



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

**CONTROL PREDICTIVO SECUNDARIO DISTRIBUIDO PARA
MICRO-REDES HÍBRIDAS AC/DC**

TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE MAGÍSTER EN CIENCIAS
DE LA INGENIERÍA, MENCIÓN ELÉCTRICA
MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL ELÉCTRICO

ERWIN ANDRÉS RUTE LUENGO

PROFESORA GUÍA:
DRA. DORIS SÁEZ HUEICHAPAN

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
DR. ROBERTO CÁRDENAS DOBSON
DR. DANIEL SBÁRBARO HOFER

SANTIAGO DE CHILE
2020

RESUMEN DE LA TESIS PARA OPTAR AL TÍTULO
DE: Ingeniero Civil Eléctrico y grado de Magister en
Ciencias de la Ingeniería, Mención Ingeniería Eléctrica.
POR: Erwin Andrés Rute Luengo
FECHA: 2020
PROFESORA GUÍA: Dra. Doris Sáez Hueichapan

CONTROL PREDICTIVO SECUNDARIO DISTRIBUIDO PARA MICRO-REDES HÍBRIDAS AC/DC

En años recientes, han ido en aumento los estudios referentes a micro-redes híbridas, cuya ventajas radican en una mayor eficiencia, confiabilidad y calidad de potencia. Con respecto al control de estas micro-redes, esta tesis aborda el control a nivel secundario con interés en un esquema distribuido, debido a su robustez frente a cambios eléctricos/comunicación, menor carga computacional y solución cercana a la óptima. Además, esta tesis aborda el control predictivo, cuyo interés radica en que permite mayor robustez frente a retardos en la red de comunicación e incluye características del control óptimo.

Esta tesis presenta un controlador predictivo secundario distribuido para micro-redes híbridas, que permite restaurar frecuencia y tensión promedio en una micro-red AC a valores nominales, y tensión promedio en una micro-red DC a su valor nominal. Además, permite lograr consenso de potencia activa proporcional entre todas las unidades del sistema por medio de un *Interlinking Converter*.

Esta propuesta es validada por simulación en Matlab/Simulink/Plecs y experimentalmente, en el Laboratorio Control de Micro-redes de la Universidad de Chile, por medio de tres escenarios: impactos de carga, capacidad *plug-and-play* y retardo en red de comunicación. Los resultados comprueban el buen desempeño del controlador logrando cumplir con los objetivos de control.

Agradecimientos

Primero que todo, le agradezco muchísimo a la profe Doris por su confianza y constante apoyo durante años, así como en la realización de esta tesis. Estoy muy agradecido por darme la posibilidad de ser partícipe en diversos desafíos y poder cursar el magíster durante todo este tiempo. También le agradezco mucho al profe Roberto por su apoyo en la realización del magíster y en diversas postulaciones. También las gracias por permitirme trabajar en el laboratorio y otorgarme su confianza para operar los equipos.

Quiero agradecer infinitamente a mis padres Paola y Erwin, y a mi hermanita Shofi, por su infinito amor y apoyo incondicional en todos los aspectos. Gracias a ustedes he podido lograr las metas que me he propuesto y ser la persona quién soy. También agradecer a mis tíos de Placilla Eduardo y Edith, y mis primitos Exe y Denisse, que siempre me recibieron con los brazos abiertos y me dieron buenos consejos.

Agradezco a mis compañeros de los laboratorios de Control de Micro-redes y Electrónica de Potencia por los gratos momentos en diversas festividades y siempre por su gran disposición a ayudarme cuando lo necesité. Por supuesto, agradezco también a mis amigos de la Universidad y de la infancia por esos notables momentos haciéndonos bolsa jugando fútbol o cuándo íbamos a pasar las penas con alguna chelita en cualquier rincón que pillábamos. Espero que nos sigamos reuniendo con el pasar de los años, a pesar de todas las circunstancias. También agradecer a mi querida ciudad Puerto Montt, que con sus bellos paisajes y aire puro siempre me reconfortó en mis descansos, con el fin de seguir adelante en mis desafíos.

Finalmente, agradezco el apoyo en la realización de esta tesis a: Proyecto FONDECYT 1170683 “Robust Distributed Predictive Control Strategies for the Coordination of Hybrid AC and DC Microgrids”, Instituto Sistemas Complejos de Ingeniería (ISCI) ANID PIA/BASAL AFB180003, Solar Energy Research Center SERC-Chile ANID/FONDAP/15110019, Proyecto Basal FB0008, Advanced Centre for Electrical and Electronic Engineering, Proyecto FONDEQUIP EQM130158 “Microgrid Emulator for the Design and Validation of Novel Control Strategies” y Proyecto FONDEQUIP EQM160122 “Equipment for the Emulation and Testing of Energy Storage Systems”.

Tabla de contenido

1. Introducción	1
1.1. Motivación	1
1.2. Objetivos	2
1.3. Hipótesis	3
1.4. Alcances	3
1.5. Metodología propuesta	4
1.6. Estructura de la tesis	5
2. Estado del Arte	7
2.1. Control de micro-redes	7
2.1.1. Micro-redes AC	8
2.1.2. Micro-redes DC	11
2.1.3. Micro-redes híbridas AC/DC	13
2.2. Control Secundario Distribuido (DSC)	15
2.2.1. DSC aplicado a micro-redes AC	15
2.2.2. DSC aplicado a micro-redes DC	17
2.2.3. DSC aplicado a micro-redes híbridas AC/DC	19
2.3. Control predictivo secundario	20
2.3.1. MPC secundario distribuido aplicado a micro-redes AC	22
2.3.2. MPC secundario aplicado a micro-redes DC	23
2.3.3. MPC secundario aplicado a micro-redes híbridas AC/DC	23
2.4. Discusión	24
3. Control predictivo secundario AC/DC propuesto	25
3.1. Configuración de las micro-redes	26
3.2. Control predictivo secundario aplicado a micro-redes AC	27
3.2.1. Ecuaciones droop	28
3.2.2. Ecuación de ángulo de fase	29
3.2.3. Ecuación de transferencia de potencia activa	29
3.2.4. Ecuación de transferencia de potencia reactiva	29
3.2.5. Modelo en tiempo discreto	30
3.2.6. Controlador predictivo	30
3.2.7. Formulación programación cuadrática	32
3.3. Propuesta control predictivo distribuido secundario aplicado a micro-redes DC	33
3.3.1. Ecuación droop	34
3.3.2. Ecuación de transferencia de potencia	35

