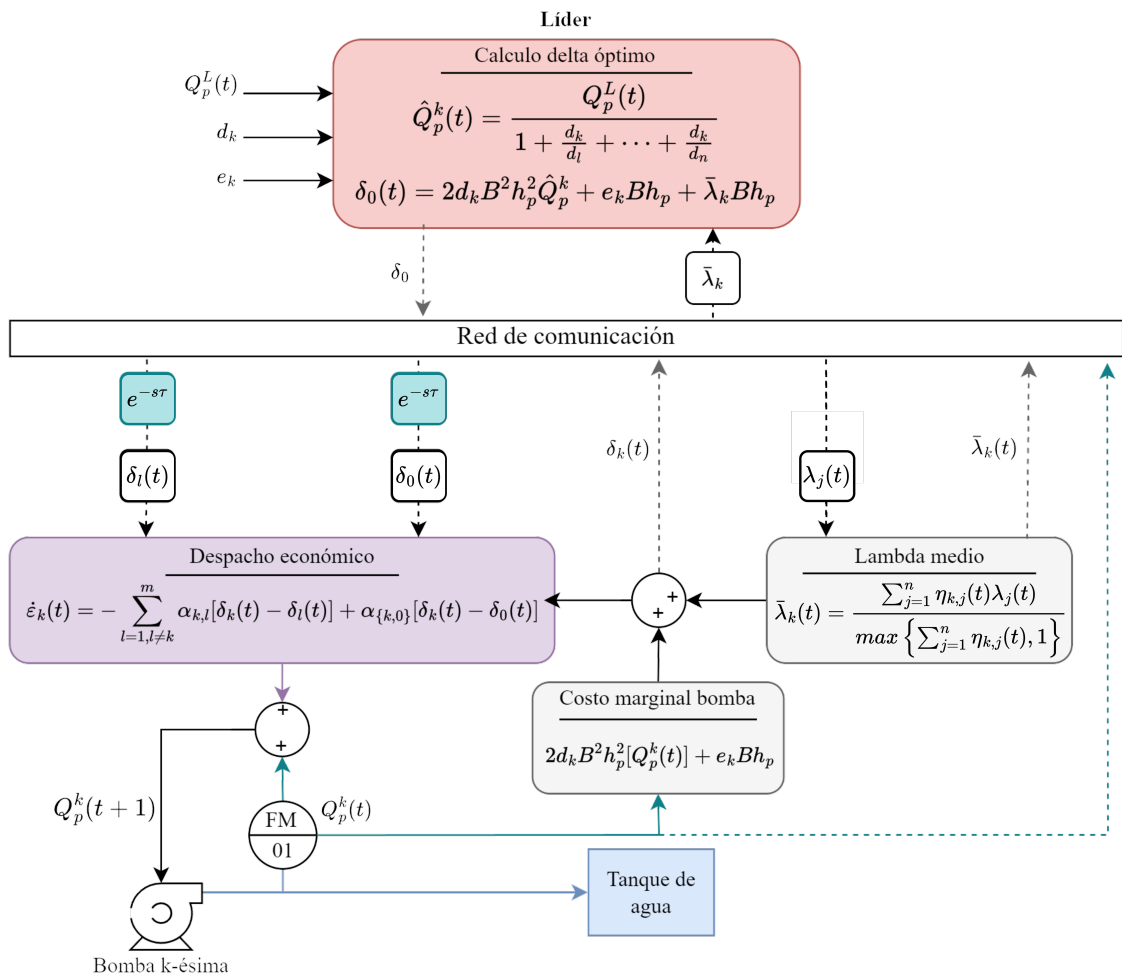


Figura 4.7: Diagrama de la propuesta de control cooperativo distribuido.

Presentado los esquemas de control del líder, los nodos seguidores y nodos independientes, se culmina la presentación de la propuesta del esquema de control secundario cooperativo distribuido. En el siguiente capítulo se presentan los resultados obtenidos de implementar la estrategia de control mediante simulación.

Capítulo 5

Resultados mediante simulación

5.1. Configuración de la micro-red

Para evaluar la efectividad de la estrategia de control propuesta, se realizaron pruebas de simulación, utilizando la configuración experimental de la micro-red presentada en la Figura 5.1. La topología de la micro-red está compuesta por cuatro unidades de generación distribuida AC, representadas por inversores ideales y alimentadas por fuentes trifásicas de 3 hilos controladas e ideales de tensión (ver Figura 5.2), que suministran potencia a tres cargas resistivas que representan demanda domiciliaria y a tres bombas de agua emuladas por cargas de potencia constante, que representan el vínculo entre la red eléctrica e hídrica. Para obtener los resultados se trabaja desde el inversor, ignorando la fuente de generación, buscando hacer más genérico el desarrollo.

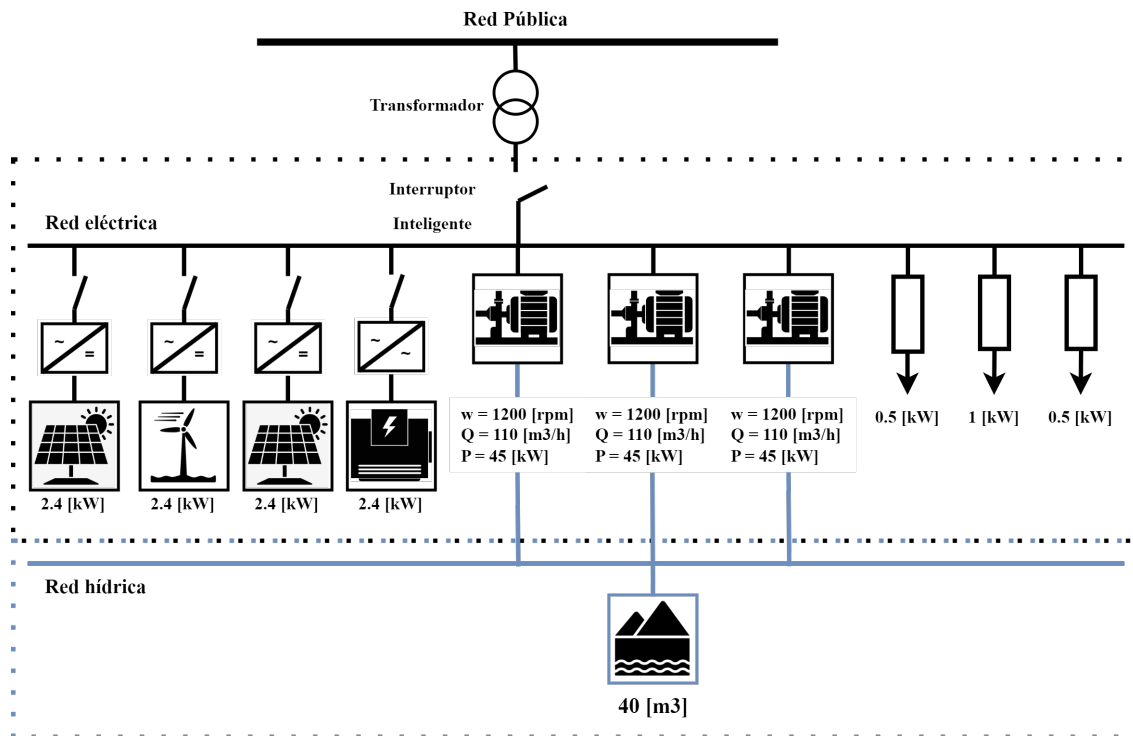


Figura 5.1: Diagrama de la micro-red.

Inversor

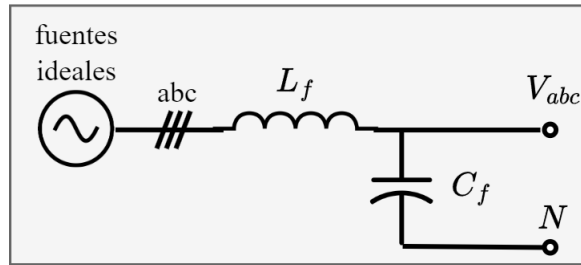


Figura 5.2: Diagrama de un inversor de la red.

Toda la implementación de la micro-red fue realizada mediante la librería de PLECS [69] de la empresa PLEXIM para Simulink, debido a que sus herramientas pueden aplicarse a muchas disciplinas de la ingeniería de electrónica de potencia, facilitando el modelado y la simulación de sistemas completos, incluidas fuentes de alimentación, convertidores de potencia y cargas.

Por otro lado, la implementación del esquema de control primario y secundario propuesto se realizó en la plataforma de Simulink [70] de Matlab, debido a que su esquema de diagramas de bloque puede ser utilizado para diseñar sistemas con modelos multidominio, simular antes de implementar en hardware y desplegar sin necesidad de escribir código.

En la simulación, las siguientes simplificaciones fueron consideradas, debido a que su alto ancho de banda es más rápido que los controladores estudiados y no son relevantes en la escala temporal de los controladores propuestos:

- No se trabaja desde la unidad de generación, sino que desde el inversor, representados por fuentes de tensión controlables.
- No se consideran técnicas de modulación (PWM, SVM) en los convertidores.
- No se considera la conmutación de los semiconductores.
- Bajo un punto de operación estable, el motor de inducción de una bomba de agua puede operar a velocidad constante, por ende, existe una relación lineal entre el caudal que extrae y la potencia que consume, por lo que puede representarse como una carga de potencia constante.

Para simular la red se utilizaron los parámetros de la Tabla 5.1 para caracterizar la red, los cuales se extrajeron a partir del setup experimental presentado en [26], mientras que los parámetros de la Tabla 5.2, extraídos de [38], caracterizan las unidades de generación utilizadas y la Tabla 5.3 presenta los parámetros de las bombas de agua.

Tabla 5.1: Parámetros de la micro-red.

Parámetro	Símbolo	Valor
Tiempo de muestreo primario	T_s	62.5 [μs]
Frecuencia nominal	ω_0	50 [Hz]
Tensión nominal	E_0	150 [V]
Condensador de filtro	C_f	70 [mF]
Inductancia de filtro	L_f	1.8 [mH]
Inductancia de acople	L_0	2.5 [mH]
Carga trifásica 1	Z_1	11 [Ω]/0,5[kW]
Carga trifásica 2	Z_2	11 [Ω]/0,5[kW]
Carga trifásica 3	Z_3	22 [Ω]/ 1[kW]
Impedancia de línea	$L_{i,j}$	2.5 [mH]

Tabla 5.2: Potencias y pendientes de Droop.

Parámetro	Símbolo	Unidad 1 - Unidad 3
Potencia aparente máxima	S_{max}	8.3 [kVA]
Potencia aparente mínima	S_{min}	0 [kVA]
Coefficiente de Droop P-W	m_i	$1,4e - 4 \frac{rad}{s \cdot VA}$
Coefficiente de Droop Q-V	n_i	$3,7e - 3 \frac{V}{VA}$

Tabla 5.3: Parámetros de las bombas de agua.

Parámetro	Símbolo	Valor
Densidad del agua a 20 °C	B	9782.4 [$\frac{kg}{m^3}$]
Distancia a levantar el agua	h_p	14.471 [m]
Potencia máxima	P_b^{max}	45 [kW]
Potencia mínima	P_b^{min}	0 [kW]

En la Tabla 5.4 se presentan los términos a_i , b_i y c_i del costo cuadrático de generación de los inversores, los cuales se definen a partir del costo del material de origen utilizado para la generación de energía. La función de coste se presenta en la ecuación (5.1). Los valores utilizados para las primeras 3 unidades se obtuvieron de [38], mientras que la cuarta unidad se escaló en un 70% del costo de la unidad más cara. Estos términos representan el coste de generación de las unidades de generación y su eficiencia en el punto de funcionamiento.

$$C_G^i(P_G^i(t)) = a_i [P_G^i(t)]^2 + b_i P_G^i(t) + c_i \quad (5.1)$$

Tabla 5.4: Parámetros del costo de generación de los inversores.

Parámetro	Unidad 1	Unidad 2	Unidad 3	Unidad 4
a [$\$/kW^2$]	0.264	0.444	0.500	0.350
b [$\$/kW$]	0.111	0.067	0.125	0.087
c [$\$$]	0.000	0.000	0.000	0.000

De igual manera, en la Tabla 5.5 se presentan los términos d_i , e_i y f_i del costo cuadrático de consumo de potencia de las bombas de agua. Sus valores se obtienen cuadruplicando, quintuplicando y sextuplicando los costos de las unidades 1, 2 y 3 respectivamente, con tal de que todas las bombas de agua tengan costos operacionales notablemente distintos. La función de costos en la cual se utilizan se presenta en la ecuación (5.2). Estos términos representan el coste de consumo de potencia de las bombas de agua y su eficiencia en el punto de funcionamiento.

$$C_p^k(Q_p^k(t)) = d_k[BQ_p^k(t)h_p]^2 + e_kBQ_p^k(t)h_p + f_k \quad (5.2)$$

Tabla 5.5: Parámetros del costo de consumo de las bombas de agua.

Parámetro	Bomba 1	Bomba 2	Bomba 3
d [$\$/kW^2$]	1.056	2.220	3.000
e [$\$/kW$]	0.268	0.555	0.750
f [$\$$]	0.000	0.000	0.000

Finalmente, en la Tabla 5.6 se presentan todas las constantes utilizadas en el control primario de la red, mientras que en la Tabla 5.7 se presentan las constantes utilizadas en el control secundario de la red, incluyendo el control secundario propuesto. El cálculo de dichos parámetros se realiza en el Anexo, en las secciones C y D respectivamente.

Tabla 5.6: Constantes del controlador primario.

Constante	Símbolo	Valor
Constante proporcional (control de corriente)	K_p^i	4.2726
Constante integral (control de corriente)	K_i^i	8389.2
Constante proporcional (control de tensión)	K_p^v	0.3519
Constante integral (control de tensión)	K_i^v	69.0872
Frecuencia de corte (filtro de desacople)	ω_c	1 [Hz]
Pendiente de frecuencia (control droop)	m_i	$1,4 \cdot 10^{-4} [\frac{rad}{s \cdot VA}]$
Pendiente de tensión (control droop)	n_i	$3,7 \cdot 10^{-3} [\frac{V}{VA}]$
Constante proporcional (PLL)	K_p^{PLL}	0.2453
Constante integral (PLL)	K_i^{PLL}	25.7085

Tabla 5.7: Constantes del controlador secundario.

Constante	Símbolo	Valor
Constante integral (restauración de tensión)	K_s^v	2.0170
Constante integral (restauración de frecuencia)	K_s^ω	2.0170
Constante integral (despacho eléctrico)	K_d^e	2.0262
Constante integral (despacho hídrico)	K_d^h	2.0262

5.2. Diseño de escenarios de prueba para evaluar la estrategia de control

La estrategia de control secundario cooperativo distribuido propuesto es puesta a prueba en 5 escenarios distintos, utilizando la micro-red de la figura 5.1 como base:

- El primer escenario presenta el comportamiento del controlador hídrico cuando la red experimenta cambios en la demanda del caudal.

- El segundo escenario muestra el comportamiento del sistema hídrico ante la presencia de latencias en la red de comunicación.
- El tercer escenario muestra los efectos de un fallo en la red de comunicación con las bombas.
- En el cuarto escenario valida la capacidad del controlador de llevar a cabo *plug-and-play*, al desconectar y reconectar la unidad 2 y 4 de generación de la red, en el lado eléctrico de la red y la bomba 3 del lado hídrico.
- El quinto escenario evalúa la efectividad del controlador ante distintos costos de operación de las bombas de agua, en consideración de que los costos de operación pueden fluctuar en el tiempo.

Los primeros cuatro escenarios fueron escogidos debido a que son los fenómenos más comunes a los que se enfrenta un controlador a nivel secundario [71, 72], mientras que el quinto es un estudio de sensibilidad del controlador. Un controlador distribuido debe tener un buen desempeño frente a problemas de comunicación, como retrasos y fallos de comunicación, además, es deseable tener la posibilidad de desconectar y reconectar las unidades de generación y las bombas de agua de la micro-red sin cambios en la programación de los controladores.

Debido a que el esquema de control propuesto para llevar a cabo la restauración de tensión y frecuencia, y el reparto de potencia activa, ha sido presentado con anterioridad en la literatura, se presentarán sus resultados solo para el primer escenario de estudio.

5.2.1. Escenario 1 (caso base): cambios de demanda

En este escenario, se estudia el desempeño del controlador propuesto en una micro-red agua-energía (ver Figura 5.1) cuando hay impactos de carga eléctricos y cambios de demanda hídrica. La prueba inicializa con el control primario activo (lazo interno y control droop), dos cargas conectadas (Z_1 y Z_2) en paralelo, el control secundario de tensión y frecuencia activo, el despacho económico eléctrico activo y las tres bombas de agua operativas en paralelo, satisfaciendo una demanda de $32,4[\frac{m^3}{s}]$, que equivale, aproximadamente, al riego diario de 15 hectáreas de cultivo [73], sin tener el controlador propuesto activo.

La matriz de adyacencia que representa la red de comunicaciones del escenario 1 se presenta en la figura 5.3. Dado que no hay fallas de comunicación, ni desconexión de equipos, la matriz de adyacencia será la misma para todo el escenario.

$$A(t) = \left(\begin{array}{cccc|ccc|c} 0 & \mu_{1,2} & \mu_{1,3} & \mu_{1,4} & \eta_{1,1} & \eta_{1,2} & \eta_{1,3} & \alpha_{0,1_i} \\ \mu_{2,1} & 0 & \mu_{2,3} & \mu_{2,4} & \eta_{2,1} & \eta_{2,2} & \eta_{2,3} & \alpha_{0,2_i} \\ \mu_{3,1} & \mu_{3,2} & 0 & \mu_{3,4} & \eta_{3,1} & \eta_{3,2} & \eta_{3,3} & \alpha_{0,3_i} \\ \mu_{4,1} & \mu_{4,2} & \mu_{4,3} & 0 & \eta_{4,1} & \eta_{4,2} & \eta_{4,3} & \alpha_{0,4_i} \\ \hline \eta_{1,1} & \eta_{1,2} & \eta_{1,3} & \eta_{1,4} & 0 & \beta_{1,2} & \beta_{1,3} & \alpha_{0,1_k} \\ \eta_{2,1} & \eta_{2,2} & \eta_{2,3} & \eta_{2,4} & \beta_{2,1} & 0 & \beta_{2,3} & \alpha_{0,2_k} \\ \eta_{3,1} & \eta_{3,2} & \eta_{3,3} & \eta_{3,4} & \beta_{3,1} & \beta_{3,2} & 0 & \alpha_{0,3_k} \\ \alpha_{1_i,0} & \alpha_{2_i,0} & \alpha_{3_i,0} & \alpha_{4_i,0} & \alpha_{1_k,0} & \alpha_{3_k,0} & \alpha_{2_k,0} & 0 \end{array} \right) = \left(\begin{array}{cccc|ccc|c} 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ \hline 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{array} \right)$$

Figura 5.3: Matriz de adyacencia del escenario base

Tras inicializar la simulación, en $t = 15[s]$, se habilita el despacho económico hídrico secundario propuesto con tal de igualar los costos marginales y con ello minimizar los costos de operación. En $t = 30[s]$ se aumenta la demanda hídrica en un 50 %, con tal de estudiar el funcionamiento del controlador en un cambio positivo de carga, en $t = 40[s]$ se conecta Z_3 , para visualizar el impacto de la red eléctrica en el controlador al añadir carga eléctrica, en $t = 50[s]$ se disminuye la demanda hídrica en un 50 % del total, con tal de evaluar el funcionamiento del controlador en un cambio de demanda negativo y en $t = 60[s]$ se desconecta Z_1 , para estudiar el efecto de la red eléctrica en el controlador al disminuir la carga eléctrica. Los resultados obtenidos al simular el escenario 1 se presentan en las Figuras 5.4, 5.5 y 5.6.

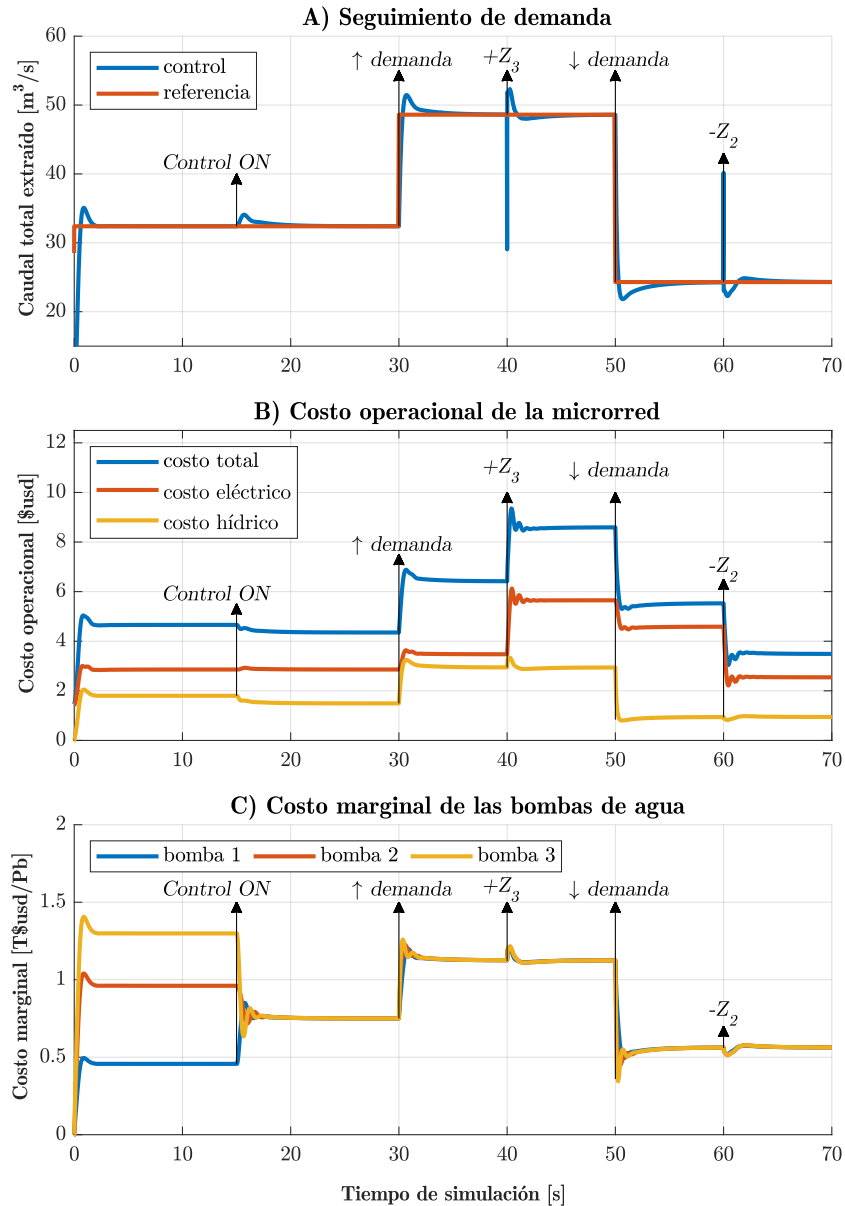


Figura 5.4: Resultado escenario 1: A) seguimiento de demanda hídrica, B) costo operacional de la red y C) costo marginal de las bombas de agua.

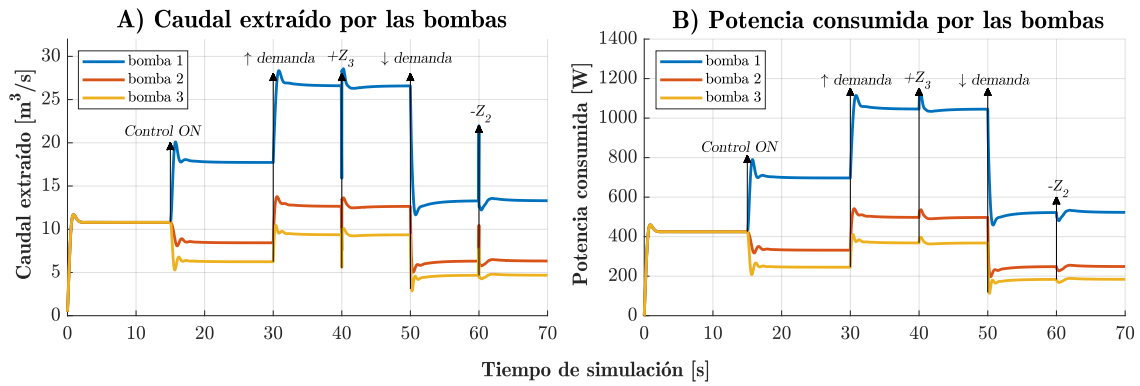


Figura 5.5: Resultado escenario 1: A) Caudal extraído por cada bomba de agua y B) la potencia consumida por cada una de estas.

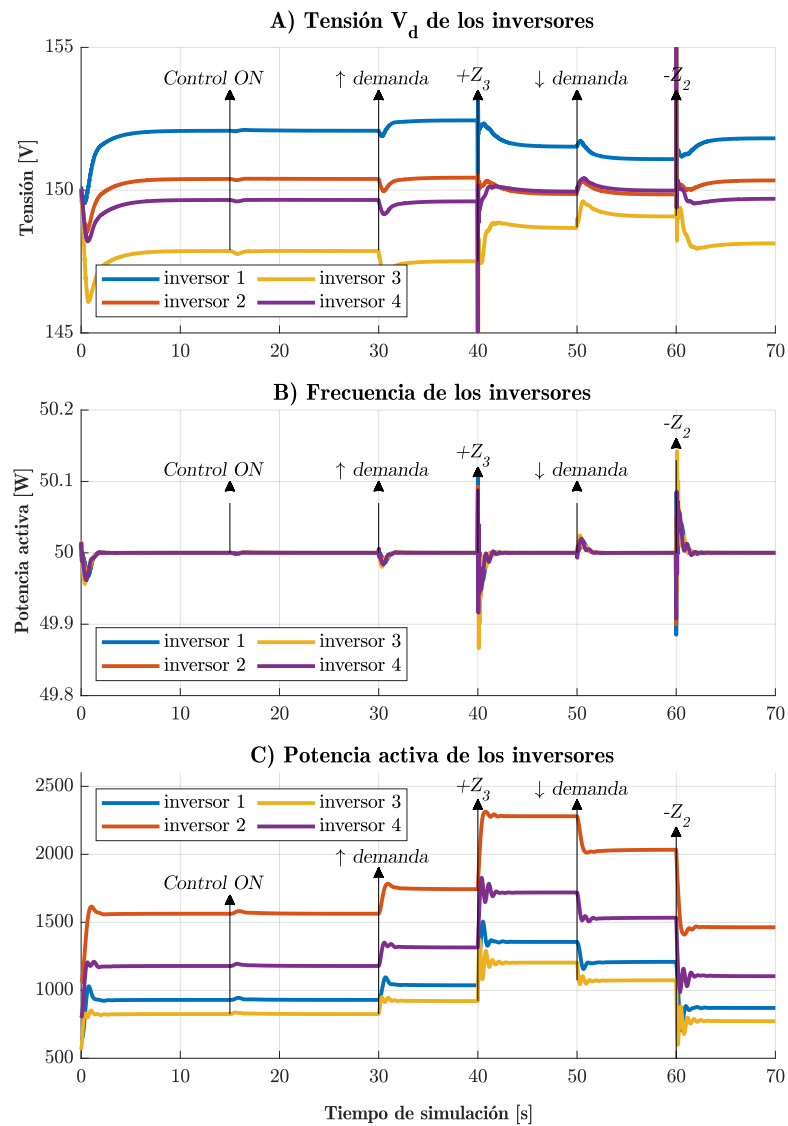


Figura 5.6: Resultado escenario 1: A) Tensión de la red y B) potencia activa aportada por cada inverter.

Como la simulación comienza sin el controlador propuesto activo, se observa en la Figura 5.5 que el caudal extraído (ver Figura 5.5(A)) y la potencia consumida por las bombas de agua (ver Figura 5.5(B)) es igual, no así su costo (ver Figura 5.4(C)), que se calcula con los términos del costo cuadrático de la Tabla 5.5.

Posteriormente en $t = 15[s]$, se puede observar en la Figura 5.4(A) que el activar controlador propuesto no afecta el seguimiento de demanda, permitiendo que esta se satisfaga sin problemas. Por otro lado, se puede apreciar en la Figura 5.4(B) que el activar el controlador propuesto si tiene un efecto en el costo operacional de la red, reduciéndolo de \$4,694 a \$4,387, lo que equivale a una reducción del 7% del costo total aproximadamente, que según la escala de la red, puede implicar un ahorro importante para el usuario. Finalmente, en la Figura 5.4(C) se aprecia que la condición de optimalidad se cumple, es decir, que se igualen los costos operacionales de las bombas de agua involucradas, una vez encendido el controlador.

Por otro lado, se observa en la Figura 5.5(A) que al activar el controlador propuesto, se redistribuye el caudal que extrae cada una de las bombas de agua involucradas. También se puede observar en la Figura 5.5(B) que el caudal extraído por cada bomba es proporcional a la potencia que este consume, resaltando el vínculo existente entre el caudal y la potencia establecido en la ecuación (4.2) del capítulo 4 sección 1.

Tanto en $t = 40[s]$ como en $t = 60[s]$ se puede observar en la Figura 5.5(A) que un cambio en la red eléctrica si afecta al controlador hídrico, generando un *peak* de caudal que se controla rápidamente. Esto se debe a que el controlador considera los valores de $\bar{\lambda}_i$ en el consenso entre bombas de agua, lo que provoca que, de haber un cambio en la red eléctrica, se genere un desbalance y con ello una perturbación en el sistema. Debido a que hay un *peak* en el caudal extraído por cada una de las bombas, se puede observar un *peak* en el seguimiento de demanda de la Figura 5.4(A).

Con respecto a los cambios de demanda que ocurren en $t = 30[s]$ y $t = [50]$, se puede apreciar en la Figura 5.4 que el controlador es capaz de abordarlas sin pérdida de caudal, distribuyendo el caudal entre las bombas acorde al coste de estas (ver Figura 5.5(A)).

Finalmente, se puede observar en la figura 5.6 que los objetivos de la red eléctrica se cumplen, es decir, se mantiene estable la tensión en torno a los $150[V]$ y se mantiene la frecuencia en torno a los $50[Hz]$. De igual manera (menor o igual a su capacidad máxima de generación), la potencia se mantiene en los márgenes de generación deseados, es positiva y está distribuida acorde al despacho económico eléctrico, lo que indica la correcta operación de los componentes de la red.

5.2.2. Escenario 2: retardo en la comunicación

En este escenario, se estudia el desempeño del controlador propuesto en la micro-red agua-energía objetivo cuando hay retardos constantes ($\tau_{k,l}$) en los enlaces de comunicación de las bombas de agua, en la red de comunicación del controlador, como se observa en la Figura 5.7. Fuera del retardo, se aplican los mismos impactos de carga y cambios de demanda del escenario 1.

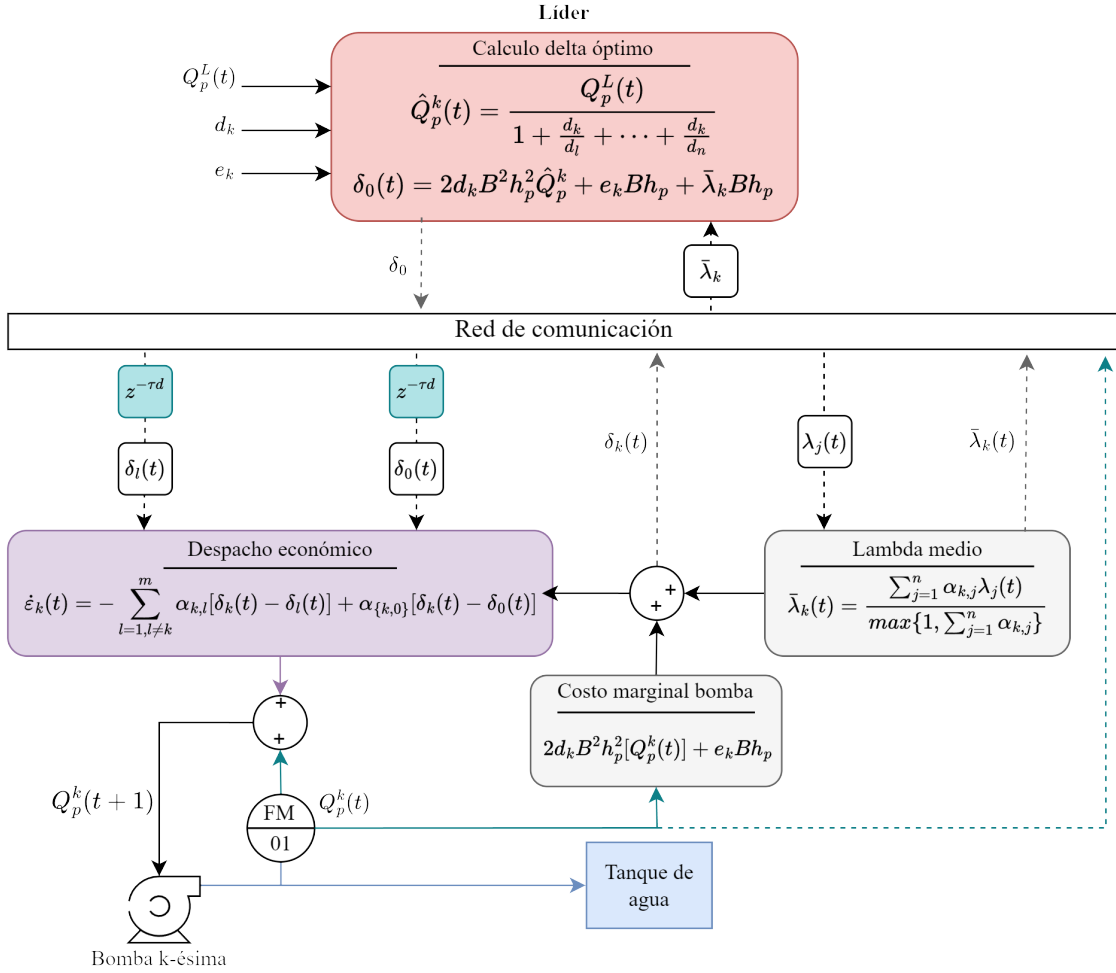


Figura 5.7: Retardos en la red de comunicación.

En este estudio, dos casos son considerados: 1) existe un retardo $\tau_{k,l} = 0,05[s]$ a la salida del controlador y 2) existe un retardo $\tau_{k,l} = 1[s]$ que equivale a 20 veces el tiempo de muestreo del control secundario. Como el escenario repite los mismos fenómenos del escenario 1, y ya se vislumbró que el controlador funciona en dicho escenario, se presentaron únicamente los efectos de los retardos a través del análisis del consenso de los costos marginales. Los resultados de ambos casos muestran en la figura 5.8, resultados adicionales en el Anexo D.

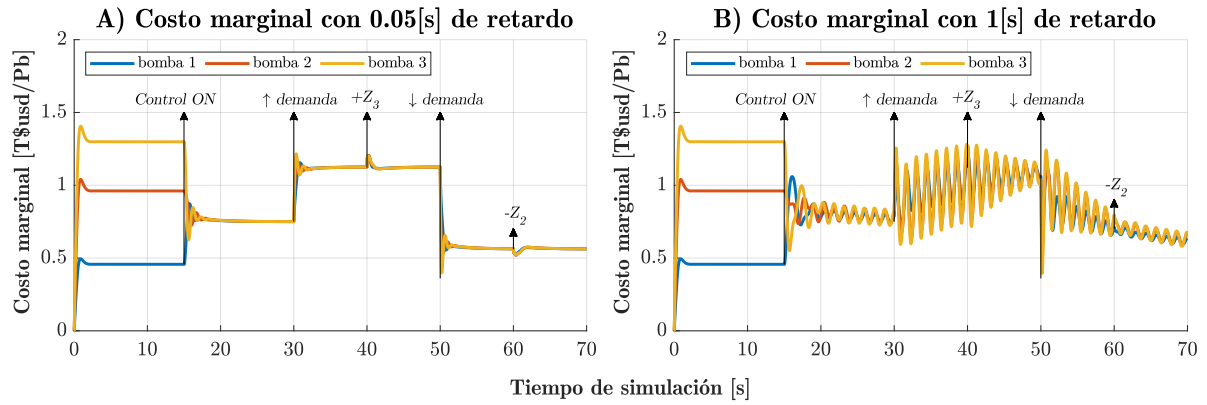


Figura 5.8: Escenario 2: (A) evolución de la red con 0,05[s] de retardo y (B) evolución de la red con 1[s] de retardo.

Al contrastar la Figura 5.8(A) con la Figura 5.8(B) se puede apreciar que la diferencia entre tener un retardo de 0,05[s] y uno de 1[s] es amplia. Esto se debe a que el control DAPI, que conforma el esquema de control, calcula las acciones de control mediante un controlador PI, el cual, por sí solo, no es resiliente a los retardos comunicacionales. Por lo anterior, los resultados que se obtienen son inestables o tardan mucho en estabilizarse, lo que puede ser dañino para los equipos eléctricos, si se opera en torno a sus límites operacionales.

También se puede observar en la Figura 5.8(A), que un retardo de 0,05[s] genera perturbaciones menores en el controlador, aumentando levemente el tiempo de estabilización. Debido a que el retardo es pequeño y constante, el control DAPI es capaz de sobrellevarlo. Si el retardo aumenta, se obtendrán los resultados de 5.8(B), donde el sistema tiene un tiempo de estabilización mayor, empeorando su tiempo de respuesta ante perturbaciones.

Dado que el retardo de comunicación es constante y conocido, puede diseñarse un controlador, como el predictor Smith, que considere dicho retardo y anule su efecto en el control. Por otro lado, si el retardo del sistema es variable en el tiempo, es recomendable aplicar estrategias de control avanzadas, como control predictivo adaptativo, para sobrellevar el retardo.

5.2.3. Escenario 3: falla de comunicación

En este escenario se evalúa el desempeño del controlador contra fallas en los enlaces de comunicación. Para ello, se comienza la simulación con 2 cargas conectadas (Z_1 y Z_2), el control primario activo, el control secundario de tensión y frecuencia activo, el despacho económico eléctrico activo y las tres bombas de agua operativas en paralelo, satisfaciendo una demanda de $32,4[\frac{m^3}{s}]$ caudal sin tener el controlador propuesto activo.

Tras empezar la simulación, en $t = 15[s]$ se activa el controlador y en $t = 30[s]$ se fuerzan cuatro fallas de comunicación distintas en cuatro casos de estudio distintos:

1. Falla de comunicación entre el inversor 4 y las bombas de agua, señalada en la matriz de adyacencia de la Figura 5.9.
2. Falla de comunicación entre la bomba 2 y la bomba 1, como se señala en la matriz de

adyacencia de la Figura 5.10.

3. Falla de comunicación entre la bomba 1 y la bomba 3, y falla de comunicación entre el inversor 2 y el resto de las bombas, como se señala en la matriz de adyacencia de la Figura 5.11.
4. Falla de comunicación de todos los inversores con las bombas de agua, presentado en la matriz de adyacencia de la Figura 5.12.

El objetivo de probar variadas fallas de comunicación es estudiar si la estrategia de control propuesta es capaz de sobrellevar las fallas de comunicación y calcular la acción de control óptima, cubriendo la demanda solicitada. En $t = 45[s]$ se aumenta la demanda hídrica en un 50 % y en $t = 60[s]$ se desconecta Z_2 . Las matrices de adyacencia de los cuatro casos se presentan en las Figuras 5.9, 5.10, 5.11 y 5.12.

$$A(t) = \left(\begin{array}{cccc|ccc|c} 0 & \mu_{1,2} & \mu_{1,3} & \mu_{1,4} & \eta_{1,1} & \eta_{1,2} & \eta_{1,3} & \alpha_{0,1_i} \\ \mu_{2,1} & 0 & \mu_{2,3} & \mu_{2,4} & \eta_{2,1} & \eta_{2,2} & \eta_{2,3} & \alpha_{0,2_i} \\ \mu_{3,1} & \mu_{3,2} & 0 & \mu_{3,4} & \eta_{3,1} & \eta_{3,2} & \eta_{3,3} & \alpha_{0,3_i} \\ \mu_{4,1} & \mu_{4,2} & \mu_{4,3} & 0 & \eta_{4,1} & \eta_{4,2} & \eta_{4,3} & \alpha_{0,4_i} \\ \hline \eta_{1,1} & \eta_{1,2} & \eta_{1,3} & \eta_{1,4} & 0 & \beta_{1,2} & \beta_{1,3} & \alpha_{0,1_k} \\ \eta_{2,1} & \eta_{2,2} & \eta_{2,3} & \eta_{2,4} & \beta_{2,1} & 0 & \beta_{2,3} & \alpha_{0,2_k} \\ \eta_{3,1} & \eta_{3,2} & \eta_{3,3} & \eta_{3,4} & \beta_{3,1} & \beta_{3,2} & 0 & \alpha_{0,3_k} \\ \hline \alpha_{1_i,0} & \alpha_{2_i,0} & \alpha_{3_i,0} & \alpha_{4_i,0} & \alpha_{1_k,0} & \alpha_{3_k,0} & \alpha_{2_k,0} & 0 \end{array} \right) = \left(\begin{array}{cccc|ccc|c} 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ \hline 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{array} \right)$$

Figura 5.9: Matriz de adyacencia del escenario 3, caso 1.

$$A(t) = \left(\begin{array}{cccc|ccc|c} 0 & \mu_{1,2} & \mu_{1,3} & \mu_{1,4} & \eta_{1,1} & \eta_{1,2} & \eta_{1,3} & \alpha_{0,1_i} \\ \mu_{2,1} & 0 & \mu_{2,3} & \mu_{2,4} & \eta_{2,1} & \eta_{2,2} & \eta_{2,3} & \alpha_{0,2_i} \\ \mu_{3,1} & \mu_{3,2} & 0 & \mu_{3,4} & \eta_{3,1} & \eta_{3,2} & \eta_{3,3} & \alpha_{0,3_i} \\ \mu_{4,1} & \mu_{4,2} & \mu_{4,3} & 0 & \eta_{4,1} & \eta_{4,2} & \eta_{4,3} & \alpha_{0,4_i} \\ \hline \eta_{1,1} & \eta_{1,2} & \eta_{1,3} & \eta_{1,4} & 0 & \beta_{1,2} & \beta_{1,3} & \alpha_{0,1_k} \\ \eta_{2,1} & \eta_{2,2} & \eta_{2,3} & \eta_{2,4} & \beta_{2,1} & 0 & \beta_{2,3} & \alpha_{0,2_k} \\ \eta_{3,1} & \eta_{3,2} & \eta_{3,3} & \eta_{3,4} & \beta_{3,1} & \beta_{3,2} & 0 & \alpha_{0,3_k} \\ \hline \alpha_{1_i,0} & \alpha_{2_i,0} & \alpha_{3_i,0} & \alpha_{4_i,0} & \alpha_{1_k,0} & \alpha_{3_k,0} & \alpha_{2_k,0} & 0 \end{array} \right) = \left(\begin{array}{cccc|ccc|c} 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ \hline 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{array} \right)$$

Figura 5.10: Matriz de adyacencia del escenario 3, caso 2.