3.3.3.	Modelo en tiempo discreto	35
3.3.4.	Controlador predictivo propuesto	35
3.3.5.	Formulación programación cuadrática	36
3.4.	Propuesta DMPC secundario aplicado a micro-redes AC/DC con controlador integral en el ILC	37
3.5.	Propuesta DMPC secundario aplicado a micro-redes AC/DC con controlador predictivo en el ILC	38
3.5.1.	Formulación programación cuadrática	40
3.6.	Discusión	41
4.	Resultados por simulación	43
4.1.	DMPC secundario aplicado a Micro-redes DC	43
4.1.1.	Impactos de carga	46
4.1.2.	Capacidad Plug and Play	47
4.1.3.	Retardo en la red de comunicación	48
4.2.	DMPC secundario aplicado a Micro-redes híbridas AC/DC con un ILC	49
4.2.1.	Impacto y desconexión de cargas	53
4.2.2.	Capacidad Plug-and-Play	56
4.2.3.	Retardo en la red de comunicación	59
4.3.	Discusión	63
5.	Resultados experimentales	65
5.1.	Unidades Triphase	65
5.1.1.	Unidad PM15F120C	65
5.1.2.	Unidad PM5F60R	66
5.1.3.	Unidad PM5F42R	66
5.1.4.	Unidad PM15I60F06	66
5.2.	Topología experimental	67
5.3.	Resultados	69
5.3.1.	Escenario I (Caso Base) - Impactos de carga	71
5.3.2.	Escenario II - Retardo en la red de comunicación	74
5.3.3.	Discusión	78
6.	Conclusiones	80
6.1.	Trabajo futuro	81
	Bibliografía	83
7.	Anexo	89
7.1.	Observador no lineal de estado reducido	89
7.1.1.	Aplicación	91

Índice de figuras

2.1.	Topología general de una micro-red AC [11].	8
2.2.	Modelo referencia para las ecuaciones de transferencia de potencia [18].	9
2.3.	Topologías de redes de comunicaciones para el control de micro-redes [22].	11
2.4.	Topología de una micro-red DC [23].	11
2.5.	Topología general de una micro-red híbrida [5].	13
2.6.	Topología de ILC utilizado en esta tesis.	14
2.7.	Estructura básica de un MPC [10].	21
3.1.	Estrategia de control propuesta en la micro-red AC [50],[51].	28
3.2.	Estrategia de control propuesta en la micro-red DC.	34
3.3.	Diagrama de control del Interlinking Converter.	39
4.1.	Topología de la micro-red DC por simulación	44
4.2.	Resultados por simulación del DMPC secundario aplicado a una micro-red DC para la prueba de impactos de carga: (a) Potencia activa normalizada entregada por los GDs-dc. (b) Voltaje de los GDs-dc.	47
4.3.	Resultados por simulación del DMPC secundario aplicado a una micro-red DC para la prueba de capacidad Plug and Play: (a) Potencia activa normalizada entregada por los GDs-dc. (b) Voltaje de los GDs-dc.	48
4.4.	Consenso de potencia activa entre las unidades de la micro-red DC para el caso de retardos en la red de comunicación: (a) $\tau_{ij} = 0,3s$. (b) $\tau_{ij} = 0,5s$. (c) $\tau_{ij} = 0,8s$	49
4.5.	Tensión de los GDs de la micro-red DC para el caso de retardos en la red de comunicación: (a) $\tau_{ij} = 0,3s$. (b) $\tau_{ij} = 0,5s$. (c) $\tau_{ij} = 0,8s$	49
4.6.	Topología de la micro-red híbrida por simulación	50
4.7.	Resultados por simulación del DMPC secundario aplicado a una micro-red híbrida AC/DC para el caso de conexión y desconexión de cargas: (a) Potencia activa normalizada entregada por los GDs-ac y GDs-dc. (b) Potencia reactiva normalizada entregada por los GDs-ac. (c) Potencia activa transferida por el ILC.	55
4.8.	Resultados por simulación del DMPC secundario aplicado a una micro-red híbrida AC/dC para el caso de conexión y desconexión de cargas: (a) Frecuencia de los GDs de la micro-red AC. (b) Voltaje de los GDs de la micro-red AC. (c) Voltaje de los GDs de la micro-red DC.	56

4.9. Resultados por simulación del DMPC secundario aplicado a una micro-red híbrida AC/DC para la prueba de capacidad <i>plug-and-play</i> : (a) Potencia activa normalizada entregada por los GDs-ac y GDs-dc. (b) Potencia reactiva normalizada entregada por los GDs-ac. (c) Potencia activa transferida por el ILC.	58
4.10. Resultados por simulación del DMPC secundario aplicado a una micro-red híbrida AC/DC para la prueba de capacidad <i>plug-and-play</i> : (a) Frecuencia de los GDs-ac de la micro-red AC. (b) Voltaje a la salida de los GDs-ac en la micro-red AC. (c) Voltaje a la salida de los GDs-dc en la micro-red DC. . . .	59
4.11. Consenso de potencia activa entre todas las unidades de la micro-red híbrida para el caso de retardos en la red de comunicación: (a) $\tau_{ij} = 0,3s$. (b) $\tau_{ij} = 0,5s$. (c) $\tau_{ij} = 0,8s$	61
4.12. Potencia activa transferida por el ILC para el caso de retardos en la red de comunicación: (a) $\tau_{ij} = 0,3s$. (b) $\tau_{ij} = 0,5s$. (c) $\tau_{ij} = 0,8s$	61
4.13. Frecuencia de las unidades de generación de la micro-red AC para el caso de retardos en la red de comunicación: (a) $\tau_{ij} = 0,3s$. (b) $\tau_{ij} = 0,5s$. (c) $\tau_{ij} = 0,8s$	62
4.14. Tensión de las unidades de generación de la micro-red DC para el caso de retardos en la red de comunicación: (a) $\tau_{ij} = 0,3s$. (b) $\tau_{ij} = 0,5s$. (c) $\tau_{ij} = 0,8s$	62
4.15. Consenso de potencia reactiva entre las unidades de la micro-red AC para el caso de retardos en la red de comunicación: (a) $\tau_{ij} = 0,3s$. (b) $\tau_{ij} = 0,5s$. (c) $\tau_{ij} = 0,8s$	63
4.16. Tensión de las unidades de generación de la micro-red AC para el caso de retardos en la red de comunicación: (a) $\tau_{ij} = 0,3s$. (b) $\tau_{ij} = 0,5s$. (c) $\tau_{ij} = 0,8s$	63
5.1. Topología unidad Triphase PM15F120C.	66
5.2. Topología unidad Triphase PM5F60R.	66
5.3. Topología unidad Triphase PM5F42R.	66
5.4. Topología unidad Triphase PM15I60F06.	67
5.5. Topología micro-red híbrida experimental.	67
5.6. Equipos utilizados para el montaje experimental (a) Unidades Triphase. (b) CPUs con tarjetas de tiempo real (RTT).	68
5.7. Elementos adicionales de la micro-red híbrida experimental (a) Rack de la micro-red AC. (b) Rack de la micro-red DC.	69
5.8. Resultados experimentales del DMPC secundario aplicado a una micro-red híbrida AC/DC para el caso de conexión y desconexión de cargas: (a) Potencia activa normalizada entregada por los GDs-ac y GDs-dc. (b) Potencia reactiva normalizada entregada por los GDs-ac. (c) Potencia activa transferida por el ILC.	73
5.9. Resultados experimentales del DMPC secundario aplicado a una micro-red híbrida AC/DC para el caso de conexión y desconexión de cargas: (a) Frecuencia de los GDs-ac. (b) Voltaje de los GDs-ac. (c) Voltaje de los GDs-dc.	74
5.10. Potencia activa normalizada de los GDs-ac y GDs-dc para los siguientes retardos: (a) $\tau_{ij} = 0,3s$. (b) $\tau_{ij} = 0,5s$. (c) $\tau_{ij} = 0,8s$	76
5.11. Frecuencia de los GDs-ac para los siguientes retardos: (a) $\tau_{ij} = 0,3s$. (b) $\tau_{ij} = 0,5s$. (c) $\tau_{ij} = 0,8s$	76
5.12. Potencia reactiva normalizada de los GDs-ac para los siguientes retardos: (a) $\tau_{ij} = 0,3s$. (b) $\tau_{ij} = 0,5s$. (c) $\tau_{ij} = 0,8s$	77

5.13. Voltaje de los GDs-ac para los siguientes retardos: (a) $\tau_{ij} = 0,3s$. (b) $\tau_{ij} = 0,5s$. (c) $\tau_{ij} = 0,8s$	77
5.14. Voltaje de los GDs-dc para los siguientes retardos en la red de comunicación: (a) $\tau_{ij} = 0,3s$. (b) $\tau_{ij} = 0,5s$. (c) $\tau_{ij} = 0,8s$	78
5.15. Potencia activa medida en el ILC para los siguientes retardos en la red de comunicación: $\tau_{ij} = 0,3s$; $\tau_{ij} = 0,5s$ y $\tau_{ij} = 0,8s$	78
7.1. Circuito eléctrico de salida de cada unidad de la micro-red AC.	91

Índice de tablas

4.1. Parámetros eléctricos utilizados en la micro-red DC.	45
4.2. Parámetros de los controladores primarios de la micro-red DC.	45
4.3. Parámetros de sintonía controladores secundarios de la micro-red DC.	45
4.4. Eventos realizados durante la prueba de impacto y desconexión de cargas en la micro-red DC.	46
4.5. Eventos realizados durante la prueba de capacidad Plug and Play en la micro-red DC.	47
4.6. Eventos realizados durante la prueba de retardo en la red de comunicación en la micro-red DC. Los retardos considerados son de 0.3s, 0.5s y 0.8s.	48
4.7. Parámetros eléctricos utilizados en la micro-red híbrida.	51
4.8. Parámetros de los controladores primarios de las micro-redes AC y DC.	52
4.9. Parámetros de sintonía controladores secundarios de micro-redes AC y DC.	53
4.10. Eventos realizados durante la prueba de impacto y desconexión de cargas de la micro-red híbrida.	54
4.11. Eventos realizados durante la prueba de <i>plug-and-play</i> de la micro-red híbrida.	56
4.12. Eventos realizados durante la prueba de retardo en la red de comunicación de la micro-red híbrida.	59
5.1. Parámetros eléctricos utilizados en la micro-red híbrida.	70
5.2. Pendientes droop del control primario de la micro-red híbrida.	71
5.3. Parámetros de sintonía de los controladores secundarios de las micro-redes AC y DC.	71
5.4. Eventos realizados durante la prueba de impactos de carga en la micro-red híbrida.	72
5.5. Eventos realizados durante la prueba de retardo en la red de comunicación en la micro-red híbrida.	74

Capítulo 1

Introducción

1.1. Motivación

En las últimas décadas, el concepto de micro-red ha ido obteniendo cada vez más relevancia, debido a la proliferación de las fuentes de energía renovable y políticas gubernamentales que abogan en la reducción en el uso de combustibles fósiles para la generación de energía eléctrica. Una micro-red puede ser vista como un sistema eléctrico de pequeña escala que consta de unidades de generación distribuida (DERs), sistemas de almacenamiento de energía, cargas críticas/no críticas y sistemas de control de distinta naturaleza (centralizada, descentralizada o distribuida). Además, las micro-redes se han estudiado en función de su naturaleza, es decir, si es una micro-red AC (altern current) o DC (direct current). En ambos casos, se necesitan convertidores de electrónica de potencia; por lo tanto, se espera pérdidas de energía debido a las conversiones de voltaje [1][2].

En el caso de una micro-red AC, ésta puede operar en modo conectado a la red eléctrica o aislado de ella. Éste último modo es usado cuando la red eléctrica no está disponible en áreas remotas/rurales. Además, en este modo, el control está basado en un esquema de red *forming/supporting*, donde al menos una unidad de generación distribuida (GD) opera como una fuente de voltaje, regulando la magnitud del voltaje y frecuencia de la micro-red [3][4].