$$A(t) = \left(\begin{array}{cccc|ccc|c} 0 & \mu_{1,2} & \mu_{1,3} & \mu_{1,4} & \eta_{1,1} & \eta_{1,2} & \eta_{1,3} & \alpha_{0,1_i} \\ \mu_{2,1} & 0 & \mu_{2,3} & \mu_{2,4} & \eta_{2,1} & \eta_{2,2} & \eta_{2,3} & \alpha_{0,2_i} \\ \mu_{3,1} & \mu_{3,2} & 0 & \mu_{3,4} & \eta_{3,1} & \eta_{3,2} & \eta_{3,3} & \alpha_{0,3_i} \\ \mu_{4,1} & \mu_{4,2} & \mu_{4,3} & 0 & \eta_{4,1} & \eta_{4,2} & \eta_{4,3} & \alpha_{0,4_i} \\ \hline \eta_{1,1} & \eta_{1,2} & \eta_{1,3} & \eta_{1,4} & 0 & \beta_{1,2} & \beta_{1,3} & \alpha_{0,1_k} \\ \eta_{2,1} & \eta_{2,2} & \eta_{2,3} & \eta_{2,4} & \beta_{2,1} & 0 & \beta_{2,3} & \alpha_{0,2_k} \\ \eta_{3,1} & \eta_{3,2} & \eta_{3,3} & \eta_{3,4} & \beta_{3,1} & \beta_{3,2} & 0 & \alpha_{0,3_k} \\ \hline \alpha_{1_i,0} & \alpha_{2_i,0} & \alpha_{3_i,0} & \alpha_{4_i,0} & \alpha_{1_k,0} & \alpha_{3_k,0} & \alpha_{2_k,0} & 0 \end{array} \right) = \left(\begin{array}{cccc|ccc|c} 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ \hline 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{array} \right)$$

Figura 5.11: Matriz de adyacencia del escenario 3, caso 3.

$$A(t) = \begin{pmatrix} 0 & \mu_{1,2} & \mu_{1,3} & \mu_{1,4} & \eta_{1,1} & \eta_{1,2} & \eta_{1,3} & \alpha_{0,1i} \\ \mu_{2,1} & 0 & \mu_{2,3} & \mu_{2,4} & \eta_{2,1} & \eta_{2,2} & \eta_{2,3} & \alpha_{0,2i} \\ \mu_{3,1} & \mu_{3,2} & 0 & \mu_{3,4} & \eta_{3,1} & \eta_{3,2} & \eta_{3,3} & \alpha_{0,3i} \\ \mu_{4,1} & \mu_{4,2} & \mu_{4,3} & 0 & \eta_{4,1} & \eta_{4,2} & \eta_{4,3} & \alpha_{0,4i} \\ \hline \eta_{1,1} & \eta_{1,2} & \eta_{1,3} & \eta_{1,4} & 0 & \beta_{1,2} & \beta_{1,3} & \alpha_{0,1k} \\ \eta_{2,1} & \eta_{2,2} & \eta_{2,3} & \eta_{2,4} & \beta_{2,1} & 0 & \beta_{2,3} & \alpha_{0,2k} \\ \eta_{3,1} & \eta_{3,2} & \eta_{3,3} & \eta_{3,4} & \beta_{3,1} & \beta_{3,2} & 0 & \alpha_{0,3k} \\ \hline \alpha_{1i,0} & \alpha_{2i,0} & \alpha_{3i,0} & \alpha_{4i,0} & \alpha_{1k,0} & \alpha_{3k,0} & \alpha_{2k,0} & 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

Figura 5.12: Matriz de adyacencia del escenario 3, caso 4.

Los resultados del primer caso de estudio se muestra a cabalidad en la Figura 5.13, mientras que los costos marginales del resto de casos de estudio se muestran en la Figura 5.14.

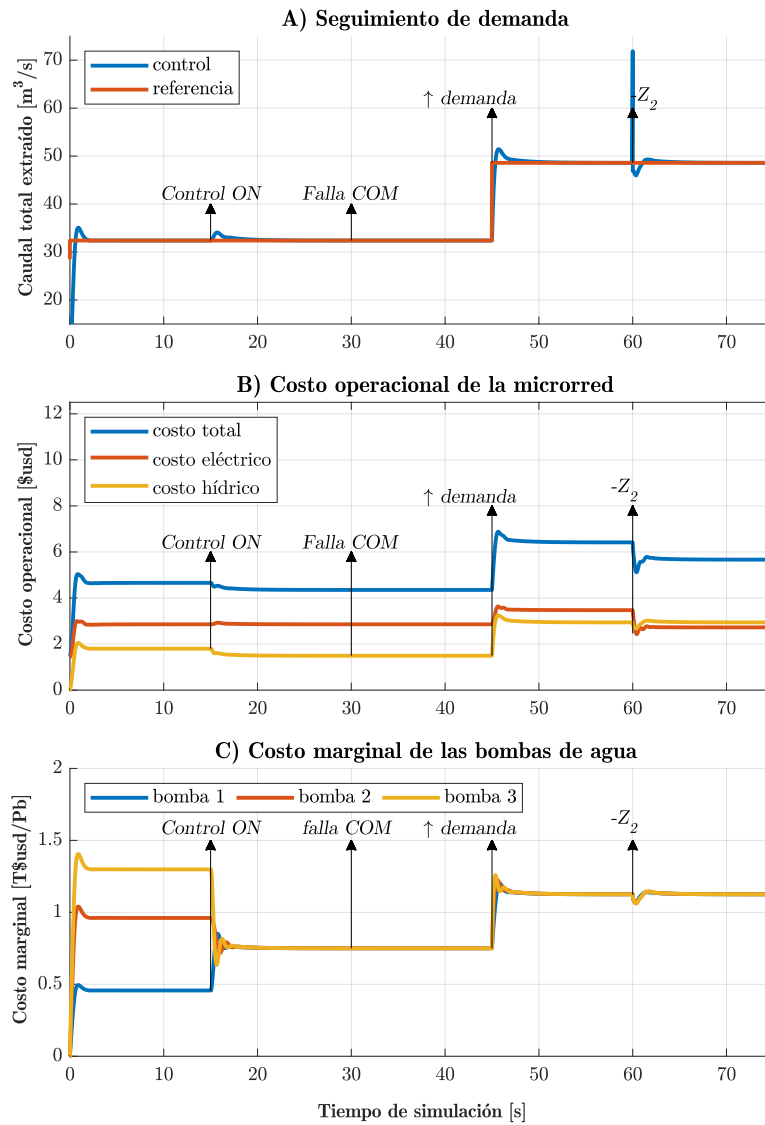


Figura 5.13: Escenario 3, caso 1: fallo de comunicación entre inversores y bombas de agua; A) seguimiento de demanda, B) costo operacional de la red y C) costo marginal de las bombas de agua.

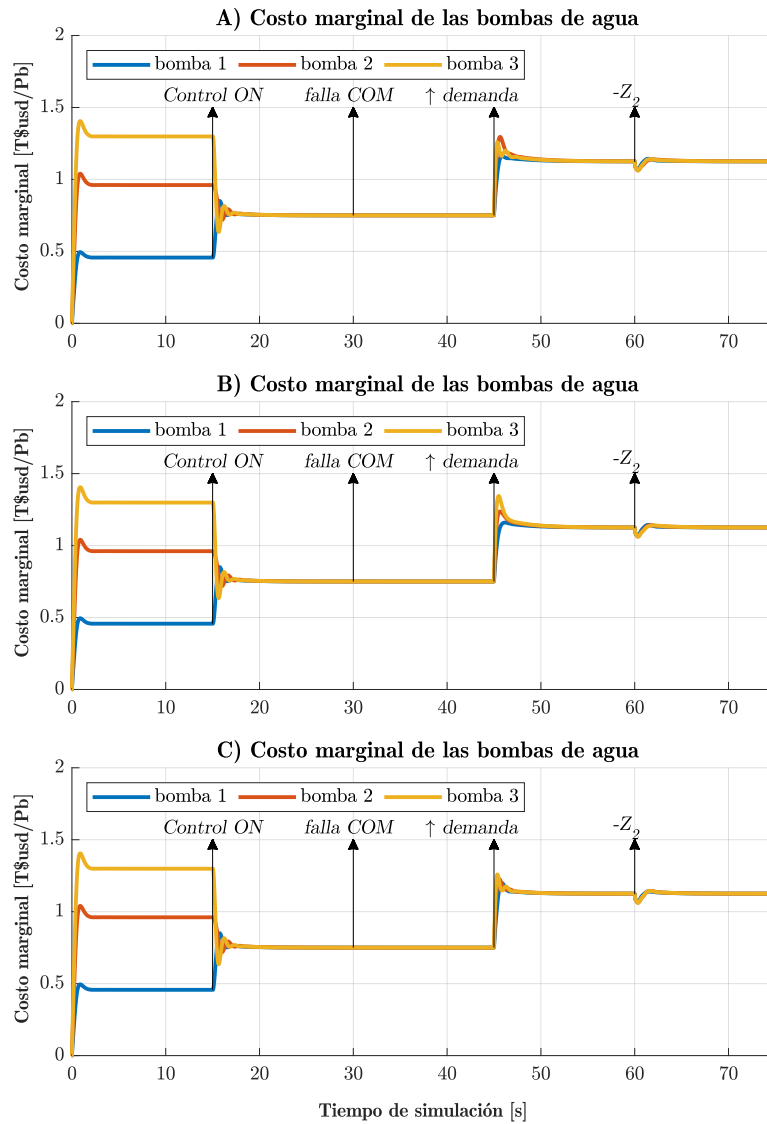


Figura 5.14: Escenario 3: A) fallo de comunicación entre bombas de agua; B) fallo de comunicación múltiple y C) falla total de comunicación entre bombas de agua e inversores.

A partir del primer caso de estudio, presentado en la Figura 5.13, se puede observar en la Figura 5.13(C) que la falla comunicacional entre un inversor y el resto de las bombas de agua no afecta al controlador. Esto se debe a que el controlador opera con un promedio de lambdas ($\bar{\lambda}_i$) que puede recalcularse si se pierde la comunicación con un inversor. Además, en un punto de operación estable, todos los $\lambda_i(t)$ han de ser iguales y por consiguiente los $\bar{\lambda}_k(t)$ también han de ser iguales, por lo tanto, se alcanza el consenso de igual manera. Debido a que el controlador no es afectado por la falla de comunicación, las Figuras 5.13(A) y 5.13(B) no sufren cambios.

De igual manera, en el segundo caso de estudio (ver Figura 5.14(A)), se puede apreciar que el consenso de los multiplicadores de Lagrange no sufre ningún cambio ante una falla en la comunicación de las bombas. Esto se debe a que, la falla de comunicación entre la bomba 1 y la bomba 2 es remediada mediante el *spanning tree* y la red de comunicación. Debido

a que el controlador no es afectado, los resultados obtenidos en la Figura 5.13 son equivalentes.

En el tercer caso de estudio, se mezclan las fallas comunicacionales de los primeros dos casos de estudio, es decir, se genera una falla comunicacional entre bombas de agua y entre inversores y bombas de agua, con tal de estudiar si existe relación entre las fallas de comunicación. Analizando la Figura 5.14(B), se puede observar que el controlador es capaz de sobrellevar ambas fallas comunicacionales de manera simultánea. Debido a que el controlador no es afectado, los resultados obtenidos en la Figura 5.13 son equivalentes.

El cuarto y último caso de estudio (ver Figura 5.14 (C)) se realizó con la idea de verificar si el controlador es capaz de operar en una situación extrema donde se independice la red de comunicación eléctrica y la red de comunicación hídrica, producto de una falla de comunicación. Por ello, la falla de comunicación estudiada es el corte total de comunicación entre inversores y bombas de agua. Como resultado, se puede observar en la figura 5.14(C), que el controlador es capaz de sobrellevar la falla de manera óptima, debido a que la influencia de la red eléctrica sobre la red hídrica no es tan grande en términos de magnitud. Debido a que el controlador no es afectado, los resultados obtenidos en la Figura 5.13 son equivalentes.

5.2.4. Escenario 4: plug-and-play

Este escenario evalúa el desempeño del controlador ante una falla total no planificada de una bomba de agua. La simulación comienza con 2 cargas conectadas (Z_1 y Z_2), el control primario activo, el control secundario de tensión y frecuencia activo, el despacho económico eléctrico activo, las tres bombas de agua operativas en paralelo, satisfaciendo una demanda de $32,4 \frac{m^3}{s}$ de caudal sin tener el controlador propuesto activo.

En $t = 15s$, se activa el controlador propuesto, en $t = 30[s]$, se desconecta la bomba de agua 1 de la red hídrica de la micro-red, cortando su comunicación con todos los agentes de la red de comunicación, emulando una falla total del equipo. Producto de ello se modifica la matriz de adyacencia como se muestra en la Figura 5.15. En $t = 45[s]$ se aumenta la demanda hídrica en un %50, en $t = 60[s]$ se conecta Z_3 . A los $t = 75[s]$ se reconecta la bomba a la red y en $t = 90[s]$ se disminuye la demanda en un %50 del total. Los resultados de la simulación se presentan en la Figura 5.16.

$$A(t) = \left(\begin{array}{cccc|ccc|c} 0 & \mu_{1,2} & \mu_{1,3} & \mu_{1,4} & \eta_{1,1} & \eta_{1,2} & \eta_{1,3} & \alpha_{0,1i} \\ \mu_{2,1} & 0 & \mu_{2,3} & \mu_{2,4} & \eta_{2,1} & \eta_{2,2} & \eta_{2,3} & \alpha_{0,2i} \\ \mu_{3,1} & \mu_{3,2} & 0 & \mu_{3,4} & \eta_{3,1} & \eta_{3,2} & \eta_{3,3} & \alpha_{0,3i} \\ \mu_{4,1} & \mu_{4,2} & \mu_{4,3} & 0 & \eta_{4,1} & \eta_{4,2} & \eta_{4,3} & \alpha_{0,4i} \\ \hline \eta_{1,1} & \eta_{1,2} & \eta_{1,3} & \eta_{1,4} & 0 & \beta_{1,2} & \beta_{1,3} & \alpha_{0,1b} \\ \eta_{2,1} & \eta_{2,2} & \eta_{2,3} & \eta_{2,4} & \beta_{2,1} & 0 & \beta_{2,3} & \alpha_{0,2b} \\ \eta_{3,1} & \eta_{3,2} & \eta_{3,3} & \eta_{3,4} & \beta_{3,1} & \beta_{3,2} & 0 & \alpha_{0,3b} \\ \hline \alpha_{1i,0} & \alpha_{2i,0} & \alpha_{3i,0} & \alpha_{4i,0} & \alpha_{1b,0} & \alpha_{3b,0} & \alpha_{2b,0} & 0 \end{array} \right) = \left(\begin{array}{cccc|ccc|c} 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ \hline 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{array} \right)$$

Figura 5.15: Matriz de adyacencia del escenario 4.

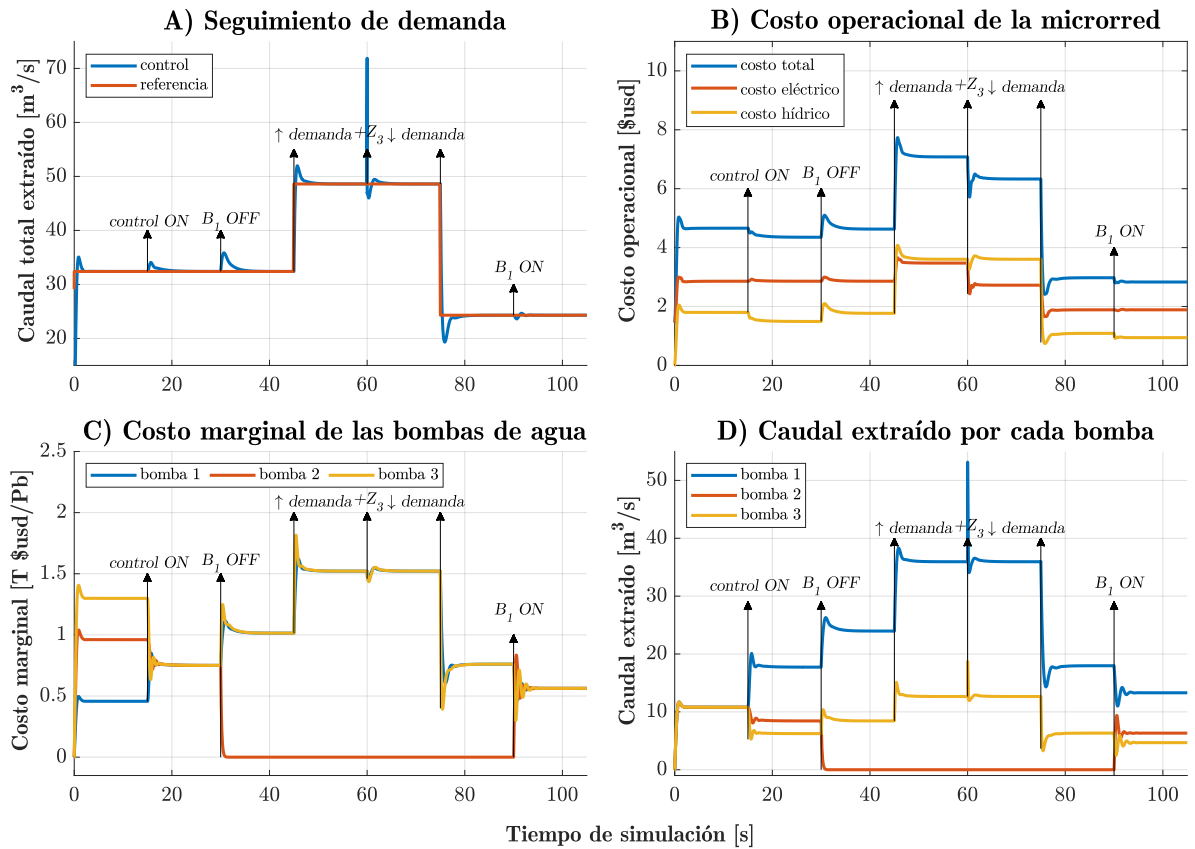


Figura 5.16: Escenario 4: desconexión de bomba de agua; A) seguimiento de demanda, B) costo operacional de la red, C) costo marginal de las bombas de agua y D) Caudal extraído por cada bomba.

La figura 5.16(A), demuestra que, tras desconectarse la bomba 2 (en $t = 30[s]$), esta deja de extraer agua y por ello, se redistribuye la extracción de agua entre las otras dos bombas de agua activas. La redistribución económica del caudal se observa en la figura 5.16(C), donde se trata de converger el costo marginal de las bombas operativas. Producto de esto, se logra mantener el despacho económico hídrico, pero no la reducción del costo operacional, como se observa en la Figura 5.16(B), debido a que la bomba 3, que es la más costosa, debe proporcionar más caudal para satisfacer la demanda, hecho que se observa en la figura 5.16(D).

Una vez reconectada la bomba B (en $t = 75[s]$), se puede observar en la Figura 5.16(C) que los costos marginales de las 3 bombas de agua vuelven a igualarse, lo que conlleva una redistribución del caudal que cada una de las bombas de agua estaba extrayendo (ver Figura 5.16(D)) y una reducción en los costos operacionales de la red (ver Figura 5.16(B)).

5.2.5. Escenario 5: cambio en los costos de operación

En este escenario se busca evaluar la operación del controlador cuando el costo de operación es distinto al estudiado, para poder visualizar cuan genéricos son los resultados presentados anteriormente, por ello se aumentan en un 20 % los costos de la función de costos cuadrática, obteniendo los términos de la Tabla 6.6.

Tabla 5.8: Nuevos parámetros del costo de consumo de las bombas de agua

Parámetro	Bomba 1	Bomba 2	Bomba 3
d [$\$/kW^2$]	1.056	3.108	3.000
e [$\$/kW$]	0.268	0.777	0.750
f [$\$$]	0.000	0.000	0.000

Para facilitar la comparación del efecto de tener costos de operación distintos, se lleva a cabo el escenario 1, con los nuevos costos de operación. Es decir, la simulación comienza con 2 cargas conectadas (Z_1 y Z_2), el control primario activo, el control secundario de tensión y frecuencia activo, el despacho económico eléctrico activo, las tres bombas de agua operativas en paralelo, satisfaciendo una demanda de $32,4[\frac{m^3}{s}]$ de caudal sin tener el controlador propuesto activo.

En $t = 15[s]$, se habilita el despacho económico hídrico secundario propuesto con tal de igualar los costos marginales y con ello minimizar los costos de operación. En $t = 30[s]$ se aumenta la demanda hídrica en un $\%50$, en $t = 40[s]$ se conecta Z_3 , en $t = 50[s]$ se disminuye la demanda en un $\%50$ del total y en $t = 60[s]$ se desconecta Z_1 . Los resultados del escenario de estudio se presentan en la Figura 5.17.

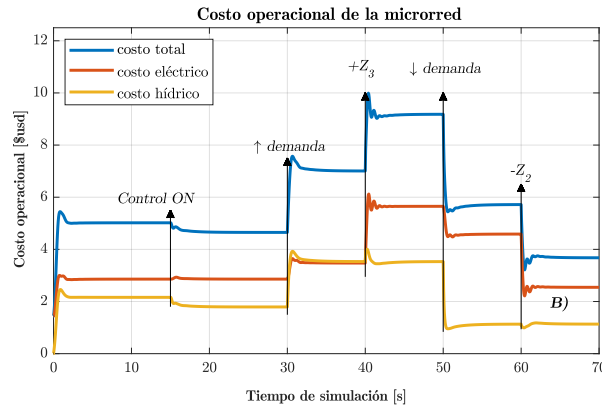


Figura 5.17: Escenario 5: aumento del costo de operación en un 20%.