A pesar que tradicionalmente las micro-redes AC han sido el foco de los estudios desde principios de la década del 2000s, esto debido a su interfaz natural con la red eléctrica principal, muchas de las fuentes de energía renovable y cargas modernas usan una interfaz DC, por lo que integrarlas a un bus DC es más ventajoso. En una micro-red DC no se requiere un control de potencia reactiva ni regulación de frecuencia; reduciendo así la complejidad del sistema. Además, en este tipo de micro-redes, no se requiere sincronización entre GDs y la red eléctrica [5]. Sin embargo, la estabilidad de voltaje se ve afectada solo por la potencia activa, mientras que en los sistemas AC el voltaje puede ser regulado utilizando la potencia reactiva sin afectar la potencia activa, aunque esto último es cierto si las impedancias de línea son de naturaleza inductivas [6].

Sumado a lo anterior, en los últimos años han ido en aumento los estudios referentes a las micro-redes híbridas AC/DC, cuya topología consta de micro-redes AC y DC interconectadas por medio de uno o más *interlinking converter* (ILC), los cuales permiten el flujo de potencia

activa de manera bidireccional [5]. El interés por este tipo de micro-redes radica en que combinan los beneficios de las micro-redes AC y las micro-redes DC, presentando mejoras en la confiabilidad y calidad de potencia en el sistema [7]. Además, permite mejorar la eficiencia, ya que reduce las múltiples conversiones debido a la presencia de redes eléctricas individuales AC y DC [1]. No obstante, en este tipo de micro-redes, la operación, control de frecuencia/voltaje y gestión de energía son más complejas que en una micro-red AC o DC.

Por otro lado, de forma análoga a las micro-redes AC y DC, los objetivos de control en una micro-red híbrida pueden ser agrupados en niveles de control [8], en donde el control jerárquico es aplicado en forma independiente tanto en el lado AC y como en el lado DC. Estos niveles de control consisten en un control primario, un control secundario y un control terciario. El primero permite estabilizar la micro-red y que los GDs compartan carga, para lo cual tradicionalmente se ha utilizado la estrategia de control droop, no obstante, esta estrategia produce desviaciones de frecuencia y voltaje en la micro-red AC y voltaje en la micro-red DC. El control secundario se encarga de restablecer estas variables a sus valores nominales y el control terciario permite un despacho económico de los GDs, luego que se hayan cumplido los objetivos de los dos niveles anteriores.

Con respecto al nivel secundario, en la literatura se ha abordado mediante tres esquemas principales: esquema centralizado, esquema descentralizado y esquema distribuido. Los estudios referentes a este último han ido cada vez más en aumento debido a sus ventajas tales como una mayor confiabilidad, flexibilidad y redundancia [9]. En este nivel de control, usualmente, se han utilizado los controladores del tipo proporcional integral (PI), no obstante, gracias a los avances en las comunicaciones y mejoras en el hardware de los controladores, en las últimas décadas el control predictivo basado en modelos (MPC) está siendo incorporado, debido a que permite mejorar la operación de la micro-red, esto al ser robusto frente a retardos en la red de comunicación y al incluir características del control óptimo, estocástico, multivariable, entre otros. Además, al estar basado en un problema de optimización, permite incluir restricciones operacionales del sistema [10].

A pesar de los avances a nivel secundario tanto en micro-redes AC como en DC, en la literatura, el control secundario aplicado a micro-redes híbridas se ha abordado escasamente, en donde la complejidad radica en transferir potencia activa de forma precisa entre ambas micro-redes, mientras en cada micro-red por separado, las variables de importancia se restauran a sus valores nominales. Es por esto que aprovechando las ventajas del esquema distribuido y de las estrategias de control predictivo, en esta tesis se propone un controlador predictivo distribuido a nivel secundario aplicado a una micro-red híbrida AC/DC, con el fin de restaurar frecuencia y tensión en una micro-red AC y tensión promedio en una micro-red DC a sus valores nominales, mientras las unidades de generación distribuidas (GDs) de las micro-redes AC y DC (en adelante GDs-ac y GDs-dc respectivamente) entregan la misma potencia activa a razón de sus capacidades máximas por medio de un ILC y, adicionalmente, los GDs-ac logran el consenso de potencia reactiva a razón de sus capacidades máximas.

1.2. Objetivos

El objetivo principal de esta tesis es diseñar y validar una estrategia de control predictivo distribuido a nivel secundario para una micro-red AC/DC, tal que permita restaurar

la frecuencia y tensión promedio en la micro-red AC a sus valores nominales, así como la tensión promedio en la micro-red DC a su valor nominal, esto mientras las unidades del lado AC logran el consenso de potencia reactiva a razón de sus capacidades máximas y que las unidades de ambas micro-redes logren compartir potencia activa a razón de sus capacidades máximas, por medio de un *Interlinking Converter (ILC)*, desde el lado AC al lado DC y viceversa.

Además, los objetivos específicos de la tesis son:

- Diseñar un controlador predictivo distribuido a nivel secundario en una micro-red AC y en una micro-red DC. Luego, proceder a validar el controlador propuesto por simulación mediante el uso de la interfaz Matlab/Simulink en conjunto con el software Plecs Blockset.
- Transferir potencia activa desde la micro-red AC a la micro-red DC o viceversa por medio de un Interlinking Converter (ILC), procurando cumplir los objetivos del nivel secundario mediante un esquema predictivo distribuido.
- Implementar la estrategia de control propuesta en una micro-red híbrida experimental, utilizando los equipos Triphase del Laboratorio de Control de Micro-redes, ubicado en el Departamento de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Chile.

1.3. Hipótesis

Las hipótesis asociadas a este trabajo son:

- La estrategia DMPC diseñada y aplicada a una micro-red DC podrá restaurar la tensión promedio a su valor nominal y lograr el consenso de potencia entre sus unidades de manera proporcional a sus capacidades de potencia nominales, permitiendo impactos de carga, conexiones y desconexiones de las unidades y retardos de comunicaciones.
- Se considera una estrategia DMPC aplicada a una micro-red híbrida AC/DC que permitirá restaurar la frecuencia y tensión promedio en el lado AC y la tensión promedio en el lado DC, así como lograr el consenso de potencia reactiva entre las unidades del lado AC y el consenso de potencia activa entre todas las unidades de la micro-red híbrida AC/DC. Para esto, se diseña el MPC para el interlinking converter (ILC) el cual permite la transferencia de potencia activa de forma bidireccional entre ambas micro-redes.
- Las capacidades de la estrategia distribuida propuesta DMPC aplicada a la micro-red AC/DC permiten enfrentar impactos de carga, conexiones y desconexiones de las unidades y retardos de comunicaciones.

1.4. Alcances

El tema desarrollado durante esta tesis tiene una componente teórica, en la cual se debe diseñar un controlador predictivo distribuido a nivel secundario para una micro-red AC y

una micro-red DC, el cual sea capaz de restaurar frecuencia y magnitud de tensión promedio a sus valores nominales en una micro-red AC y tensión promedio en una micro-red DC, esto mientras se transfiere potencia activa entre ambas micro-redes, por medio de un ILC, con el fin que todas las unidades de generación involucradas entreguen la misma potencia activa a razón de su capacidad máxima y, adicionalmente, los GDs-ac logren el consenso de potencia reactiva a razón de sus capacidades máximas.

Posteriormente, la micro-red es estudiada mediante simulación utilizando el software Matlab/Simulink, con el fin de implementar la estrategia de control propuesta a nivel secundario, así como los controladores acordes al nivel primario que permitan el correcto funcionamiento de la micro-red. Junto a lo anterior, se utiliza el software de simulación Plecs/-Blockset, el cual tiene la particularidad de ser compatible con Matlab/Simulink, para simular las componentes eléctricas de la micro-red.

El siguiente paso es validar experimentalmente la estrategia de control propuesta en el Laboratorio de Control de Micro-redes de la Universidad de Chile, en donde los parámetros de los elementos que componen la micro-red corresponden a parámetros de placa o medidos directamente en los equipos presentes en dicho laboratorio.

El sistema a estudiar está formado por una micro-red AC, una micro-red DC y un interlinking converter (ILC). Las micro-redes AC y DC están compuestas por tres unidades de generación distribuida (GDs), cada una las cuales son representadas por un convertor en modo fuente de tensión (VSI), cuyo dc-link se energiza mediante un rectificador no controlado en la precarga y, en operación normal, por un rectificador controlado en base a IGBTs, alimentado por la red eléctrica principal. Cada convertor se conecta a un filtro LCL para eliminar las componentes de alta frecuencia provenientes de la acción de los IGBTs. En el caso de los GDs-ac, a la salida de sus respectivos filtros LCL, se conecta una inductancia de acople que tiene como objetivo, que la estrategia de control propuesta, no dependa de la topología aguas abajo de dicha inductancia. Estos GDs-ac se conectan mediante inductancias que emulan líneas de transmisión y en cada uno de ellos se conectan cargas resistivas después de las inductancias de acople. De forma análoga, la salida del filtro de cada GD-dc se conecta a una resistencia de acople, la cual tiene el mismo objetivo que las inductancias de acople. Estos GDs-dc se conectan mediante resistencias que emulan líneas de transmisión y en cada uno de ellos se conectan cargas resistivas después de las resistencias de acople.

Por último, se tiene el ILC, el cual está compuesto por un convertor de dos niveles, un dc-link y un convertidor Boost. El primero está conectado, por un lado, a un filtro LC conectado eléctricamente a la micro-red AC y, por el otro, al dc-link. Éste se conecta al convertidor Boost el cual, a su vez, se conecta por el otro lado a un filtro LC y éste a la micro-red DC.

1.5. Metodología propuesta

El desarrollo de este trabajo se realiza en tres etapas principales. En primer lugar, se realiza una revisión del estado del arte del control de micro-redes AC, DC e híbridas, control secundario distribuido y control predictivo secundario distribuido, estableciendo una base teórica sólida de las materias a estudiar en esta tesis.

Posteriormente se realiza el modelamiento de una micro-red híbrida AC/DC en el software Matlab/Simulink junto a Plecs Blockset el cual cuenta con una micro-red AC, una micro-red DC y un interlinking converter (ILC) para la transferencia de potencia activa entre ambas micro-redes. La micro-red AC trifásica está compuesta por tres unidades de generación AC las cuales cuentan con filtros a la salida y, luego de estos, con inductancias de acople. Además, la micro-red cuenta con inductancias de línea, que modelan líneas de transmisión con componente inductiva entre las unidades, y cargas trifásicas resistivas a la salida de cada unidad después de la inductancia de acople. Por otro lado, la micro-red DC está compuesta por tres unidades de generación DC las cuales cuentan con filtros a la salida y, luego de estos, con resistencias de acople. Además, la micro-red cuenta con resistencias de línea que modelan líneas de transmisión entre las unidades y cargas resistivas a la salida de las unidades después de la resistencia de acople. Por último, el ILC está compuesto por un convertor de dos niveles, un dc-link y un boost converter, además de un filtro AC y un filtro DC en los lados AC y DC respectivamente.

Por otro lado, en la simulación se implementa el control de los convertidores, control primario mediante curvas droop y la estrategia de control propuesta a nivel secundario.

Finalmente, y como tercera etapa, se realiza la implementación de un prototipo experimental, a partir del modelo de la micro-red híbrida simulada anteriormente, en el Laboratorio de Control de Micro-redes de la Universidad de Chile. Se utilizan los parámetros de control sintonizados previamente y se estudia su respuesta frente a diferentes condiciones de operación.

1.6. Estructura de la tesis

Esta tesis está conformada por 6 capítulos principales, los cuales se describen brevemente a continuación:

En el capítulo 1 se presenta una introducción, mostrando una motivación del estudio de esta tesis, los objetivos principales, hipótesis, alcances del trabajo de tesis y la metodología utilizada para completar dichos objetivos y corroborar la hipótesis propuesta.

En el capítulo 2 se presenta el estado del arte del trabajo de tesis realizado. Para esto, se entrega las fundamentos de las micro-redes AC, DC e híbridas, mostrando su arquitectura básica y describiendo sus principales características de operación, como también se describe la arquitectura de control típica de cada tipo de micro-red. Además, se presentan las principales estrategias de control de micro-redes, considerando los niveles de control jerárquico descritos en la literatura (lazos de control interno, de control primario, control secundario y control terciario). Específicamente, se aborda el nivel secundario con foco en la topología distribuida para cada tipo de micro-red, mostrando las principales estrategias de control reportadas en la literatura. Luego, se presentan los esquemas de control predictivo aplicado a nivel secundario con foco en una topología distribuida, además, se muestran las principales estrategias de control de este tipo reportadas en la literatura para cada tipo de micro-red.