Dado que, ya se probó la efectividad del controlador ante los impactos de carga y los cambios de demanda, se comparará únicamente la reducción de costos operacionales, realizados por el controlador, con los costos del escenario 1 y escenario 5. Al analizar los resultados del escenario 5, en la Figura 5.17, se puede observar que al encenderse el controlador propuesto a los $t = 30[s]$, se reducen los costos operacionales de la red de \$4,948 a \$4,507, lo que equivale a una reducción de costos del $\%9,8$, mayor a lo obtenido en el escenario de estudio 1, que equivale a un 7% , lo que quiere decir que la reducción de costos que puede llevar a cabo el controlador es proporcional a los términos de la función de costos cuadrática.

5.3. Discusión

En este capítulo se presenta una novedosa estrategia de control distribuido para el despacho económico hídrico de micro-redes agua-energía. El objetivo del controlador propuesto es

satisfacer la demanda eléctrica-hídrica, realizando el despacho económico óptimo y con ello reducir los costos operacionales de la micro-red. La estrategia propuesta consigue el despacho económico de las bombas de agua de forma distribuida a través del concepto de consenso de coste incremental. Además, la estrategia propuesta considera únicamente los enlaces de comunicación entre agentes vecinos comunicados.

El rendimiento del controlador se evalúa mediante simulación y se analiza en cinco escenarios de prueba. Los resultados indican que el controlador aborda eficazmente la desconexión y reconexión de las bombas de agua y los problemas de los enlaces de comunicación, es decir, retardos pequeños y fallos de comunicación. Destacando la deficiencia del controlador de operar ante la presencia de retardos prolongados, abriendo la puerta a trasladar el esquema de control a uno más complejo, capaz de tolerar los retardos comunicacionales.

Con el fin de validar la implementación del sistema de control en un sistema realista, se estudia el desempeño del controlador mediante emulación, a través de *Hardware-In-the-Loop*. Lo cual permite emular la micro-red agua-energía y con ello probar el controlador en condiciones reales de tiempo de muestreo, comunicación y procesamiento.

Capítulo 6

Resultados mediante emulación

La evaluación de una estrategia de control mediante *software* o *Software-in-the-Loop* puede ser insuficiente, si el objetivo de la estrategia de control es ser implementada en un *setup* experimental, debido a que *SIL* posee la planta y el control en un solo ambiente de simulación, en un mismo dispositivo, generando con ello un ambiente de simulación ideal, que no considera los desafíos de los *setups* experimentales, resultantes de separar la planta y el control en dos subsistemas distintos. Algunos de estos desafíos son:

- Diferencia en la capacidad de procesamiento y por ende, diferencia en los tiempos de muestreos.
- Funcionamiento asíncrono de la planta y el controlador.
- Limitaciones de *hardware* asociadas al número de señales que se pueden transmitir y leer, como también, el rango numérico que estas se pueden abarcar.
- Congestión en las líneas de comunicación.
- Ruido en la transmisión de información entre dispositivos.
- Existencia de retardos de comunicación entre la planta y el controlador.

Por ello, se propone a continuación evaluar la estrategia de control propuesta en un *setup* experimental basado en *Hardware-in-the-Loop*, con tal de poder emular el comportamiento de un *setup* real en equipos de simulación a tiempo real, seguros y prácticos, con tal de poder evaluar e iterar el controlador propuesto y con ello, adaptar el controlador a los desafíos anteriormente mencionados.

Este capítulo se organiza de la siguiente manera: en la sección 6.1 se presentan los requisitos técnicos utilizados en la simulación, para posteriormente, en la sección 6.2 presentar como se trasladó la micro-red simulada de la sección 6.1 a emulación mediante *HIL*, destacando los equipos utilizados y como se cubren los requisitos mencionados en la sección 6.1. En la sección 6.3 se presenta la configuración de la micro-red agua-energía a emular, para posteriormente, en la sección 6.4 presentar los parámetros de la emulación y los resultados obtenidos de evaluar la estrategia de control propuesta en diferentes escenarios de estudios detallados a lo largo de la sección. Finalmente, en la sección 6.5 se discuten los resultados presentados en la sección 6.4.

6.1. Requisitos de la red

Uno de los objetivos de la estrategia de control propuesta es que su implementación sea distribuida, por ello, el mínimo de unidades a controlar de manera distribuida son 3. Durante simulación se utilizaron 4 generadores distribuidos y 3 bombas de agua, pero para el estudio en emulación, se disminuirá el número de generadores a 3, con el objetivo de reducir el costo computacional y con ello disminuir las limitaciones de *hardware* futuras al diseñar el *setup* experimental.

Producto de la reducción de generadores, la nueva micro-red agua-energía a estudiar posee 3 unidades de generación distribuida AC, representados por inversores ideales, alimentados por fuentes controladas de tensión ideales, 3 cargas eléctricas y 3 bombas de agua de iguales características. Por lo tanto, para controlar la planta, el controlador requiere realizar 13 mediciones, presentadas en la tabla 6.1.

Tabla 6.1: Mediciones necesarias para controlar la micro-red.

Medición	Cantidad
Tensión de los inversores	3
Corriente de los inversores	3
Corriente de salida del inversor	3
Tensión de las cargas de potencia constante	1
Corriente de la carga de potencia constante	3

Las primeras 9 mediciones señaladas en la tabla 6.1 se utilizan para medir la tensión y potencia de los inversores de la red, y con ello operar el control primario y secundario de la red eléctrica, mientras que las 4 mediciones restantes son necesarias para medir la potencia consumida por las bombas de agua y realizar el despacho económico hídrico. Por otro lado, la planta requiere recibir 6 referencias para operar, las cuales se presentan en la tabla 6.2.

Tabla 6.2: Salida de los controladores.

Medición	Cantidad
Tensión de referencia del inversor	3
Corriente de una carga de potencia constante	3

Las primeras 3 referencias de la tabla 6.2 indican la tensión a modular en los inversores, mientras que las últimas 3 referencias indican cuanta corriente debe consumir la carga de potencia constante, para que su potencia consumida o caudal extraído equivalente sea el deseado.

Dado que las mediciones y las referencias son trifásicas, se requiere transmitir 39 señales de la planta al controlador y 18 señales del controlador a la planta. Tomando en consideración estas limitaciones de *hardware* y considerando los parámetros de diseño original de la planta simulada del capítulo 5.1, se presenta a continuación el diseño del *setup* experimental utilizado para llevar a cabo la emulación.

6.2. *Setup experimental*

Teniendo en cuenta los objetivos del trabajo y los requisitos de la red presentados en la sección anterior, se utiliza el simulador a tiempo real RTBox, de la empresa PLECS, para implementar la planta, puesto que está especialmente diseñado para aplicaciones de electrónica de potencia, además de ser capaz de realizar *HIL* y prototipos rápidos de control [74]. En la figura 6.1 se muestra el equipo utilizado y en la tabla 6.3 se detallan algunas especificaciones técnicas del equipo.

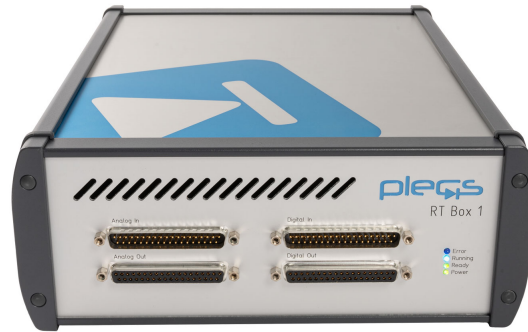


Figura 6.1: RTBox 1 de PLEXIM. Extraído de [74].

Tabla 6.3: Parámetros de interés del RTBox.

Especificación Técnica	Valor
Nº de canales analógicos (entrada)	16
Rango canales analógicos (entrada)	-10 ... 10 [V] -5 ... 5 [V]
Nº de canales analógicos (salida)	16
Rango canales analógicos (salida)	-10 ... 10 [V] 0 ... 10 [V] -5 ... 5 [V] 0 ... 5 [V]
Nº de canales digitales (entrada)	32
Rango canales digitales	3.3-5 [V]
Conectividad	Ethernet SFP CAN USB

Como se puede apreciar en la tabla 6.3, la mayor desventaja de este equipo es que posee solo 16 señales analógicas de salida y 16 señales analógicas de entrada, mientras que para el funcionamiento de la micro-red agua-energía (planta) se requiere transmitir 39 señales analógicas y recibir 18 señales analógicas, superando con creces la cantidad de canales analógicos

disponibles en el RTBox, por lo que se reajusta la transmisión de señales.

A partir del supuesto de que la micro-red a emular tiene la generación y las cargas eléctricas balanceadas, se utiliza la propiedad de las señales trifásicas balanceadas, que señala que la suma de las 3 señales trifásicas es cero, por lo tanto, se puede transmitir 2 señales de la medición trifásica al controlador y reconstruir la tercera. Permitiendo reducir el número de salidas analógicas necesarias a 26 y el número de entradas analógicas a 12, superando aún el número de canales analógicos de salida disponibles.

Como no se puede reducir más el número de datos necesarios a transmitir por medición, se busca reducir el número de mediciones necesarias para controlar la planta. En particular, se busca eliminar la medición de la corriente de salida del inversor, mediante la creación de un estimador que determine su valor en función de la tensión, la corriente y el filtro del inversor, los cuales son valores medidos y conocidos respectivamente. El diseño del estimador se realiza mediante la ley de corrientes de Kirchoff, aplicada sobre el filtro de salida del inversor. El esquema eléctrico del filtro se presenta en la figura 6.2, mientras que el despeje del estimador se realiza en la ecuación (6.1).

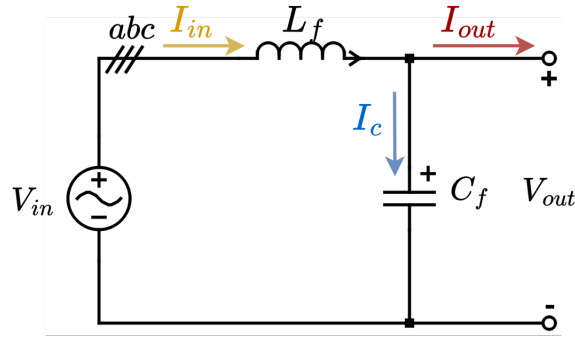


Figura 6.2: Filtro inductivo-capacitivo de salida de un inversor.

$$\begin{aligned}
 i_{in}(t) &= i_c(t) + i_{out}(t) \\
 i_{in}(t) &= C s v_c(t) + i_{out}(t) \\
 i_{in}(t) &= C s v_{in}(t) + i_{out}(t) \\
 i_{out}(t) &= i_{in}(t) - C \frac{dv_{in}(t)}{dt}
 \end{aligned} \tag{6.1}$$

Al implementar la estimación, se reduce el número de mediciones necesarias a 10, por lo que se necesitan en total 20 canales de salida, que siguen siendo superior al número de canales disponibles en el RTBox. Adicionalmente, se hicieron pruebas de operación y el equipo no era capaz de emular la micro-red objetivo con el tiempo de muestreo utilizado en la simulación, debido a que la carga computacional era muy alta. Por ambas razones, se divide la planta en 2 RTBox, con tal de aumentar el número de canales analógicos disponibles y disminuir la capacidad computacional.

Para dividir la planta, se siguen las indicaciones de la empresa fabricante PLEXIM, que

sugiere dividir los sistemas, cuando exista un cambio de dinámica dentro de estos. Sin embargo, la micro-red es uniforme y no presenta cambios de dinámicas, por ello se fuerza la división de la red, añadiendo una carga capacitiva en paralelo a las cargas eléctricas y las bombas de agua, permitiendo separar el sistema en 2 partes, generación y cargas eléctricas. Esta división es posible gracias a que el RTBox posee el protocolo de comunicación *Small Form-factor Pluggable* o SFP por sus siglas en inglés, que intercambia información a una tasa de 10 MHz, permitiendo una rápida comunicación entre unidades, sin afectar al control de la micro-red, puesto que el intercambio de información entre las unidades que componen la planta es más rápido que la tasa de muestreo de la planta misma. La separación de la planta se presenta en la figura 6.3

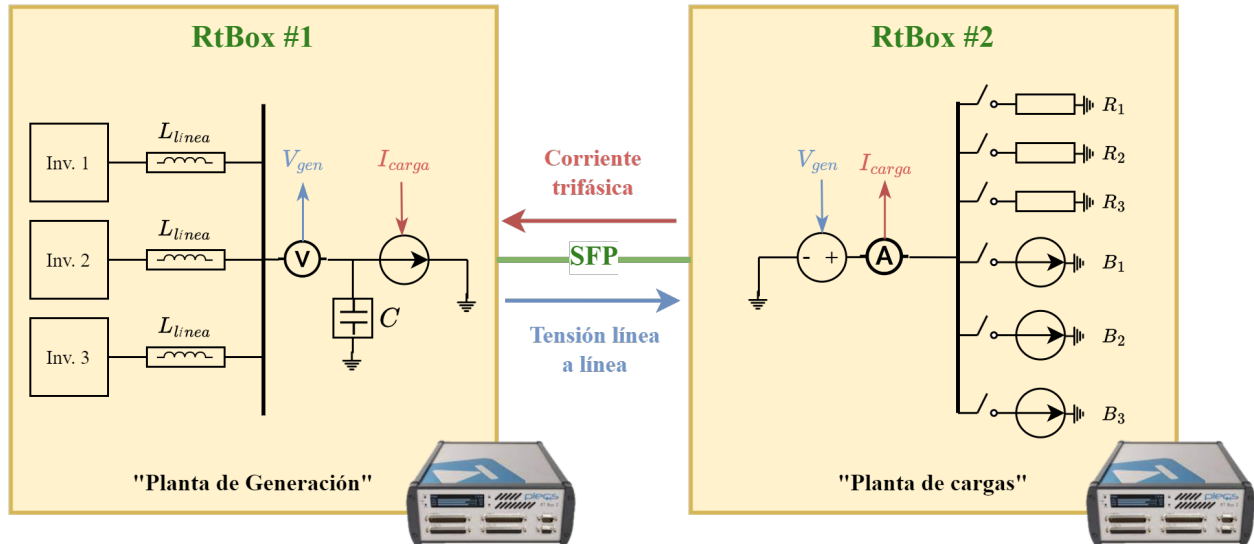


Figura 6.3: División de la planta entre dos RTBox.

Como se señala en la figura 6.3, la comunicación entre ambas RTBox comienza con el RTBox encargado de generación, el cual mide y transmite la tensión de la red al RTBox de las cargas eléctricas, para que este, mediante fuentes de tensión ideal, pueda emular la tensión de los generadores. A medida que se conecten cargas eléctricas, aumentará la corriente demandada a las fuentes de tensión ideales, esta corriente es medida y transmitida al RTBox encargado de la generación, con tal de que perciba la corriente como carga eléctrica y esta se distribuya entre los inversores de la red, vinculando de esta manera la generación y demanda de la red.

Producto de la separación de la planta, el RTBox que contiene las unidades de generación, requiere 6 mediciones para ser controlada, o 12 canales analógicos de salida y 3 referencias o 9 canales analógicos de entrada para operar, mientras que el RTBox que posee las cargas eléctricas requiere 4 mediciones para ser controlada, u 8 canales analógicos de salida y 3 referencias o 9 canales analógicos de entrada para operar. Adicionalmente, se hicieron pruebas de carga computacional y el sistema es capaz de emular la red a la tasa de muestreo deseada, por lo tanto, las limitaciones de *hardware* fueron superadas.

Por otro lado, para implementar el controlador, se utiliza el prototipo para laboratorio

MicroLabBox de la empresa dSPACE, que combina un diseño compacto, con un sistema de bajo costo, alto rendimiento y versátil. En la figura 6.4, se presenta el dispositivo y en la tabla 6.4 se detallan algunas características del mismo.



Figura 6.4: MicroLabBox de dSPACE. Extraído de [75].

Tabla 6.4: Parámetros de interés del MicroLabBox.

Parámetro	Valor
Nº de canales analógicos (entrada)	32
Rango canales analógicos (entrada)	8 de 14 bits 24 de 16 bits -10 ... 10 [V]
Nº de canales analógicos (salida)	16
Rango canales analógicos (salida)	16 de 16 bits -10 ... 10 [V]
Nº de canales digitales (bidireccionales)	48
Rango canales digitales	2.5, 3.3, 5 [V]
Conectividad	Ethernet Serial CAN USB LVDS

Como se puede apreciar, el MicroLabBox tiene un mayor número de entradas y salidas analógicas, por lo que no aporta limitaciones de *hardware* al sistema. De igual manera, comparte los rangos de los canales analógicos con el RTBox, por lo que no hay que hacer transformaciones intermedias.

Finalmente, el *HIL* se consigue mediante la interconexión de ambos equipos anteriormente mencionados, siendo los RTBoxes los equipos que emulan la red y mandan sus mediciones de

tensiones y corrientes al MicroLabBox, para que este calcule las acciones de control pertinentes y mande de vuelta los valores de referencia a la planta, cerrando así el loop de control. Visualmente, el esquema de *HIL* se observa en la figura 6.5.

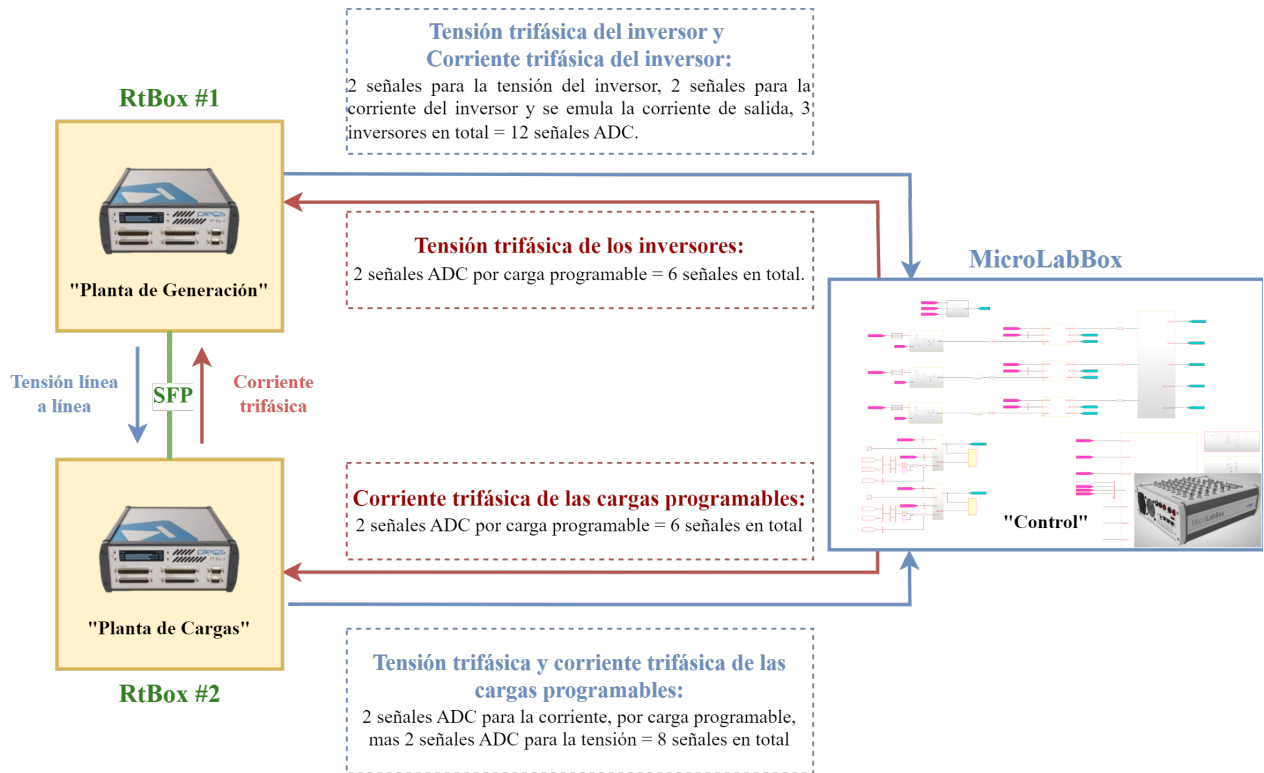


Figura 6.5: Implementación del *Hardware-in-the-loop*.

Explicado el *setup* experimental y su desarrollo, se procede a presentar, en la sección siguiente, en detalle la configuración de la red utilizada en la emulación y sus parámetros.

6.3. Configuración de la micro-red agua-energía

Como se mencionó anteriormente en la sección 6.1, se modificó la micro-red objetivo del capítulo 5.1, eliminando una unidad de generación distribuida por restricciones de *hardware*, obteniendo la micro-red de la Figura 6.6, modificando parcialmente los parámetros de la red. A continuación se presentan los parámetros utilizados para emular la red.