En el capítulo 3 se presenta la formulación propuesta de un controlador predictivo secundario distribuido para micro-redes de naturaleza AC y naturaleza DC, en donde la primera

está basada en el trabajo hecho en [30], mientras que la segunda es una propuesta de esta tesis. Luego, se presentan dos estrategias de control para la obtención de la consigna de potencia dada al ILC y así cumplir con el objetivo que todas las unidades de la micro-red híbrida entreguen la misma potencia activa a razón de sus capacidades máximas. La primera estrategia, basada en [30], consta de un controlador integral, mientras que la segunda consiste en un controlador predictivo centralizado, la cual es una propuesta de esta tesis.

En el capítulo 4 se presentan los resultados obtenidos por simulación, los cuales muestran la respuesta de los controladores diseñados ante tres escenarios de operación: impactos de carga, capacidad Plug-and-Play de la micro-red y retardos en la red de comunicación. Posteriormente, en el capítulo 5 se presentan los resultados obtenidos de manera experimental para dos escenarios: impactos de carga y retardos en la red de comunicación. Por último, en capítulo 6 se presentan las principales conclusiones obtenidas durante el desarrollo de esta tesis de magíster. Además, se presentan los principales trabajos futuros a realizar.

Capítulo 2

Estado del Arte

En este capítulo se presenta una revisión bibliográfica acerca de las topologías y estrategias de control aplicadas a micro-redes, con especial atención en los fundamentos de una micro-red híbrida AC/DC considerando un ILC, así como en las estrategias de control secundario distribuido aplicado a micro-redes híbridas AC/DC.

Este capítulo está organizado de la siguiente forma: la sección 2.1 describe el control de micro-redes AC, DC e híbridas, así como sus principales características. La sección 2.2 aborda la estrategia de control secundario distribuido aplicado a micro-redes AC, DC e híbridas. Luego, en la sección 2.3 se muestra una revisión bibliográfica del control predictivo a nivel secundario aplicado a micro-redes AC y DC. Finalmente, en la sección 2.4 se presenta una discusión acerca del estado del arte abordado en las secciones anteriores, justificando el por qué se decide utilizar la estrategia de control predictivo distribuido a nivel secundario en una micro-red híbrida AC/DC.

2.1. Control de micro-redes

La mejora continua de la electrónica de potencia y el fortalecimiento de los micro-procesadores han permitido implementar estrategias de control más complejas, lo que a su vez se ha traducido en una mayor investigación en el área de las micro-redes. En la literatura, una micro-red puede ser vista como un sistema eléctrico de pequeña escala que consta de unidades de generación distribuida (DERs), sistemas de almacenamiento de energía (SES), cargas críticas/no críticas y sistemas de control de distinta naturaleza (centralizada, descentralizada o distribuida). Además, una micro-red puede operar en modo conectado a la red eléctrica o aislado de ella [1].

Originalmente, el estudio de las micro-redes ha sido desarrollado de forma separada para micro-redes AC y DC, identificando las principales diferencias entre ellas. No obstante, en los últimos años ha aumentado considerablemente el estudio de micro-redes híbridas AC/DC las cuales, a pesar de su complejidad, combinan beneficios de las micro-redes AC y DC [5]. En las siguientes secciones se presentan las principales estrategias y topologías de control aplicadas a micro-redes AC y DC, de forma separada, así como a micro-redes híbridas AC/DC.

2.1.1. Micro-redes AC

En la figura 2.1 se presenta una topología genérica de una micro-red AC, la cual consta principalmente de unidades de generación distribuida de naturaleza AC y cargas AC. No obstante, de igual manera, se pueden conectar unidades de generación de naturaleza DC con sus respectivos convertidores DC-AC, cargas DC por medio convertidores AC-DC y sistemas de almacenamiento por medio de convertidores bidireccionales AC/DC. Además, cuenta con un interruptor de transferencia estática (STS) para operar en modo conectado o aislado de la red eléctrica, como también con su respectivo sistema de protección [11].

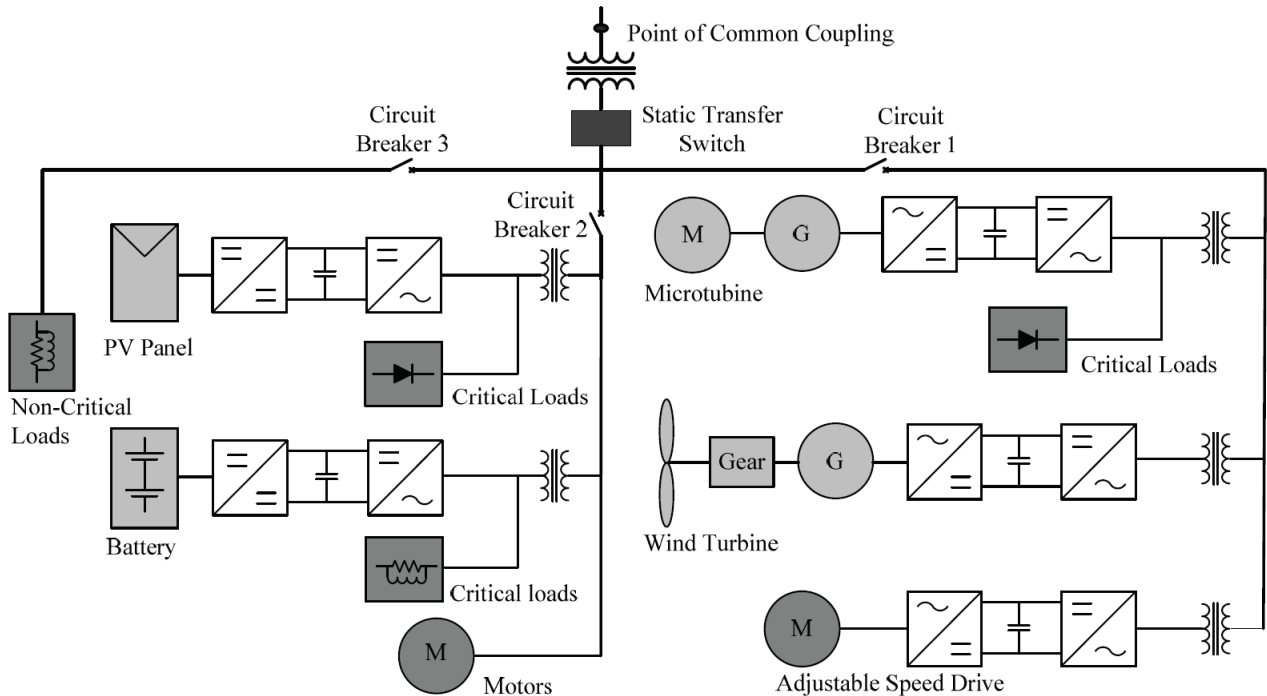


Figura 2.1: Topología general de una micro-red AC [11].