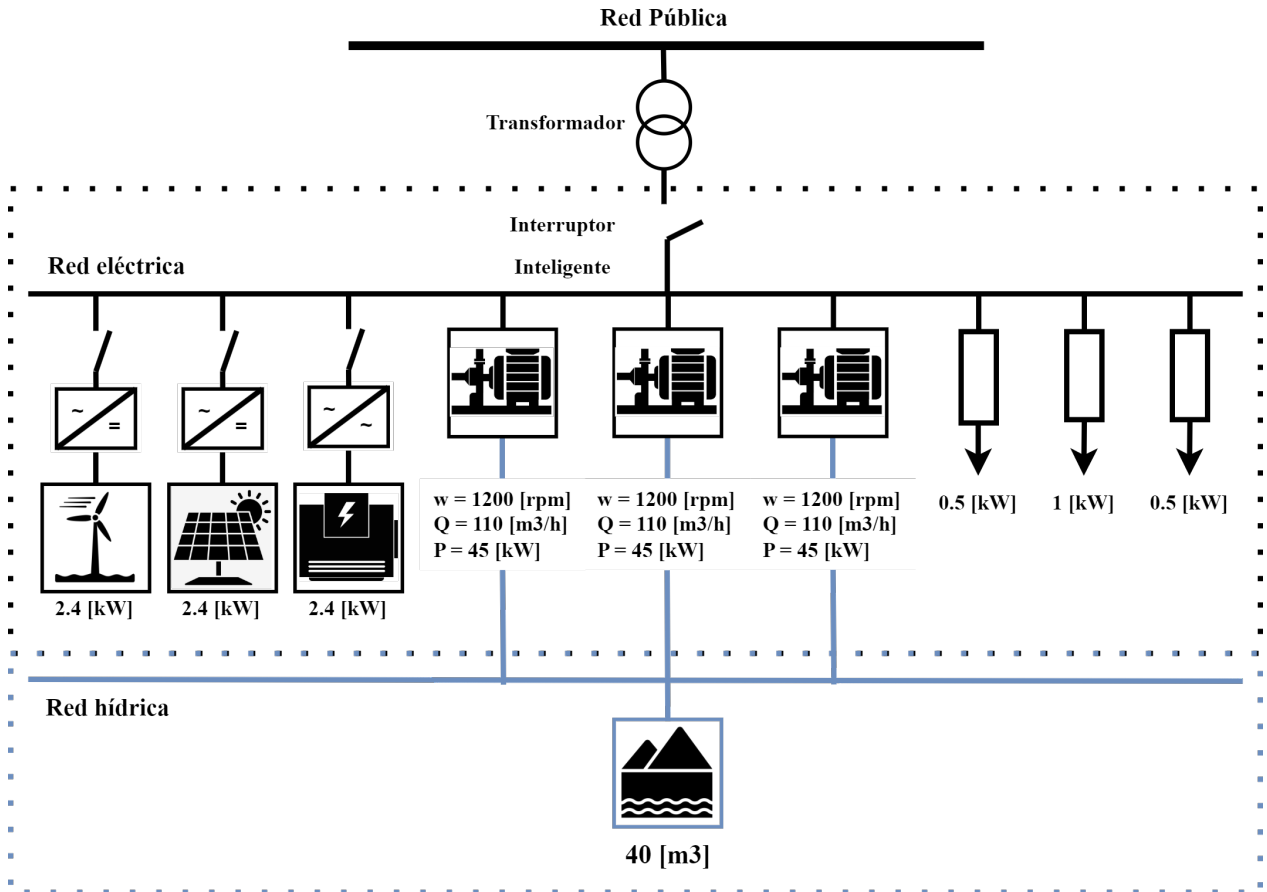


Figura 6.6: Micro-red agua-energía a emular.

Los parámetros de la red, los parámetros de los inversores, los parámetros de las bombas de agua, los costos de la red hídrica y las constantes de los controladores primarios y secundarios utilizados para llevar a cabo la simulación se vuelven a utilizar para llevar a cabo la emulación. Lo único distinto es la Tabla 6.5, que presenta los términos del costo cuadrático eléctrico para 3 inversores en vez de 4.

Tabla 6.5: Parámetros del costo de generación de los inversores.

Parámetro	Unidad 1	Unidad 2	Unidad 3
a [$$/kW^2$]	0.264	0.444	0.500
b [$$/kW$]	0.111	0.067	0.125
c [$/$$]	0.000	0.000	0.000

6.4. Diseño de escenarios de prueba para evaluar la estrategia de control

La eficiencia del controlador propuesto se evaluará utilizando los 5 escenarios simulados del capítulo 5, adaptados para ser ejecutados mediante emulación y para considerar los cambios en la topología de la micro-red agua-energía objetivo. El primer escenario presenta el comportamiento del controlador hídrico cuando la red experimenta cambios en la demanda

del caudal e impactos de carga eléctricos. El segundo escenario muestra el comportamiento de la red ante la presencia de latencias constantes en la red de comunicación. El tercer escenario muestra los efectos de tener fallos de comunicación entre los componentes del sistema. El cuarto escenario valida la capacidad del controlador de llevar a cabo *plug-and-play*, al desconectar y reconectar una bomba del lado hídrico de la red. Finalmente, el quinto escenario realiza un estudio de sensibilidad del controlador, ante variaciones en el costo de operación hídrico.

Como se mencionó en el capítulo anterior, los cinco escenarios fueron escogidos debido a que son los fenómenos más comunes a los que se enfrenta un controlador a nivel secundario [71, 72]. Un controlador distribuido debe tener un buen desempeño frente a problemas de comunicación, como retrasos y fallos de comunicación, además, es deseable tener la posibilidad de desconectar y reconectar las unidades de generación y las bombas de agua de la micro-red sin cambios en la programación de los controladores.

Debido a que el esquema de control propuesto para llevar a cabo la restauración de tensión y frecuencia, y el reparto de potencia activa, ha sido presentado con anterioridad en la literatura, se presentarán sus resultados solo para el primer escenario de estudio.

6.4.1. Escenario 1 (caso base): cambios de carga

En este escenario, se estudia el desempeño del controlador propuesto en la emulación de una micro-red agua-energía cuando hay cambios en la carga eléctrica y cambios en la demanda hídrica. Al igual que la simulación, la emulación comienza con el control primario activo (lazo interno y control primario), dos cargas conectadas (Z_1 y Z_2) en paralelo, el control secundario de tensión y frecuencia activo, el despacho económico eléctrico activo y las tres bombas de agua operativas en paralelo, satisfaciendo una demanda de $32,4[m^3/s]$ caudal sin tener el controlador propuesto activo. Por lo tanto, el caudal extraído por cada una de las bombas será igual al inicio de la prueba.

Posteriormente, en $t = 15[s]$, se habilita el despacho económico hídrico secundario propuesto con tal de igualar los costos marginales y con ello minimizar los costos de operación. En $t = 30[s]$ se aumenta la demanda hídrica en un %50, con tal de estudiar el funcionamiento del controlador en un cambio positivo de carga, en $t = 40[s]$ se conecta Z_3 , para visualizar el impacto de la red eléctrica en el controlador al añadir carga eléctrica, en $t = 50[s]$ se disminuye la demanda hídrica en un %50 del total, con tal de evaluar el funcionamiento del controlador en un cambio de demanda negativo y en $t = 60[s]$ se desconecta Z_1 , para estudiar el efecto de la red eléctrica en el controlador al disminuir la carga eléctrica.

Debido a que en este escenario no se estudiaran fallas de comunicación, ni desconexión de unidades, la matriz de adyacencia que representa la red de comunicación es constante, su estructura se presenta en la Figura 6.7.

$$A(t) = \begin{pmatrix} 0 & \mu_{1,2} & \mu_{1,3} & \eta_{1,1} & \eta_{2,1} & \eta_{3,1} & \alpha_{0,1_i} \\ \mu_{2,1} & 0 & \mu_{2,3} & \eta_{1,2} & \eta_{2,2} & \eta_{3,2} & \alpha_{0,2_i} \\ \mu_{3,1} & \mu_{3,2} & 0 & \eta_{1,3} & \eta_{2,3} & \eta_{3,3} & \alpha_{0,3_i} \\ \eta_{1,1} & \eta_{1,2} & \eta_{1,3} & 0 & \beta_{1,2} & \beta_{1,3} & \alpha_{0,1_k} \\ \eta_{2,1} & \eta_{2,2} & \eta_{2,3} & \beta_{2,1} & 0 & \beta_{2,3} & \alpha_{0,2_k} \\ \eta_{3,1} & \eta_{3,2} & \eta_{3,3} & \beta_{3,1} & \beta_{3,2} & 0 & \alpha_{0,3_k} \\ \alpha_{1_i,0} & \alpha_{2_i,0} & \alpha_{3_i,0} & \alpha_{1_k,0} & \alpha_{2_k,0} & \alpha_{3_k,0} & 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

Figura 6.7: Matriz de adyacencia del escenario base.

Los resultados obtenidos de emular el escenario 1 se presentan en las Figuras 6.8, 6.9 y 6.10.

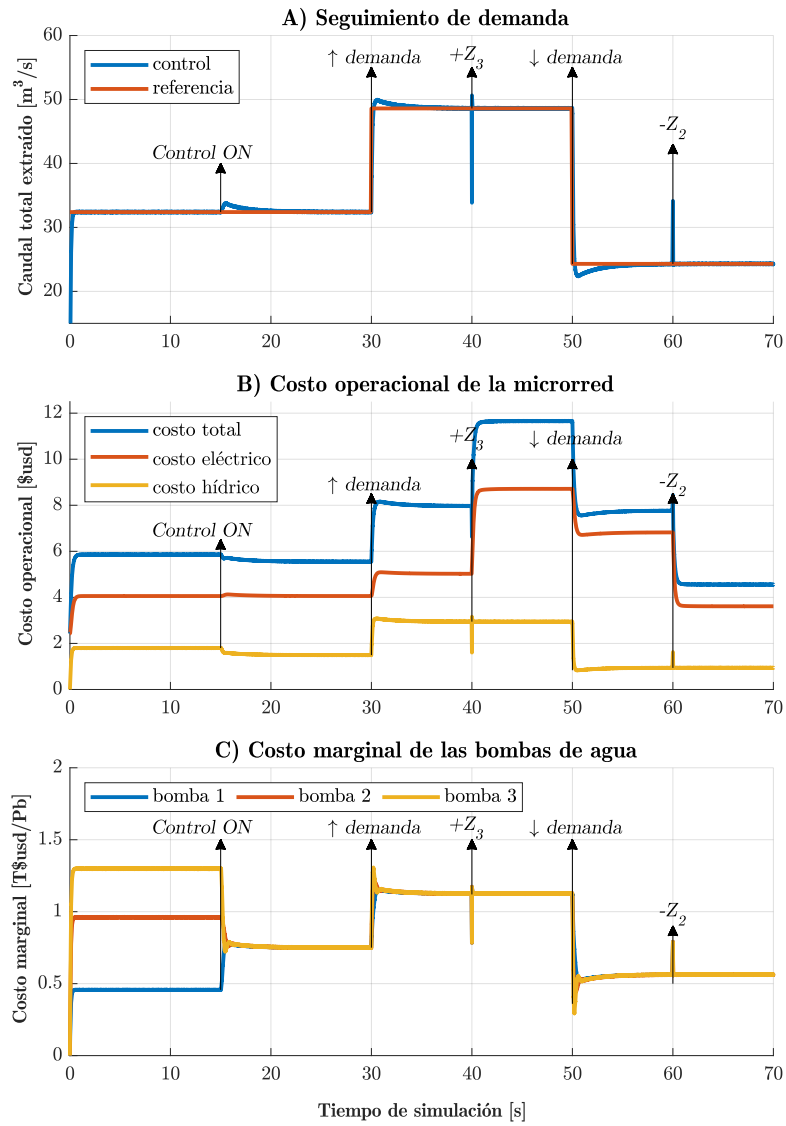


Figura 6.8: Resultados emulación escenario 1: A) seguimiento de demanda hídrica, B) costo operacional de la red y C) costo marginal de las bombas de agua.

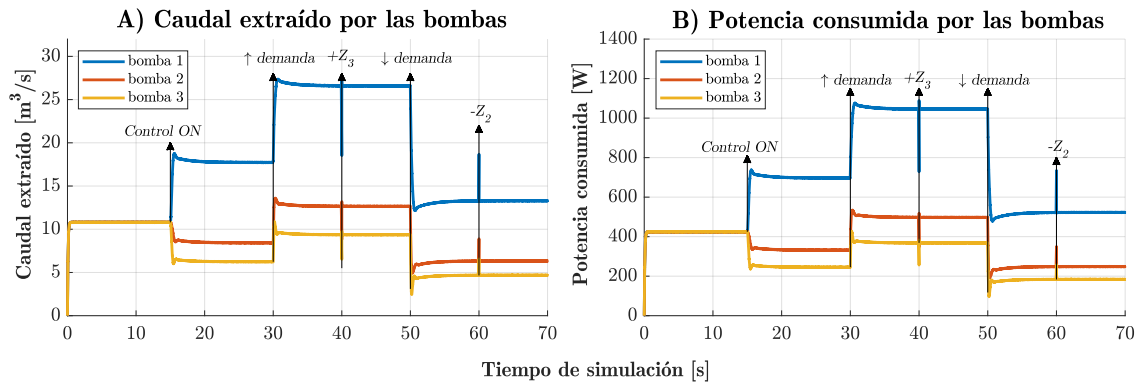


Figura 6.9: Resultados emulación escenario 1: A) Caudal extraído por cada bomba de agua y B) la potencia consumida por cada una de éstas.

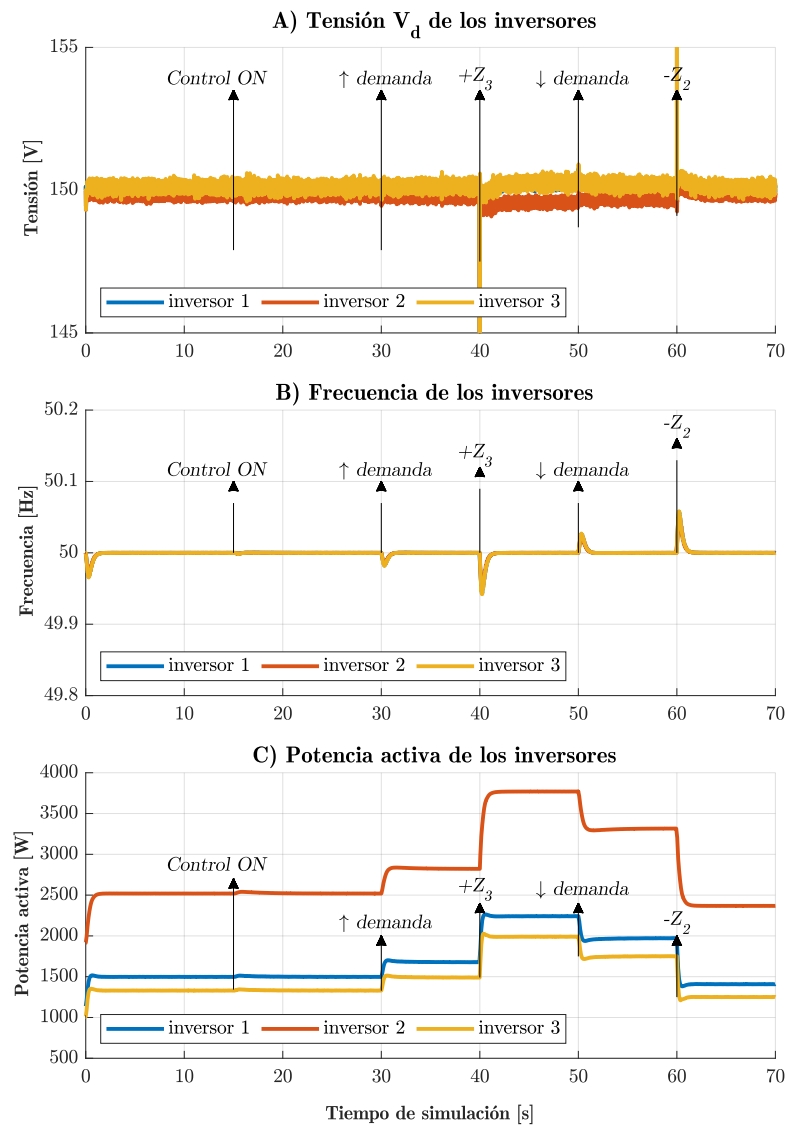


Figura 6.10: Resultados emulación escenario 1: A) Tensión de la red y B) potencia activa aportada por cada inversor.

Como se puede observar en la Figura 6.9, el tener desactivado el controlador propuesto provoca que los caudales (ver Figura 6.9(A)) y potencias (ver Figura 6.9(B)) de las bombas de agua sean iguales, no así sus costos marginales, los cuales son distintos, debido a que los términos del costo cuadrático de la Tabla 5.5.

Una vez activado el controlador en $t = 15[s]$ se puede observar en la Figura 6.8(C) que se cumple la condición de optimalidad y se igualan los costos marginales de las bombas, lo que provoca que se redistribuyan los caudales que extraen las bombas de agua, como se observa en la figura 6.9(A), siendo la unidad más económica (bomba 1), la que más caudal extrae. Producto de la redistribución, se puede observar que los costos operacionales bajan de \$5,853 a \$5,555, lo que equivale a una reducción de costos del 5,365 %, que según la escala de la red puede generar un ahorro económico importante.

Tanto en $t = 40[s]$ como en $t = 60[s]$ se puede observar en la Figura 6.9(A) que un cambio en la red eléctrica si afecta al controlador hídrico, generando un *peak* de caudal que se controla rápidamente. Esto se debe a que el controlador considera los valores de $\bar{\lambda}_i$ en el consenso entre bombas de agua, lo que provoca que, de haber un cambio en la red eléctrica, se genere un desbalance y con ello una perturbación en el sistema. Debido a que hay un *peak* en el caudal extraído por cada una de las bombas, se puede observar un *peak* en el seguimiento de demanda de la Figura 6.8(A).

Con respecto a los cambios de demanda que ocurren en $t = 30[s]$ y $t = [50]$, se puede apreciar en la Figura 6.8 que el controlador es capaz de abordarlas sin desviarse de la referencia, distribuyendo el caudal entre las bombas acorde al coste de estas (ver Figura 5.5)(A)).

A partir de la Figura 6.9, se puede ver que el caudal de las bombas de agua (ver Figura 6.9(A)) es directamente proporcional a la potencia que las bombas consumen (ver Figura 6.9(B)), corroborando que se cumple la ecuación (4.2) del capítulo 4 sección 1, que entrelaza el caudal que extrae una bomba de agua con la potencia que esta consume.

Finalmente, se puede observar en la figura 6.10 que los objetivos de la red eléctrica se cumplen, es decir, se mantiene estable la tensión media en $150[V]$, que es lo deseado, pero con *ripple* debido a que el escalado y reescalado de señales a lo largo del HIL genera ruido. Por el contrario, la potencia que genera el inversor 2 escapa de los márgenes de generación, esto se debe a que hay menos inversores en la emulación que la simulación, por ende, el inversor más económico es el que debe cubrir la mayoría de la demanda, generando un exceso de generación, comparado con lo que se tiene planeado, por lo tanto, se debe reajustar la capacidad de generación de los generadores.

6.4.2. Escenario 2: retardo en la comunicación

En este escenario, se estudia el desempeño del controlador propuesto ante retardos de comunicación constantes ($\tau_{i,j}$) entre el controlador propuesto y la micro-red agua-energía. Para ello, se consideran dos casos de estudios: 1) la existencia de un retardo de comunicación de $\tau_{i,j} = 0,05[s]$ y 2) la existencia de retardo más extenso, de $\tau_{i,j} = 1[s]$ que equivale a 20 veces el tiempo de muestreo del secundario. Los resultados de ambos casos muestran en la 6.11.

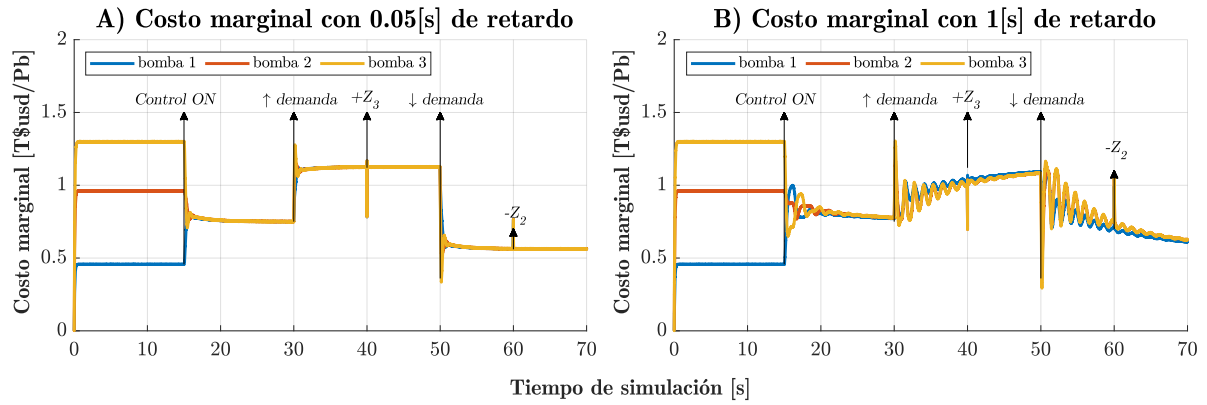


Figura 6.11: Escenario 2: (A) evolución de la red con 0,05[s] de retardo y (B) evolución de la red con 1[s] de retardo.

Al comparar las Figura 6.11(A) y 6.11(B) se puede apreciar que hay una notoria diferencia entre tener un retardo e 0,05[s] y un retardo de 1[s]. Esto se debe a que el control DAPI, que conforma el esquema de control, calcula las acciones de control mediante un controlador PI, el cual, por sí solo, no es resiliente a los retardos comunicacionales. Por lo anterior, los resultados que se obtienen al operar con retardos comunicacionales son inestables o tardan mucho en estabilizarse, lo que puede ser dañino para los equipos eléctricos, al operar en torno a sus límites operacionales.

También se puede observar en la Figura 6.11(A), que un retardo de 0,05[s] genera perturbaciones menores en el controlador, aumentando levemente el tiempo de estabilización. Debido a que el retardo es pequeño y constante, el control DAPI es capaz de sobrellevarlo. Si el retardo aumenta, se obtendrán los resultados de 5.8(B), donde el sistema tiene un tiempo e estabilización mayor, empeorando su tiempo de respuesta ante perturbaciones.