En el caso del modo conectado a la red eléctrica, una micro-red típica requiere de una estrategia de control simple para el convertidor 'grid feeding', con el fin de controlar la potencia activa y reactiva inyectada a la red principal. Otra característica importante es que la magnitud y frecuencia del voltaje de salida de cada convertidor es gobernado por la red principal. Sin embargo, en la operación en modo aislado, dichas variables de la micro-red son impuestas por un convertidor 'grid forming/supporting' usando un enfoque de control centralizado, descentralizado o distribuido. Esto radica en que, en el caso aislado, el control del convertidor tenga un mayor grado de complejidad [12].

La estrategia de control más utilizada en una micro-red es el control jerárquico, el cual es separado en tres niveles: primario, secundario y terciario [8]. Esta estructura de control tiene diferentes anchos de banda, asegurando que las señales de referencia y comandadas de un nivel a otro tengan un bajo impacto en la estabilidad y robustez de la micro-red [13].

Antes de los niveles mencionados anteriormente, se encuentra el nivel cero o interno [14],

el cual permite regular la corriente y tensión a la salida de la unidad, mientras mantiene el sistema estable. Para esto, este nivel consta de lazos de control internos de corriente y tensión.

Luego, se encuentra el control primario, el cual tiene como objetivo el reparto de potencia activa y reactiva entre las unidades de generación distribuida, así como ajustar la magnitud y frecuencia de la referencia de voltaje provista a los lazos de tensión y corriente internos de cada convertidor. Para lograr estos objetivos, una de las estrategias más utilizadas es el control droop, el cual permite incrementar el estatismo de la micro-red compensando la baja inercia o estatismo de los generadores basados en energías renovables, así como asegurar que la respuesta dinámica sea similar a la de los sistemas de potencia a gran escala [15].

La estrategia de control droop surge a partir de las ecuaciones 2.1 y 2.2 que modelan la potencia activa (P_i) y reactiva (Q_i) transferida entre una unidad de generación y una barra infinita (figura 2.2), asumiendo una impedancia de línea puramente inductiva ($X = \text{Im}(Z)$) y un ángulo de fase ϕ pequeño. Además, E es el módulo de la tensión a la salida de la unidad de generación y V es el módulo de la tensión en la barra infinita [16][17].

$$P_i \approx \frac{EV}{X} \phi \quad (2.1)$$

$$Q_i \approx \frac{V}{X}(E - V) \quad (2.2)$$

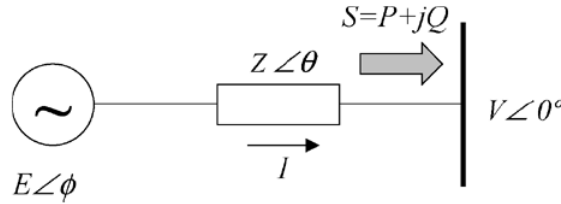


Figura 2.2: Modelo referencia para las ecuaciones de transferencia de potencia [18].

En el caso de que la unidad de generación se conecte a una micro-red y, basándose en las ecuaciones 2.1 y 2.2, se definen las ecuaciones lineales 2.3 y 2.4 correspondientes al control droop directo. La primera de ellas modela una relación lineal entre la frecuencia de operación del sistema (ω) y la potencia activa (P) entregada por la unidad a la micro-red, donde $m_{p\omega}$ representa la tasa de cambio entre la frecuencia de operación y la potencia activa, y ω^* es la frecuencia nominal o sin carga de la unidad. Por otro lado, la ecuación 2.4 modela una relación lineal entre el voltaje de salida de la unidad (E) y la potencia reactiva (Q) entregada por ésta a la micro-red, donde m_{qE} representa la tasa de cambio entre el voltaje de salida y la potencia reactiva, y E^* es el voltaje nominal o sin carga de la unidad [16].

$$\omega(t) = \omega^* + m_{p\omega}P(t) \quad (2.3)$$

$$E(t) = E^* + m_{qE}Q(t) \quad (2.4)$$

Una consideración importante es que las potencias activa (P) y reactiva (Q), calculadas en cada unidad, son filtradas aplicándoles un filtro pasa bajos de primer orden que tiene como propósito estabilizar los lazos de control del nivel primario, así como rechazar perturbaciones y oscilaciones presentes en las potencias medidas. Estos filtros se caracterizan por tener una constante de tiempo T_f asociada [18]. Por otro lado, cabe destacar que al tener varios lazos operando al mismo tiempo, se acostumbra desacoplarlos por velocidad de operación.

El segundo nivel del control jerárquico es el control secundario, el cual permite compensar las desviaciones de voltaje y frecuencia causadas por el control primario. Este nivel de control es diseñado para tener una respuesta dinámica más lenta que el primario, con el objetivo de desacoplar las dinámicas de los lazos de control de ambos niveles y así facilitar sus diseños individuales [19]. Existen diferentes esquemas de control secundario reportados en la literatura, los cuales se agrupan principalmente en tres topologías (figura 2.3): esquemas centralizados, esquemas descentralizados y esquemas distribuidos.

En los esquemas centralizados [9], las unidades de generación son controladas localmente por un controlador primario y uno secundario, en donde se efectúan mediciones locales que son enviadas a un controlador supervisor, por medio de un sistema de comunicación de bajo ancho de banda. Las variables a restaurar se comparan con las referencias para ser compensadas por el controlador secundario, el cual enviará las señales de salida a través del canal de comunicaciones al controlador primario de cada unidad de generación. Sin embargo, esta arquitectura no es altamente confiable, ya que una falla en el controlador supervisor es suficiente para no enviar las acciones de control secundario, lo cual obligaría al controlador primario de cada unidad a ajustar nuevamente su frecuencia y tensión de operación.