Dado que el retardo de comunicación es constante y conocido, puede diseñarse un controlador, como el predictor Smith, que considere dicho retardo y anule su efecto en el control. Por otro lado, si el retardo del sistema es variable en el tiempo, es recomendable aplicar estrategias de control avanzadas, como control predictivo adaptativo, para sobrellevar el retardo.

6.4.3. Escenario 3: falla de comunicación

En este escenario se busca evaluar el desempeño del controlador contra fallas en los enlaces de comunicación. Para ello, se comienza la simulación con el control primario activo (lazo interno y curvas de droop), 2 cargas conectadas (Z_1 y Z_2), el control secundario de tensión y frecuencia activo, el despacho económico eléctrico activo y las tres bombas de agua operativas en paralelo, satisfaciendo una demanda de $32,4[m^3/s]$ caudal sin tener el controlador propuesto activo.

En $t = 15[s]$ se activa el controlador propuesto y en $t = 30[s]$ se fuerzan tres fallas de comunicación distintas en 4 casos de estudio distintos:

1. Falla de comunicación entre el inversor 3 y las bombas de agua, señalada en la matriz de adyacencia de la Figura 6.12.

2. Falla de comunicación entre la bomba 2 y la bomba 1, como se señala en la matriz de adyacencia de la Figura 6.13.
3. Falla de comunicación entre la bomba 1 y la bomba 3, y falla de comunicación entre el inversor 2 y el resto de las bombas, como se señala en la matriz de adyacencia de la Figura 6.14.
4. Falla de comunicación de todos los inversores con las bombas de agua, presentado en la matriz de adyacencia de la Figura 6.15.

$$A(t) = \left(\begin{array}{ccc|ccc|c} 0 & \mu_{1,2} & \mu_{1,3} & \eta_{1,1} & \eta_{2,1} & \eta_{3,1} & \alpha_{0,1_i} \\ \mu_{2,1} & 0 & \mu_{2,3} & \eta_{1,2} & \eta_{2,2} & \eta_{3,2} & \alpha_{0,2_i} \\ \mu_{3,1} & \mu_{3,2} & 0 & \eta_{1,3} & \eta_{2,3} & \eta_{3,3} & \alpha_{0,3_i} \\ \hline \eta_{1,1} & \eta_{1,2} & \eta_{1,3} & 0 & \beta_{1,2} & \beta_{1,3} & \alpha_{0,1_k} \\ \eta_{2,1} & \eta_{2,2} & \eta_{2,3} & \beta_{2,1} & 0 & \beta_{2,3} & \alpha_{0,2_k} \\ \eta_{3,1} & \eta_{3,2} & \eta_{3,3} & \beta_{3,1} & \beta_{3,2} & 0 & \alpha_{0,3_k} \\ \hline \alpha_{1_i,0} & \alpha_{2_i,0} & \alpha_{3_i,0} & \alpha_{1_k,0} & \alpha_{2_k,0} & \alpha_{3_k,0} & 0 \end{array} \right) = \left(\begin{array}{ccc|ccc|c} 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ \hline 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{array} \right)$$

Figura 6.12: Matriz de adyacencia del escenario 3, caso 1.

$$A(t) = \left(\begin{array}{ccc|ccc|c} 0 & \mu_{1,2} & \mu_{1,3} & \eta_{1,1} & \eta_{2,1} & \eta_{3,1} & \alpha_{0,1_i} \\ \mu_{2,1} & 0 & \mu_{2,3} & \eta_{1,2} & \eta_{2,2} & \eta_{3,2} & \alpha_{0,2_i} \\ \mu_{3,1} & \mu_{3,2} & 0 & \eta_{1,3} & \eta_{2,3} & \eta_{3,3} & \alpha_{0,3_i} \\ \hline \eta_{1,1} & \eta_{1,2} & \eta_{1,3} & 0 & \beta_{1,2} & \beta_{1,3} & \alpha_{0,1_k} \\ \eta_{2,1} & \eta_{2,2} & \eta_{2,3} & \beta_{2,1} & 0 & \beta_{2,3} & \alpha_{0,2_k} \\ \eta_{3,1} & \eta_{3,2} & \eta_{3,3} & \beta_{3,1} & \beta_{3,2} & 0 & \alpha_{0,3_k} \\ \hline \alpha_{1_i,0} & \alpha_{2_i,0} & \alpha_{3_i,0} & \alpha_{1_k,0} & \alpha_{2_k,0} & \alpha_{3_k,0} & 0 \end{array} \right) = \left(\begin{array}{ccc|ccc|c} 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ \hline 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{array} \right)$$

Figura 6.13: Matriz de adyacencia del escenario 3, caso 2.

$$A(t) = \left(\begin{array}{ccc|ccc|c} 0 & \mu_{1,2} & \mu_{1,3} & \eta_{1,1} & \eta_{2,1} & \eta_{3,1} & \alpha_{0,1_i} \\ \mu_{2,1} & 0 & \mu_{2,3} & \eta_{1,2} & \eta_{2,2} & \eta_{3,2} & \alpha_{0,2_i} \\ \mu_{3,1} & \mu_{3,2} & 0 & \eta_{1,3} & \eta_{2,3} & \eta_{3,3} & \alpha_{0,3_i} \\ \hline \eta_{1,1} & \eta_{1,2} & \eta_{1,3} & 0 & \beta_{1,2} & \beta_{1,3} & \alpha_{0,1_k} \\ \eta_{2,1} & \eta_{2,2} & \eta_{2,3} & \beta_{2,1} & 0 & \beta_{2,3} & \alpha_{0,2_k} \\ \eta_{3,1} & \eta_{3,2} & \eta_{3,3} & \beta_{3,1} & \beta_{3,2} & 0 & \alpha_{0,3_k} \\ \hline \alpha_{1_i,0} & \alpha_{2_i,0} & \alpha_{3_i,0} & \alpha_{1_k,0} & \alpha_{2_k,0} & \alpha_{3_k,0} & 0 \end{array} \right) = \left(\begin{array}{ccc|ccc|c} 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ \hline 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{array} \right)$$

Figura 6.14: Matriz de adyacencia del escenario 3, caso 3.

$$A(t) = \left(\begin{array}{ccc|ccc|c} 0 & \mu_{1,2} & \mu_{1,3} & \eta_{1,1} & \eta_{2,1} & \eta_{3,1} & \alpha_{0,1_i} \\ \mu_{2,1} & 0 & \mu_{2,3} & \eta_{1,2} & \eta_{2,2} & \eta_{3,2} & \alpha_{0,2_i} \\ \mu_{3,1} & \mu_{3,2} & 0 & \eta_{1,3} & \eta_{2,3} & \eta_{3,3} & \alpha_{0,3_i} \\ \hline \eta_{1,1} & \eta_{1,2} & \eta_{1,3} & 0 & \beta_{1,2} & \beta_{1,3} & \alpha_{0,1_k} \\ \eta_{2,1} & \eta_{2,2} & \eta_{2,3} & \beta_{2,1} & 0 & \beta_{2,3} & \alpha_{0,2_k} \\ \eta_{3,1} & \eta_{3,2} & \eta_{3,3} & \beta_{3,1} & \beta_{3,2} & 0 & \alpha_{0,3_k} \\ \hline \alpha_{1_i,0} & \alpha_{2_i,0} & \alpha_{3_i,0} & \alpha_{1_k,0} & \alpha_{2_k,0} & \alpha_{3_k,0} & 0 \end{array} \right) = \left(\begin{array}{ccc|ccc|c} 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{array} \right)$$

Figura 6.15: Matriz de adyacencia del escenario 3, caso 4.

El objetivo de probar todas fallas de comunicación anteriores es estudiar si la estrategia de control propuesta es capaz de sobrellevar las potenciales fallas de la red de comunicación y calcular la acción de control óptima, cubriendo la demanda solicitada. Posteriormente, en $t = 45[s]$ se aumenta la demanda hídrica en un %50 y en $t = 60[s]$ se desconecta Z_2 . Los resultados del primer caso de estudio se presenta en la Figura 6.16, mientras que los costos marginales de los otros 3 casos de estudio se muestran en conjunto en la Figura 6.17.

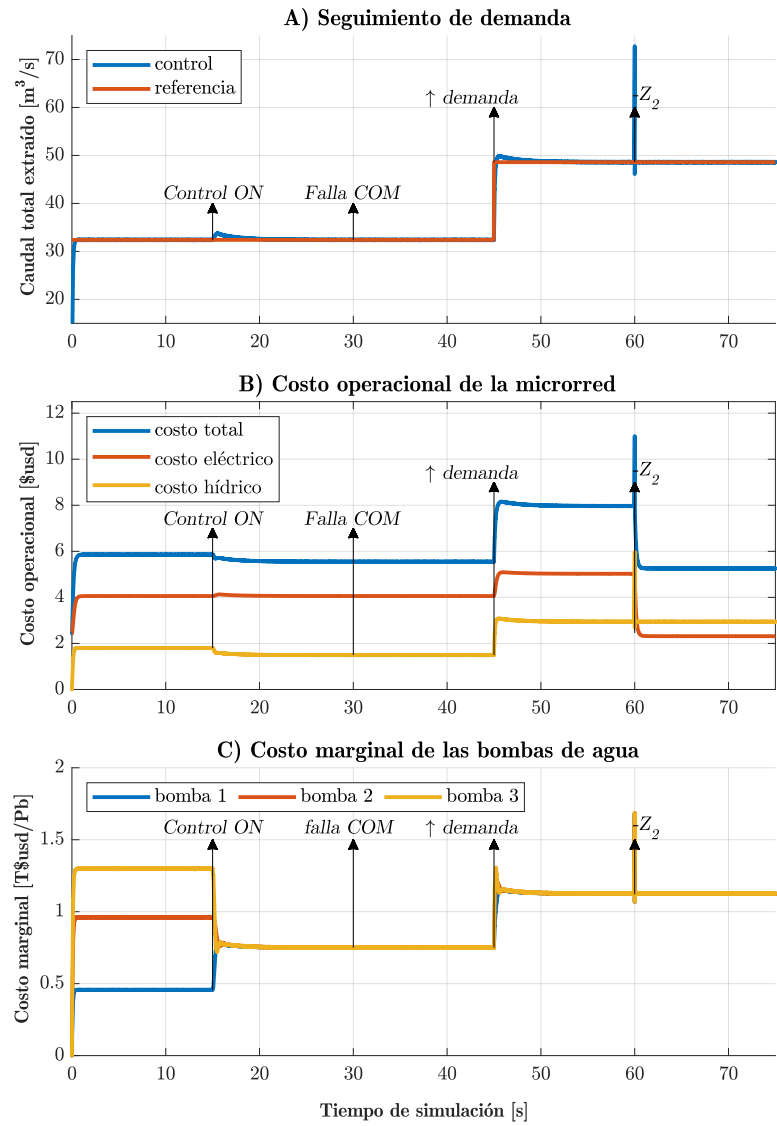


Figura 6.16: Escenario 3, caso 1: fallo de comunicación entre inversores y bombas de agua; A) seguimiento de demanda, B) costo operacional de la red y C) costo marginal de las bombas de agua.

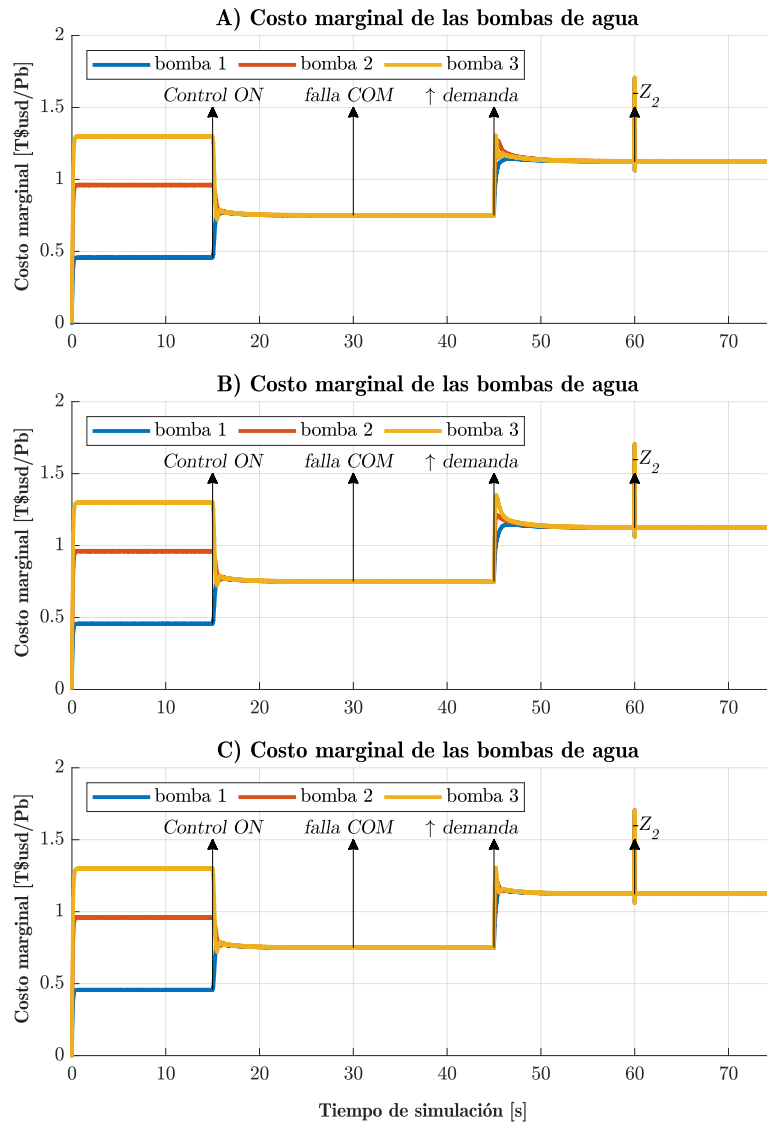


Figura 6.17: Escenario 3: A) fallo de comunicación entre bombas de agua; B) fallo de comunicación múltiple y C) falla total de comunicación entre bombas de agua e inversores.

En el primer caso de estudio, presentado en la Figura 6.16, se puede observar en la Figura 6.16(C) que la falla comunicacional entre un inversor y el resto de las bombas de agua no afecta al controlador. Esto se debe a que el controlador opera con un promedio de lambdas ($\bar{\lambda}_i$) que puede recalcularse si se pierde la comunicación con un inversor. Además, en un punto de operación estable, todos los $\lambda_i(t)$ han de ser iguales y por consiguiente los $\bar{\lambda}_k(t)$ también han de ser iguales, por lo tanto, se alcanza el consenso de igual manera. Debido a que el controlador no es afectado por la falla de comunicación, las Figuras 6.16(A) y 6.16(B) no sufren cambios.

En el segundo caso de estudio (ver Figura 6.17(A)), se puede apreciar que el consenso de los multiplicadores de Lagrange no sufre ningún cambio ante una falla en la comunicación de las bombas. Esto se debe a que, la falla de comunicación entre la bomba 1 y la bomba 2 es remediada mediante el *spanning tree* y la red de comunicación. Debido a que el controlador

no es afectado, los resultados obtenidos en la Figura 6.16 son equivalentes.

En el tercer caso de estudio, se mezclan las fallas comunicacionales de los primeros dos casos de estudio, es decir, se genera una falla comunicacional entre bombas de agua y entre inversores y bombas de agua, con tal de estudiar si existe relación entre las fallas de comunicación. Analizando la Figura 6.17(B), se puede observar que el controlador es capaz de sobrellevar ambas fallas comunicacionales de manera simultánea. Debido a que el controlador no es afectado, los resultados obtenidos en la Figura 6.16 son equivalentes.

El cuarto y último caso de estudio (ver Figura 5.14 (C)) se realizó con la idea de verificar si el controlador es capaz de operar en una situación extrema donde se independice la red de comunicación eléctrica y la red de comunicación hídrica, producto de una falla de comunicación. Por ello, la falla de comunicación estudiada es el corte total de comunicación entre inversores y bombas de agua. Como resultado, se puede observar en la figura 6.17(C), que el controlador es capaz de sobrellevar la falla de manera óptima, puesto que la influencia de la red eléctrica sobre la red hídrica no es tan grande en términos de magnitud. Debido a que el controlador no es afectado, los resultados obtenidos en la Figura 6.16 son equivalentes.

Finalmente, al comparar los resultados obtenidos por simulación (Figura 5.13) y emulación (Figura 6.16), se puede observar que los resultados son casi idénticos, siendo la mayor diferencia, los *peaks* que se observan a lo largo de la simulación/emulación. La razón de porque la perturbación sea mayor o menor son varias, primero la planta y el controlador están separados, por ende existe un retardo de comunicación entre ambos sistemas. Además, en la comunicación entre ambos equipos hay ruido de medición que afecta al controlador.

6.4.4. Escenario 4: *plug-and-play*

El cuarto escenario evalúa el desempeño del controlador ante una falla no planificada de una bomba de agua. La simulación comienza con 2 cargas conectadas (Z_1 y Z_2), el control primario activo, el control secundario de tensión y frecuencia activo, el despacho económico eléctrico activo, las tres bombas de agua operativas en paralelo, satisfaciendo una demanda de $32,4[m^3/s]$ de caudal sin tener el controlador propuesto activo.

En $t = 15[s]$, se conecta el controlador propuesto y en $t = 30[s]$, se desconecta la bomba 2 del sistema extracción de agua, cortando su comunicación con todos los agentes de la red de comunicación, emulando una falla total del equipo. Producto de ello se modifica la matriz de adyacencia como se muestra en la Figura 6.18. En $t = 45[s]$ se aumenta la demanda hídrica en un %50, en $t = 60[s]$ se conecta Z_3 . A los $t = 75[s]$ se reconecta la bomba a la red y en $t = 90[s]$ se disminuye la demanda en un %50 del total. Los resultados de la emulación se presentan en la Figura 6.19.

$$A(t) = \begin{pmatrix} 0 & \mu_{1,2} & \mu_{1,3} & \eta_{1,1} & \eta_{2,1} & \eta_{3,1} & \alpha_{0,1_i} \\ \mu_{2,1} & 0 & \mu_{2,3} & \eta_{1,2} & \eta_{2,2} & \eta_{3,2} & \alpha_{0,2_i} \\ \mu_{3,1} & \mu_{3,2} & 0 & \eta_{1,3} & \eta_{2,3} & \eta_{3,3} & \alpha_{0,3_i} \\ \eta_{1,1} & \eta_{1,2} & \eta_{1,3} & 0 & \beta_{1,2} & \beta_{1,3} & \alpha_{0,1_k} \\ \eta_{2,1} & \eta_{2,2} & \eta_{2,3} & \beta_{2,1} & 0 & \beta_{2,3} & \alpha_{0,2_k} \\ \eta_{3,1} & \eta_{3,2} & \eta_{3,3} & \beta_{3,1} & \beta_{3,2} & 0 & \alpha_{0,3_k} \\ \alpha_{1_i,0} & \alpha_{2_i,0} & \alpha_{3_i,0} & \alpha_{1_k,0} & \alpha_{2_k,0} & \alpha_{3_k,0} & 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

Figura 6.18: Matriz de adyacencia del escenario 4.

Los resultados obtenidos de emular el cuarto escenario se presentan en la Figura 6.19.

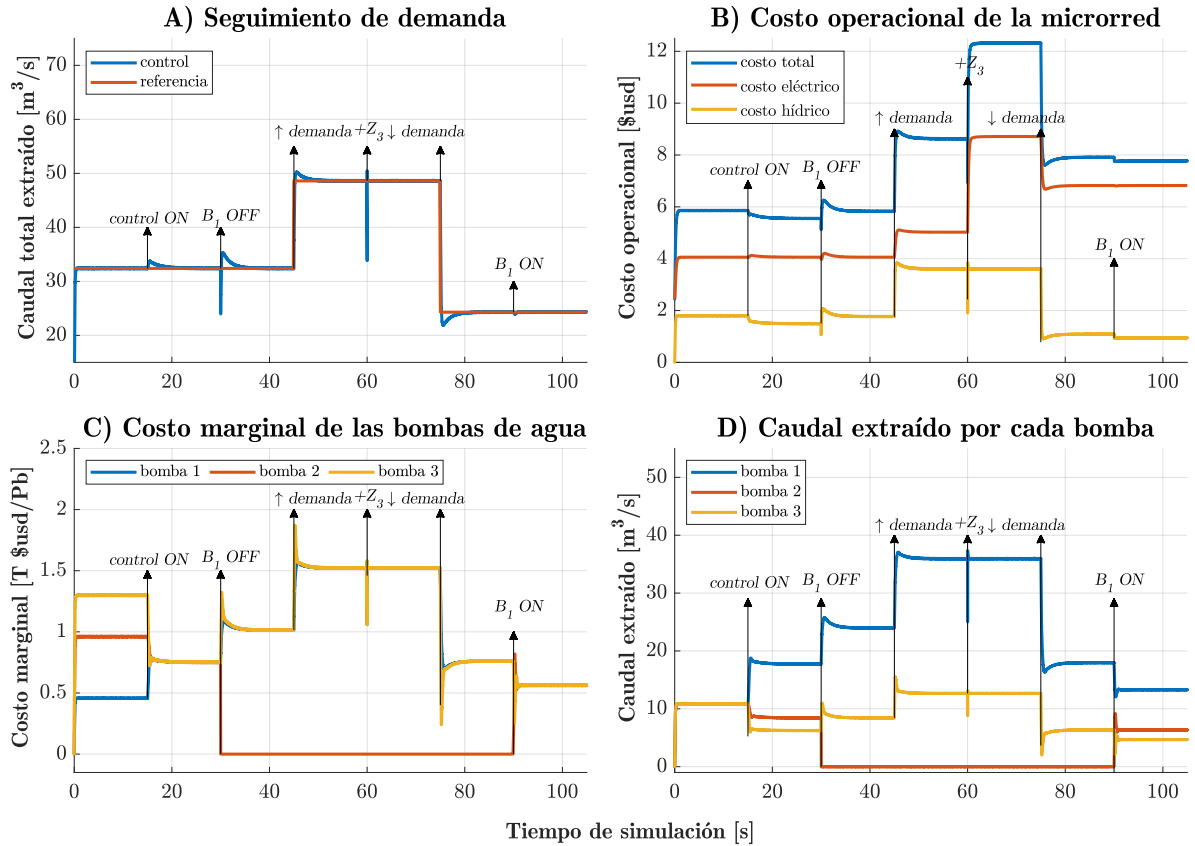


Figura 6.19: Escenario 4: desconexión de bomba de agua; A) seguimiento de demanda, B) costo operacional de la red, C) costo marginal de las bombas de agua y D) Caudal extraído por cada bomba.

Se puede ver la figura 6.19(D) que, cuando se desconecta la bomba 2 en $t = 30[s]$, su caudal se va a 0, producto de ello, el consenso de costo marginal debe realizarse entre las dos bombas que siguen conectadas (ver Figura 6.19(C)). Producto de ello, aumenta el costo operacional (ver Figura 6.19(B)), puesto que la bomba 3 de mayor costo debe extraer más agua para satisfacer la demanda no cubierta. Todo lo anterior sin afectar al seguimiento de demanda (ver Figura 6.19(A)), el cual prosigue sin perturbaciones. Por lo tanto, se puede asumir que el controlador es capaz de operar ante conexiones y desconexiones de unidades

de la red hídrica.

6.4.5. Escenario 5: cambio en los costos de operación

Este último escenario busca evaluar la operación del controlador cuando el costo de operación hídrico aumenta en un 20 %, para poder estudiar la sensibilidad del controlador, por ello se actualizan los términos de la función de costos cuadrática por los valores presentados en la Tabla 6.6.

Tabla 6.6: Nuevos parámetros del costo de consumo de las bombas de agua.

Parámetro	Bomba 1	Bomba 2	Bomba 3
d [$\$/kW^2$]	1.056	3.108	3.000
e [$\$/kW$]	0.268	0.777	0.750
f [$\$$]	0.000	0.000	0.000

Para facilitar la comparación del efecto de tener costos de operación distintos, se repite el escenario 1, con los nuevos costos de operación. Es decir, la simulación comienza con 2 cargas conectadas (Z_1 y Z_2), el control primario activo, el control secundario de tensión y frecuencia activo, el despacho económico eléctrico activo, las tres bombas de agua operativas en paralelo, satisfaciendo una demanda de $32,4[\frac{m^3}{s}]$ de caudal sin tener el controlador propuesto activo.

En $t = 15[s]$, se habilita el despacho económico hídrico secundario propuesto con tal de igualar los costos marginales y con ello minimizar los costos de operación. En $t = 30[s]$ se aumenta la demanda hídrica en un %50, en $t = 40[s]$ se conecta Z_3 , en $t = 50[s]$ se disminuye la demanda en un %50 del total y en $t = 60[s]$ se desconecta Z_1 . Los resultados del escenario de estudio se presentan en la Figura 6.20.

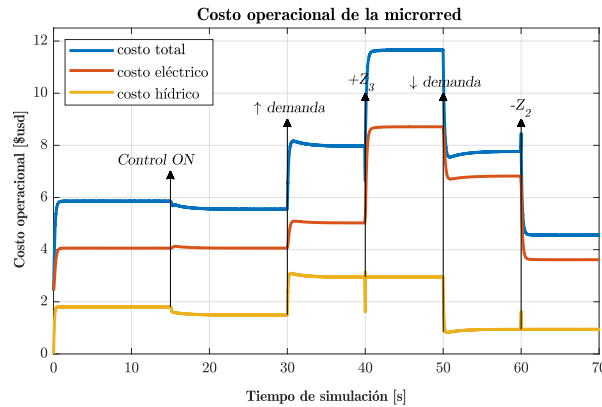


Figura 6.20: Escenario 5: aumento del costo de operación en un 20 %.

Al observar la Figura 6.20, a lo largo del periodo de emulación, se aprecia que el controlador es capaz de realizar el consenso de los costos marginales y por ende el despacho económico hídrico, sin perturbaciones.

Al comparar la Figura 6.20 con la Figura 6.8, se puede observar que en la Figura 6.20 el costo operacional total disminuye de un \$6,111 a un costo total de \$5,672, lo que equivale a

una reducción de costos del %7,739, Dicha reducción de costos es mayor que el %5,365 de reducción de costos obtenidos en el Escenario 1, indicando que la reducción de costos que puede llevar a cabo el controlador es directamente proporcional a los términos de la función de costos cuadrática de la red hídrica.

6.5. Discusión

En este capítulo se presenta todo el trabajo previo requerido para implementar la micro-red agua-energía objetivo y el controlador propuesto mediante *Hardware-In-the-Loop*, con tal de esclarecer todas las limitantes de *hardware* existentes y como moldean estas el trabajo a llevar a cabo. Posteriormente, se reiteró la presentación de novedosa estrategia de control distribuido para el despacho económico hídrico para micro-redes agua-energía, aplicada en un entorno distinto.

El rendimiento del controlador se evalúa mediante emulación y se analiza en cinco escenarios de prueba. Estos resultados indican que el controlador aborda eficazmente la desconexión y reconexión de las bombas de agua y los problemas de los enlaces de comunicación, es decir, retardos pequeños y fallos de comunicación. Destacando la deficiencia del controlador ante retardos prolongados, abriendo la puerta a la implementación de estrategias de control más avanzadas, para sobrellevar dichos retardos comunicacionales. Esta tarea se destaca como trabajo a futuro del trabajo realizado.

A partir del análisis de resultados obtenidos en simulación y emulación, en el próximo capítulo, se procede a concluir la efectividad del controlador, ante los objetivos propuestos, y la validación de las hipótesis del trabajo. Como también, presentar el trabajo futuro que puede derivar de este trabajo.

Capítulo 7

Conclusiones

Debido a las condiciones actuales, garantizar un servicio eléctrico e hídrico de calidad se ha vuelto un desafío en sí mismo. Para llevarlo a cabo, múltiples soluciones se han propuesto e implementado, siendo las micro-redes agua-energía una de las alternativas al problema, dado que permiten incorporar fácilmente energías renovables a la red, sistemas de almacenamiento de energía y componentes hídricos como bombas de agua, desalinizadoras, entre otros.

Para extraer el máximo potencial de las micro-redes agua-energía se requiere desarrollar controladores sofisticados. Control predictivo, programación lineal entera mixta, control multi-objetivo son algunas de las alternativas de control propuestas en la literatura para abordar el control de la red, pero en este trabajo en particular, se opta por diseñar un controlador DAPI y un controlador *leader-follower* distribuido, encargados de trasladar el despacho económico hídrico al control secundario, con tal de elaborar un control complementario capaz de lidiar rápidamente con la variabilidad de la red y con ello mejorar el rendimiento de la red.

Según los resultados emulados y simulados, se puede observar que el controlador es flexible, para resolver el problema de despacho económico, en el tiempo de operación del control secundario, complementando el resto del control jerárquico de la red (operación de los inversores y restauración de frecuencia y tensión de la red, y despacho eléctrico). El controlador en sí no posee información de la red eléctrica, ni de su estructura ni componentes, por ende el controlador es universal. Además, posee un bajo costo computacional al tener su esquema de control centrado en el control PI, lo que favorece su implementación.

De igual manera, queda demostrado que el controlador propuesto es capaz de minimizar los costos de operación de la red, incluso si existen problemas de comunicación, retardos y cambios en la estructura de la red, producto de la tecnología *Plug-and-Play*, en comparación con estrategias tradicionales, tales como el control centralizado, el controlador PI convencional y el controlador por reglas, caracterizando al controlador propuesto como flexible, resiliente y versátil.

Por ende, a modo de resumen, se verifica que el controlador distribuido DAPI propuesto es una estrategia de control prometedora en el control de la micro-redes agua-energía, debido a que permite alcanzar objetivos globales mediante el intercambio de información. También permite superar los problemas más comunes de la red como son los retardos y fallas de comunicación. Además, permite incorporar la tecnología *plug-and-play*, lo que permite variar

la estructura de la red. Finalmente, debido a su formulación matemática y al costo computacional, el controlador es fácil de escalar, sin aumentar la carga computacional cuando se añaden más agentes.

7.1. Trabajo futuro

A continuación se listará el trabajo a futuro que se puede llevar a cabo a partir de este estudio:

1. Una falencia observada en los estudios realizados es claramente la poca resiliencia que tiene el controlador DAPI ante retardos de comunicación grandes. Dichos resultados pueden verse agravados de igual manera si el retardo comunicacional es variable, por ello, se propone como trabajo a futuro implementar estrategias de control más avanzadas, como control predictivo o control predictivo adaptativo basados en MPC, LQR u otros esquemas de control, con tal de que el controlador sea capaz de reconocer el retardo comunicacional y lo compense de buena manera.
2. Por otro lado, se puede mejorar la modelación de la red hídrica mediante la incorporación de pérdidas de caudal en las tuberías de agua y filtraciones, que conlleva que las bombas de agua tengan que extraer un caudal mayor con tal de satisfacer una demanda dada. También se pueden añadir restricciones físicas al modelo, como el volumen de agua máximo capaz de trasladar una tubería de agua de un extremo a otro.
3. Otro trabajo a futuro es mejorar el modelo de la bomba de agua utilizado, por un modelo eléctrico más realista, para que se pueda apreciar de buena manera la dinámica del motor eléctrico que lleva dentro la bomba de agua en la red eléctrica.
4. Implementar el controlador propuesto en una micro-red real a pequeña escala, utilizando las unidades *triphase*, cargas resistivas y cargas programables del laboratorio de micro-redes de la Universidad de Chile, para estudiar la estrategia propuesta en un sistema real.
5. Considerar en el problema de optimización los retardos de encendido de los generadores y las bombas de agua, al igual que los *peaks* de consumo de energía que ocurren durante el encendido.
6. Estudiar el efecto de conectar la micro-red aislada controlada por el controlador propuesto al conectarla con la micro-red principal de energía y agua.

Bibliografía

- [1] Joshi, G. y Mohagheghi, S., “Energy and water co-optimization for the resilient neighborhood of future,” en 2020 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, pp. 1–8, 2020, [doi:10.1109/IAS44978.2020.9334726](https://doi.org/10.1109/IAS44978.2020.9334726).
- [2] Garreaud, R., Boisier, J. P., Rondanelli, R., Montecinos, A., Sepúlveda, H., y Veloso, D., “The central Chile mega drought (2010-2018): A Climate dynamics perspective,” *International Journal of Climatology*, vol. 40, 2019, [doi:10.1002/joc.6219](https://doi.org/10.1002/joc.6219).
- [3] Moazeni, F. y Khazaei, J., “Optimal operation of water-energy microgrids; a mixed integer linear programming formulation,” *Journal of Cleaner Production*, vol. 275, p. 122776, 2020, [doi:https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122776](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122776).
- [4] Pino, P., Iglesias, V., Garreaud, R., Cortés, S., Canals, M., Folch, W., Burgos, S., Levy, K., Naeher, L. P., y Steenland, K., “Chile confronts its environmental health future after 25 years of accelerated growth,” *Annals of Global Health*, vol. 81, no. 3, pp. 354–367, 2015, [doi:https://doi.org/10.1016/j.aogh.2015.06.008](https://doi.org/10.1016/j.aogh.2015.06.008). Climate Change, Global Health and Human Rights.
- [5] Vicuña, S., Vargas, X., Boisier, J. P., Mendoza, P. A., Gómez, T., Vásquez, N., y Cepeda, J., *Impacts of Climate Change on Water Resources in Chile*, pp. 347–363. Cham: Springer International Publishing, 2021, [doi:10.1007/978-3-030-56901-3_19](https://doi.org/10.1007/978-3-030-56901-3_19).
- [6] Roje, T., Sáez, D., Muñoz, C., y Daniele, L., “Energy–water management system based on predictive control applied to the water–food–energy nexus in rural communities,” *Applied Sciences*, vol. 10, no. 21, 2020, [doi:10.3390/app10217723](https://doi.org/10.3390/app10217723).
- [7] Ferroukhi, R., Nagpal, D., López-Peña, , Hodges, T., Mohtar, R., Daher, B., Mohtar, S., y Keulertz, M., “Renewable energy in the water, energy food nexus,” *reporte técnico*, 2015.
- [8] O’Ryan, R., Nasirov, S., y Álvarez Espinosa, A., “Renewable energy expansion in the chilean power market: A dynamic general equilibrium modeling approach to determine co2 emission baselines,” *Journal of Cleaner Production*, vol. 247, p. 119645, 2020, [doi:https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119645](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119645).
- [9] Colmenares, N., Abarca, K., Colmenares, N., y Abarca, K., “La migración a nivel local en Chile. Desafíos, demandas y políticas en tiempos de pandemia,” *Si Somos Americanos*, vol. 22, pp. 164–192, 2022, [doi:10.4067/S0719-09482022000100164](https://doi.org/10.4067/S0719-09482022000100164).
- [10] United States Environmental Protection Agency, “Future of climate change.”, <https://climatechange.chicago.gov/climate-change-science/future-climate-change#main-content>. Pagina web. Visitado: 2023-11-27.
- [11] “Ruta energética 2018-2022,” *reporte técnico*, Ministerio de Energía, 2018.

- [12] Lasseter, R. H., “Microgrids and distributed generation,” *Journal of Energy Engineering*, vol. 133, no. 3, pp. 144–149, 2007, doi:10.1061/(ASCE)0733-9402(2007)133:3(144).
- [13] Generadoras de Chile, “Generación eléctrica en Chile.”, <https://generadoras.cl/generacion-electrica-en-chile>. Pagina web. Visitado: 2023-12-18.
- [14] Farrokhhabadi, M., Cañizares, C. A., Simpson-Porco, J. W., Nasr, E., Fan, L., Mendoza-Araya, P. A., Tonkoski, R., Tamrakar, U., Hatziargyriou, N., Lagos, D., Wies, R. W., Paolone, M., Liserre, M., Meegahapola, L., Kabalan, M., Hajimiragha, A. H., Peralta, D., Elizondo, M. A., Schneider, K. P., Tuffner, F. K., y Reilly, J., “Microgrid stability definitions, analysis, and examples,” *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 35, no. 1, pp. 13–29, 2020, doi:10.1109/TPWRS.2019.2925703.
- [15] Zuo, K. y Wu, L., “A review of decentralized and distributed control approaches for islanded microgrids: Novel designs, current trends, and emerging challenges,” *The Electricity Journal*, vol. 35, no. 5, p. 107138, 2022, doi:https://doi.org/10.1016/j.tej.2022.107138. Behind the meter strategies for enhancing the electricity grid resilience, reliability, economics, sustainability, and security.
- [16] Ministerio de obras públicas, Direccion General de Aguas, “Estrategia nacional de recursos hidricos 2012-2025,” reporte técnico, Ministerio de obras públicas, 2013.
- [17] Daltas, K., “It’s not drought, it’s plunder: commodification and Chile’s water crisis,” 2023.
- [18] Reuters, “Chile announces unprecedented plan to ration water as drought enters 13th year,” *Guardian*, 2022, <https://www.reuters.com/business/environment/chile-announces-unprecedented-water-rationing-plan-drought-enters-13th-year-2022-04-11/>.
- [19] Alvez, A., Aitken, D., Rivera, D., Vergara, M., McIntyre, N., y Concha, F., “At the crossroads: can desalination be a suitable public policy solution to address water scarcity in Chile’s mining zones?,” *Journal of Environmental Management*, vol. 258, p. 110039, 2020, doi:https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.110039.
- [20] Valdés-Negrón, J. M., Astorga-Vega, K., Billi, M., Escobar-Avaria, C., Fuster-Gómez, R., y Anahí, K. S.-U., “Enfrentar la sequía con una regadera: carretera hídrica, riesgos sistémicos y desafíos de política,” 2019.
- [21] Ministerio de energía, División de acceso y desarrollo Social, “Mapa de vulnerabilidad energética, síntesis metodológica y resultados,” reporte técnico, Ministerio de energía, 2019.
- [22] ODEPA, Oficina de Estudios y Políticas Agrarias, “Agua para la agricultura.” <https://www.odepa.gob.cl/sustentabilidad/agricultura-sustentable/agua>, 2022. Pagina web. Visitado: 2023-12-18.
- [23] Xu, Y. y Li, Z., “Distributed optimal resource management based on the consensus algorithm in a microgrid,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 62, no. 4, pp. 2584–2592, 2015, doi:10.1109/TIE.2014.2356171.
- [24] Li, C., Savaghebi, M., Vasquez, J. C., y Guerrero, J. M., “Multiagent based distributed control for operation cost minimization of droop controlled ac microgrid using incremental cost consensus,” en 2015 17th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE’15 ECCE-Europe), pp. 1–9, 2015, doi:10.1109/EPE.2015.7311784.
- [25] Putri, S. A., Moazeni, F., y Khazaei, J., “Predictive control of interlinked water-energy

- microgrids,” *Applied Energy*, vol. 347, p. 121455, 2023, doi:<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.121455>.
- [26] Llanos Proaño, J., Design and evaluation of distributed controllers for optimal dispatch and congestion management of microgrids. tesis para optar al grado de doctor en ingeniería eléctrica, Universidad de Chile, 2020.
- [27] Ahumada Sanhueza, C., “Diseño de estrategias de control predictivas para micro-redes mediante curvas de droop,” tesis para optar al magíster en ciencias de la ingeniería, mención eléctrica, Universidad de Chile, 2013.
- [28] Bidram, A. y Davoudi, A., “Hierarchical structure of microgrids control system,” *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 3, no. 4, pp. 1963–1976, 2012, doi:[10.1109/TSG.2012.2197425](https://doi.org/10.1109/TSG.2012.2197425).
- [29] Greyard, T., “Overview of the microgrid concept and its hierarchical control architecture,” *International journal of engineering research and technology*, vol. 5, 2016, <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:61436710>.
- [30] Ahumada, C., Cárdenas, R., Sáez, D., y Guerrero, J. M., “Secondary control strategies for frequency restoration in islanded microgrids with consideration of communication delays,” *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 7, no. 3, pp. 1430–1441, 2016, doi:[10.1109/TSG.2015.2461190](https://doi.org/10.1109/TSG.2015.2461190).
- [31] Gómez, J. S., Sáez, D., Simpson-Porco, J. W., y Cárdenas, R., “Distributed predictive control for frequency and voltage regulation in microgrids,” *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 11, no. 2, pp. 1319–1329, 2020, doi:[10.1109/TSG.2019.2935977](https://doi.org/10.1109/TSG.2019.2935977).
- [32] Navas-Fonseca, A., Burgos-Mellado, C., Espina, E., Rute, E., Gómez, J. S., Sáez, D., y Sumner, M., “Distributed predictive secondary control for voltage restoration and economic dispatch of generation for dc microgrids,” en *2021 IEEE Fourth International Conference on DC Microgrids (ICDCM)*, pp. 1–6, 2021, doi:[10.1109/ICDCM50975.2021.9504612](https://doi.org/10.1109/ICDCM50975.2021.9504612).
- [33] Espina, E., Llanos, J., Burgos-Mellado, C., Cárdenas-Dobson, R., Martínez-Gómez, M., y Sáez, D., “Distributed control strategies for microgrids: An overview,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 193412–193448, 2020, doi:[10.1109/ACCESS.2020.3032378](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3032378).
- [34] Rocabert, J., Luna, A., Blaabjerg, F., y Rodríguez, P., “Control of power converters in ac microgrids,” *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 27, no. 11, pp. 4734–4749, 2012, doi:[10.1109/TPEL.2012.2199334](https://doi.org/10.1109/TPEL.2012.2199334).
- [35] Palizban, O. y Kauhaniemi, K., “Hierarchical control structure in microgrids with distributed generation: Island and grid-connected mode,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 44, pp. 797–813, 2015, doi:<https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.01.008>.
- [36] Simpson-Porco, J. W., Shafiee, Q., Dörfler, F., Vasquez, J. C., Guerrero, J. M., y Bullo, F., “Secondary frequency and voltage control of islanded microgrids via distributed averaging,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 62, no. 11, pp. 7025–7038, 2015, doi:[10.1109/TIE.2015.2436879](https://doi.org/10.1109/TIE.2015.2436879).
- [37] Gómez Quintero, J., Distributed predictive control for frequency and voltage regulation in microgrids. tesis para optar al grado de doctor en ingeniería eléctrica, Universidad de Chile, 2020.
- [38] Navas Fonseca, A., A distributed predictive secondary control for voltage and frequency

regulation, economic dispatch and imbalance sharing in isolated microgrids. tesis para optar al grado de doctor en ingeniería eléctrica, Universidad de Chile, 2022.

- [39] Khodabandeh, S., Shishavan, H. K., y Hashemzadeh, F., “Distributed fault tolerant control and estimation for leader-follower consensus of multi-agent systems with actuator faults,” en 2017 IEEE 4th International Conference on Knowledge-Based Engineering and Innovation (KBEI), pp. 0872–0877, 2017, doi:[10.1109/KBEI.2017.8324920](https://doi.org/10.1109/KBEI.2017.8324920).
- [40] Ren, Y., Wang, Q., y Duan, Z., “Optimal distributed leader-following consensus of linear multi-agent systems: A dynamic average consensus-based approach,” IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs, vol. 69, no. 3, pp. 1208–1212, 2022, doi:[10.1109/TCSII.2021.3094056](https://doi.org/10.1109/TCSII.2021.3094056).
- [41] Hu, J., Chen, G., y Li, H.-X., “Distributed event-triggered tracking control of second-order leader-follower multi-agent systems,” en Proceedings of the 30th Chinese Control Conference, pp. 4819–4824, 2011.
- [42] He, Y. y Cai, H., “Distributed consensus control of an interconnected leader-follower multiagent system under switching network,” en 2020 39th Chinese Control Conference (CCC), pp. 5043–5046, 2020, doi:[10.23919/CCC50068.2020.9189095](https://doi.org/10.23919/CCC50068.2020.9189095).
- [43] Putri, S. A., Moazeni, F., y Khazaei, J., “Predictive control of interlinked water-energy microgrids,” Applied Energy, vol. 347, p. 121455, 2023, doi:<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.121455>.
- [44] Sui, Q., Wei, F., Lin, X., y Li, Z., “Optimal energy management of a renewable microgrid integrating water supply systems,” International Journal of Electrical Power Energy Systems, vol. 125, p. 106445, 2021, doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2020.106445>.
- [45] Moazeni, F., Khazaei, J., y Pera Mendes, J. P., “Maximizing energy efficiency of islanded micro water-energy nexus using co-optimization of water demand and energy consumption,” Applied Energy, vol. 266, p. 114863, 2020, doi:<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.114863>.
- [46] Jalilian, F., Mirzaei, M. A., Zare, K., Mohammadi-Ivatloo, B., Marzband, M., y Anvari-Moghaddam, A., “Multi-energy microgrids: An optimal despatch model for water-energy nexus,” Sustainable Cities and Society, vol. 77, p. 103573, 2022, doi:<https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.103573>.
- [47] Daw, J., Kandt, A., Giraldez, J., Macknick, J., Anderson, K., Armstrong, N., y Adams, J., “Energy-water microgrid opportunity analysis at the university of arizona’s biosphere 2 facility,” reporte técnico, 2018.
- [48] Cejudo Marmolejo, C. E., Stoughton, K. L., Piazza, A. M., Gunderson, P. K., Yoon, J. J., Ekre, R., y Pamintuan, B. C., “Water microgrids: A primer for facility managers,” reporte técnico.
- [49] Wood, E., “What is a microgrid?,” 2023.
- [50] Mavuri, S. S., Nakka, J., y Kotla, A., “Interconnected microgrids: A review and future perspectives,” en 2022 IEEE 2nd International Conference on Sustainable Energy and Future Electric Transportation (SeFeT), pp. 1–7, 2022, doi:[10.1109/SeFeT55524.2022.9908988](https://doi.org/10.1109/SeFeT55524.2022.9908988).
- [51] Energy Action Group, “Energy management,” 2021, <https://eaguk.org/energy-services/energy-management/>. Pagina web. Visitado: 2023-12-27.

- [52] Kiehadrouinezhad, M., Merabet, A., Rajabipour, A., Cada, M., Kiehadrouinezhad, S., Khanali, M., y Hosseinzadeh-Bandbafha, H., “Optimization of wind/solar energy microgrid by division algorithm considering human health and environmental impacts for power-water cogeneration,” *Energy Conversion and Management*, vol. 252, p. 115064, 2022, doi:<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.115064>.
- [53] Moazeni, F. y Khazaei, J., “Dynamic economic dispatch of islanded water-energy microgrids with smart building thermal energy management system,” *Applied Energy*, vol. 276, p. 115422, 2020, doi:<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115422>.
- [54] Bustos, R., Marín, L. G., Navas-Fonseca, A., Reyes-Chamorro, L., y Sáez, D., “Hierarchical energy management system for multi-microgrid coordination with demand-side management,” *Applied Energy*, vol. 342, p. 121145, 2023, doi:<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.121145>.
- [55] Sanchez, J., “How energy and water are intertwined.” <https://www.linkedin.com/pulse/how-energy-water-intertwined-jerome-sanchez>, 2015. Pagina web. Visitado: 2024-1-30.
- [56] Jafarinejad, S., Hernandez, R. R., Bigham, S., y Beckingham, B. S., “The intertwined renewable energy and water environment (rewe) nexus challenges and opportunities: A case study of california,” *Sustainability*, vol. 15, no. 13, 2023, doi:[10.3390/su151310672](https://doi.org/10.3390/su151310672).
- [57] School, H., “Energy and water are closely intertwined,” *Planete energies*, 2018.
- [58] Silva-Rodriguez, J. y Li, X., “Water-energy co-optimization for community-scale microgrids,” en *2021 North American Power Symposium (NAPS)*, pp. 1–6, 2021, doi:[10.1109/NAPS52732.2021.9654518](https://doi.org/10.1109/NAPS52732.2021.9654518).
- [59] Moazeni, F., Khazaei, J., y Asrari, A., “Step towards energy-water smart microgrids; buildings thermal energy and water demand management embedded in economic dispatch,” *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 12, no. 5, pp. 3680–3691, 2021, doi:[10.1109/TSG.2021.3068053](https://doi.org/10.1109/TSG.2021.3068053).
- [60] El-Hendawi, M., Gabbar, H. A., El-Saady, G., y Ibrahim, E.-N. A., “Enhanced mg with optimum operational cost of pumping water distribution systems,” en *2017 IEEE International Conference on Smart Energy Grid Engineering (SEGE)*, pp. 137–142, 2017, doi:[10.1109/SEGE.2017.8052789](https://doi.org/10.1109/SEGE.2017.8052789).
- [61] Palma-Behnke, R., Benavides, C., Aranda, E., Llanos, J., y Sáez, D., “Energy management system for a renewable based microgrid with a demand side management mechanism,” en *2011 IEEE Symposium on Computational Intelligence Applications In Smart Grid (CIASG)*, pp. 1–8, 2011, doi:[10.1109/CIASG.2011.5953338](https://doi.org/10.1109/CIASG.2011.5953338).
- [62] Meneses, M. P., Jaimes, A. F., y Quintana, J. V., “Water-energy nexus and stochastic optimization in a isolated microgrid: application in arid zones of la guajira in colombia,” en *2022 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe (ISGT-Europe)*, pp. 1–5, 2022, doi:[10.1109/ISGT-Europe54678.2022.9960560](https://doi.org/10.1109/ISGT-Europe54678.2022.9960560).
- [63] Mehmood, F., Khan, B., Ali, S. M., y Rossiter, J. A., “Distributed mpc for economic dispatch and intermittence control of renewable based autonomous microgrid,” *Electric Power Systems Research*, vol. 195, p. 107131, 2021, doi:<https://doi.org/10.1016/j.epsr.2021.107131>.
- [64] Li, Z., Cheng, Z., Liang, J., Si, J., Dong, L., y Li, S., “Distributed event-triggered second-

- dary control for economic dispatch and frequency restoration control of droop-controlled ac microgrids,” *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 11, no. 3, pp. 1938–1950, 2020, doi:10.1109/TSTE.2019.2946740.
- [65] Braun, M., “Reactive power supplied by wind energy converters - cost-benefit-analysis,” *Fraunhofer IWES*, vol. 3, 2008.
- [66] Moazeni, F. y Khazaei, J., “Optimal operation of water-energy microgrids; a mixed integer linear programming formulation,” *Journal of Cleaner Production*, vol. 275, p. 122776, 2020, doi:https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122776.
- [67] Department of Energy, “Determining electric motor load and efficiency.” <https://docplayer.net/19415172-Determining-electric-motor-load-and-efficiency.html>. Pagina web. Visitado: 2024-1-31.
- [68] Jeyakumar, V. y Wolkowicz, H., “Generalizations of slater’s constraint qualification for infinite convex programs,” *Math. Program.*, vol. 57, pp. 85–101, 1992, doi:10.1007/BF01581074.
- [69] PLEXIM, “Plecs.”, <https://www.plexim.com/products/plecs>. Pagina web. Visitado: 2024-03-08.
- [70] MathWorks, “Simulación y diseño basado en modelos con simulink.”, <https://la.mathworks.com/products/simulink.html>. Pagina web. Visitado: 2024-03-08.
- [71] Gomez, J., Saez, D., Simpson-Porco, J., y Cardenas, R., “Distributed predictive control for frequency and voltage regulation in microgrids,” *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 11, pp. 1319–1329, 2020, doi:10.1109/TSG.2019.2935977. Publisher Copyright: © 2010-2012 IEEE.
- [72] Serban, I., Céspedes, S., Marinescu, C., Azurdia-Meza, C., Gómez, J., y Saez, D., “Communication requirements in microgrids: A practical survey,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 47694–47712, 2020, doi:10.1109/ACCESS.2020.2977928.
- [73] H., B., “Estimating irrigation water requirements,” reporte técnico, University of Maryland, 2009.
- [74] Plexim, “RT box 1.” https://www.plexim.com/products/rt_box/rt_box_1. Pagina web. Visitado: 2024-3-11.
- [75] dSpace, “Microlabbox - dspace.”, https://www.dspace.com/en/pub/home/medien/product_info/microlabbox_product-brochure.cfm. Pagina web. Visitado: 2023-6-01.
- [76] Cardenas, R., “Sistemas de Control Primario y Secundario.”, https://www.u-cursos.cl/ingenieria/2013/1/EL7033/1/material_docente/bajar?id_material=736792. Pagina web. Visitado: 2022-05-28.

Anexos

Anexo A. Diseño control primario

A.1. Lazo de corriente

Para calcular las constantes k_p y k_i del controlador proporcional-integral (PI) del lazo de corriente, se ignora el lazo exterior de voltaje dado que este es más lento y por ende se asume constante y se calcula la función de transferencia a lazo abierto G_{ol_c} del sistema. Dicha función de transferencia se presenta en la ecuación (A.1).

$$G_{ol_c} = \frac{i_{inv}}{E_{inv}} = \frac{K_p^i \cdot s + K_i^i}{s} \cdot \frac{\frac{1}{L_f}}{s + \frac{1}{L_f}} \quad (A.1)$$

En (A.1), L_f corresponde a la inductancia del filtro de salida del inversor, s corresponde a la transformada de Laplace y, K_p y K_i corresponden a la constante proporcional e integral del controlador PI a diseñar. Determinada la función de transferencia a lazo abierto, se puede calcular la función de transferencia del sistema a lazo cerrado, obteniendo la función de transferencia T_f^c de la ecuación (A.2).

$$T_f^c = \frac{i_{inv}}{E_{inv}} = \frac{G_{ol_c}}{1 + G_{ol_c}} \longrightarrow \frac{\frac{K_p^i}{L_f} \cdot s + \frac{K_i^i}{L_f}}{s^2 + s \cdot \frac{1}{L_f}(K_p) + \frac{K_i^i}{L_f}} \quad (A.2)$$

Al aplicar Ziegler Nichols y escribir la función de transferencia T_f^c en función del de amortiguamiento y la frecuencia natural, se obtienen las ecuaciones (A.3) y (A.4).

$$w_n = \sqrt{\frac{K_i^i}{L_f}} \longrightarrow K_i^i = w_n^2 \cdot L_f \quad (A.3)$$

$$\xi = \frac{K_p^i + R_f}{2L_f w_n} \longrightarrow K_p^i = 2\xi \cdot w_n \cdot L_f \quad (A.4)$$

Dado que el sistema de control de corriente debe ser el más rápido del sistema [76], se utiliza una frecuencia natural de $\omega_n = 1000\pi[\frac{rad}{s}]$, un factor de amortiguamiento de $\xi = 0,707$ y una inductancia de $0,85[mH]$. Al reemplazar los valores en las ecuaciones objetivos, se obtiene que las constantes del controlador son: $K_p^i = 4,2726$ y $K_i^i = 8389,2$

A.2. Lazo de tensión

Para calcular las constantes k_p y k_i del controlador PI del lazo de tensión, se ignora el lazo interior de corriente, dado que su dinámica es muy rápida. Al aplicar el controlador PI

a lazo abierto, se obtiene la función de transferencia G_{ol_v}

$$G_{ol_v} = \frac{E_{inv}}{i_{inv}} = \frac{K_p^v \cdot s + K_i^v}{s} \cdot \frac{1}{s \cdot C_f} \quad (\text{A.5})$$

En (A.5), C_f corresponde a la capacitancia del filtro de salida del inversor, s corresponde a la transformada de Laplace y, K_p y K_i corresponden a la constante proporcional e integral del controlador PI. Determinada la función de transferencia a lazo abierto, se puede calcular la función de transferencia del sistema a lazo cerrado, obteniendo la función T_f^v de la ecuación (A.6).

$$T_f^v = \frac{E_{inv}}{i_{inv}} = \frac{G_{ol_v}}{1 + G_{ol_v}} \longrightarrow \frac{\frac{1}{C_f} \cdot (K_p^v \cdot s + K_i^v)}{s^2 + \frac{K_p^v}{C_f} \cdot s + \frac{K_i^v}{C_f}} \quad (\text{A.6})$$

Al aplicar Ziegler Nichols y escribir la función de transferencia T_f^v en función del de amortiguamiento y la frecuencia natural, se obtienen las ecuaciones (A.7) y (A.8).

$$w_n = \sqrt{\frac{K_i^v}{C_f}} \longrightarrow K_i^v = w_n^2 \cdot C_f \quad (\text{A.7})$$

$$\xi = \frac{1}{2w_n} \cdot \left(\frac{1}{C_f} + \frac{K_p^v}{C_f} \right) \longrightarrow K_p^v = 2\xi \cdot w_n \cdot C_f \quad (\text{A.8})$$

Dado que la frecuencia del sistema de control de voltaje es 10 veces más lenta que la frecuencia del sistema de control de corriente [76], se utiliza una frecuencia natural de $w_v = 100\pi[\frac{rad}{s}]$, un factor de amortiguamiento de $\xi = 0,707$ y una capacitancia 10 veces mayor a la del sistema $C_f = 700[\mu F]$, con el objetivo de amortiguar las oscilaciones. Al reemplazar los valores en las ecuaciones objetivos, se obtiene que las constantes del controlador son: $K_p^v = 0,3519$ y $K_i^v = 69,0872$.

A.3. Control droop

El control droop consta de dos componentes esenciales, el filtro de desacople y las ecuaciones de droop. El filtro de desacople, como dice su nombre, es un filtro pasa bajo utilizado tanto para desacoplar el control *droop* de los controladores del lazo interno, como para extraer la componente fundamental de la potencia instantánea, activa y reactiva de la red[76]. La ecuación que describe el filtro se muestra en la ecuación (A.9).

$$Filtro = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{Q_{out}}{Q_{in}} = \frac{\omega_c}{s + \omega_c} \quad (\text{A.9})$$

En (A.9), P_{in} y Q_{in} son la potencia activa y reactiva que entran al filtro, mientras que P_{out} y Q_{out} son sus respectivas salidas. ω_c es la frecuencia de corte del filtro y s es la transformada de Laplace.

Por construcción, el filtro debe ser 10 veces más pequeño que el ancho de banda del control primario [76], para poder eliminar el ruido de medición y obtener una señal más limpia. En este trabajo, se diseña el PLL siguiendo las indicaciones de [26, 38] y se construye el filtro con una frecuencia de corte menor de $1[Hz]$.

De igual manera, las pendientes de *droop*, se extraen a partir del trabajo realizado por [26, 38], los cuales evaluaron sus controladores en un *setup* experimental, validando sus parámetros para dicho sistema. Dichos valores son $m = 1,4 \cdot 10^{-4}$ y $n = 3,7 \cdot 10^{-3}$.

A.4. PLL

La planta que modela la frecuencia del sistema viene dada por la ecuación $T_f = \frac{|V_g|}{s}$ [27]. Considerando un controlador PI convencional sobre el sistema a lazo abierto, se obtiene la función de transferencia G_{olp} .

$$G_{olp} = |V_g| \cdot \frac{K_p \cdot s + K_i}{s} \cdot \frac{1}{s} \quad (\text{A.10})$$

Determinada la función de transferencia a lazo abierto, se puede calcular la función de transferencia del sistema a lazo cerrado, obteniendo la función T_f^p de la ecuación (A.11).

$$T_f^p = \frac{G_{olp}}{1 + G_{olp}} \longrightarrow \frac{|V_g| \cdot (K_p \cdot s + K_i)}{s^2 + |V_g| \cdot K_p \cdot s + |V_g| \cdot K_i} \quad (\text{A.11})$$

Aplicando Ziegler Nichols se escribe la función de transferencia T_f^p en función del de amortiguamiento y la frecuencia natural, obteniendo las ecuaciones (A.12) y (A.13).

$$w_n = \sqrt{|V_g| \cdot K_i} \longrightarrow K_i = w_n^2 \cdot |V_g| \quad (\text{A.12})$$

$$\xi = \frac{|V_g| \cdot K_p}{2w_n} \longrightarrow K_p = \frac{2 \cdot \xi \cdot w_n}{|V_g|} \quad (\text{A.13})$$

Al utilizar $w_n = 35[\text{Hz}]$ de frecuencia y $\xi = 0,8$ de amortiguamiento en las ecuaciones anteriores, se obtiene que las constantes del controlador del PLL son $K_p = 0,2453$ y $K_i = 25,7085$.

Anexo B. Otras topologías del control secundario

Para controlar una micro-red existen múltiples topologías de control, como el control distribuido presentado en el capítulo 2, a continuación se presentarán las otras topologías de control de micro-redes existentes:

B.1. Control secundario centralizado

El esquema de control secundario centralizado radica en un único controlador central que mediante el uso de mediciones globales determina la acción de control óptima a ejercer. Dado que el controlador es único, requiere que la capacidad de procesamiento sea acorde al total de los datos transmitidos por los elementos de la red [26]. Este hecho puede ser una limitante en micro-redes de gran tamaño. La red de comunicación del control centralizado se observa en la Figura B.1.

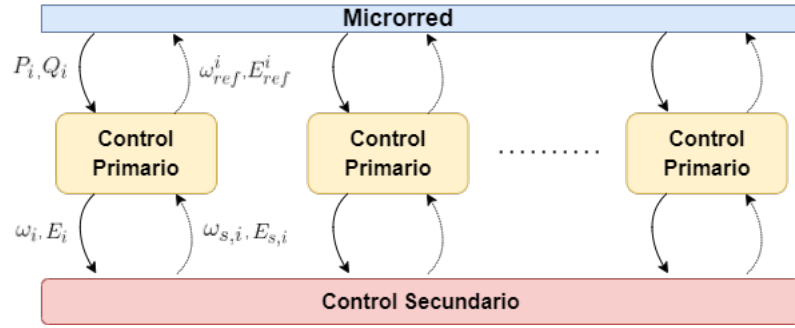


Figura B.1: Arquitectura de Control Centralizado. Autoría propia.

La mayor deficiencia de este método es su poca robustez ante fallos en la red de comunicación, puesto que, de existir una falla, el controlador no obtendría todos los datos necesarios para realizar la correcta restauración de frecuencia/voltaje, entregando acciones de control no óptimas que pueden desestabilizar la red. Bajo el mismo principio, no se puede realizar operaciones *plug-and-play* de unidades de generación en sistemas centralizados [26].

B.2. Control secundario descentralizado

A diferencia de las otras arquitecturas, el control secundario descentralizado propone que cada fuente de generación funcione de manera local e independiente, eliminando con ello la necesidad de una red de comunicación. La metodología del esquema de control se centra en las curvas de droop, de frecuencia y tensión, compartiendo la carga entre las unidades acorde a su capacidad de potencia a través de enlaces físicos [26]. La arquitectura del sistema se muestra en la figura B.2.

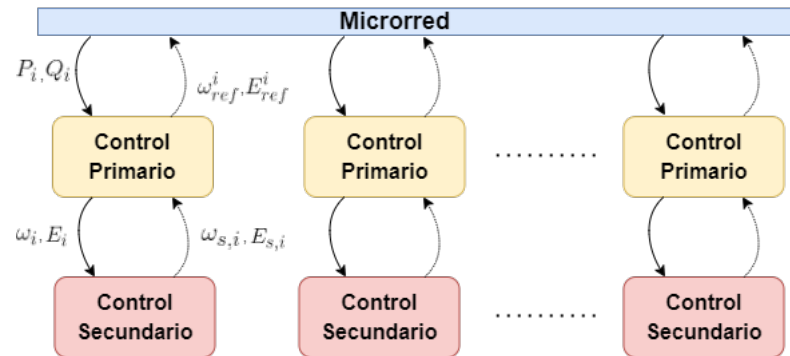


Figura B.2: Arquitectura de Control descentralizado. Autoría propia.

Debido a que los controladores operan de manera local y a que no poseen información de otras unidades vecinas, las soluciones que entregan los controladores no serán óptimas, puesto que para ello, se requiere información de todo el sistema, que solo la arquitectura centralizada y distribuida poseen [26].

Anexo C. Diseño control secundario

Para elaborar el control secundario de la red eléctrica, encargado de la restauración de la frecuencia y tensión de la red, se siguieron las indicaciones dadas en [26, 38, 76], es decir, que

la frecuencia natural de los controladores tiene que ser un décimo de la frecuencia del control droop o en torno a este valor. Por ello, se utiliza $f = 0,209[Hz]$ y un tiempo de establecimiento de $3[s]$. Considerando una planta unitaria y un sistema controlado a lazo abierto, la función de transferencia G_{ol}^{sec} viene dada por la ecuación (C.1).

$$G_{ol}^{sec} = \frac{K_p^i \cdot s + K_i^i}{s} \cdot \frac{1}{s} \quad (C.1)$$

Utilizando el lugar geométrico de la raíz y las indicaciones dadas, se tiene que la constante proporcional K_p e integral K_i son $K_p = 0,1913$ y $K_i = 2,0170$. Como se presentó en secciones anteriores, el control secundario de tensión y frecuencia solo posee parte integral, por ello, se descarta el término $K_p = 0,1913$. Cabe destacar que los controladores encargados del despacho económico, eléctrico e hídrico, adoptaron la misma constante integral, para coincidir en los tiempos de establecimiento del control secundario.