En los esquemas descentralizados, el controlador local de cada unidad utiliza las mediciones locales para cumplir con los objetivos de restauración de las variables de frecuencia y amplitud de tensión, esto sin depender de un controlador central. Por lo tanto, este esquema permite tomar una decisión distribuida con posibilidad de plug-and-play. No obstante, es difícil lograr una solución óptima [10].

Por último, en los esquemas distribuidos, la acción de control es calculada localmente por cada unidad, utilizando la información que dispone acerca de la operación de la micro-red, para lo cual se obtiene una solución cercana a la óptima [20]. Para esto, los controladores trabajan de forma autónoma en un esquema cooperativo para alcanzar un objetivo global, lo cual requiere de una estrecha comunicación entre ellos, por lo que el desafío recae en que la red de comunicaciones sea capaz de asegurar el compartido de información entre los agentes. Este tipo de esquema es robusto frente a cambios eléctricos/de comunicación y problemas de comunicación, como la latencia o pérdida de datos. Además, este esquema elimina los inconvenientes inherentes al control centralizado, como un punto único de falla y una excesiva carga computacional [21]. Mayor detalle acerca de este esquema se aborda en la Sección 2.2.1.

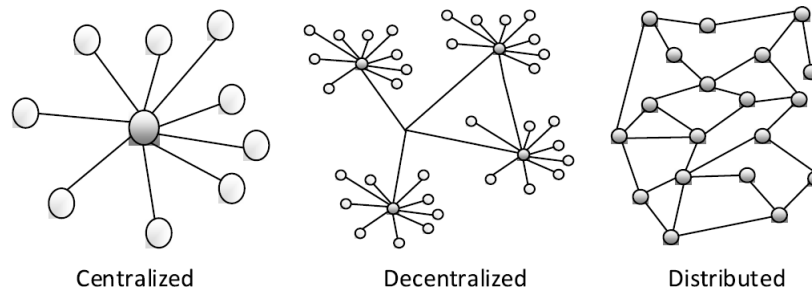


Figura 2.3: Topologías de redes de comunicaciones para el control de micro-redes [22].

2.1.2. Micro-redes DC

En la figura 2.4 se presenta una topología de una micro-red DC, la cual consta principalmente de unidades de generación distribuida de naturaleza DC y cargas DC. No obstante, de igual manera, se pueden conectar unidades de generación de naturaleza AC con sus respectivos convertidores AC-DC, cargas AC por medio convertidores AC-DC y sistemas de almacenamiento por medio de convertidores DC/DC. Además, cuenta con un convertidor bidireccional AC/DC, el cual permite la transferencia de potencia activa entre la micro-red DC y la red eléctrica principal [23].

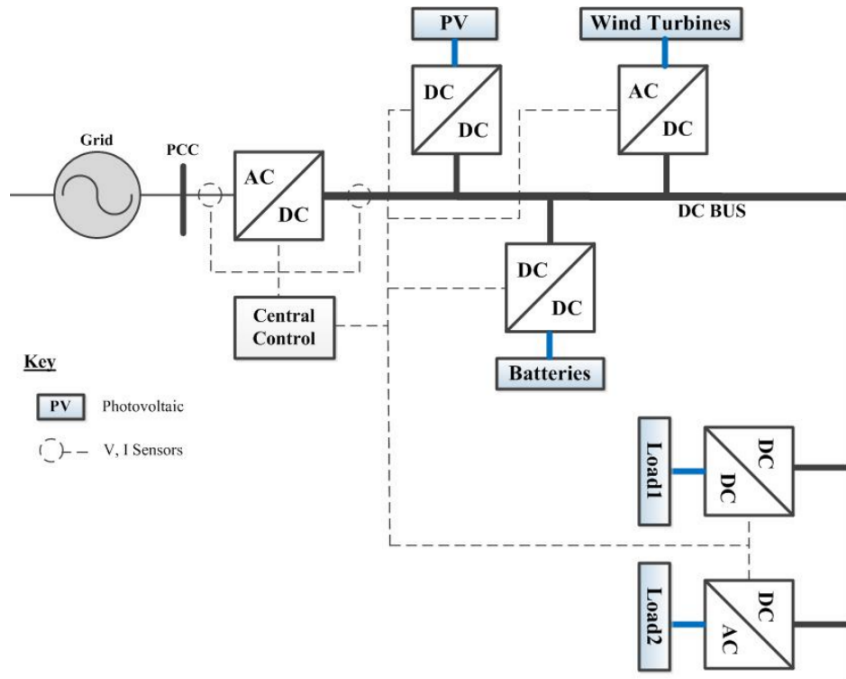


Figura 2.4: Topología de una micro-red DC [23].

La micro-red DC presenta varias ventajas con respecto a la AC [5] de las cuales se destacan las siguientes:

- No requiere control de potencia reactiva y regulación de frecuencia.
- No existen problemas con las corrientes *inrush* debido a la ausencia de transformador.
- Incremento de la estabilidad, confiabilidad, controlabilidad y calidad de potencia del sistema durante *'blackout'* o perturbaciones.

A pesar de lo anterior, también es necesario considerar ciertas desventajas asociadas a este tipo de micro-redes [6] tales como:

- Las protecciones de un sistema DC son más compleja que en un sistema AC, debido a la ausencia de un cruce por cero de la corriente.
- La transición de un sistema AC a uno DC en redes de distribución de baja tensión requiere varias etapas, tales como nuevos estándares de productos y nuevos niveles de tensión.
- La estabilidad de tensión es afectada solo por la potencia activa, mientras que en sistemas AC la tensión puede ser regulada usando la potencia reactiva sin afectar la potencia activa.
- Problemas de puesta a tierra y corrosión en sistemas DC.

El control jerárquico en una micro-red DC es similar al aplicado en micro-redes AC, ya que de igual forma consta de un control interno y tres niveles de control adicionales (primario, secundario y terciario). El nivel interno consta de lazos anidados de tensión y corriente que permiten regular dichas variables a la salida de la unidad mientras mantiene el sistema estable. El control primario permite regular el compartó de corriente/potencia de las unidades de generación de la micro-red, modificando su tensión a la salida (V_{dc}). Para esto, tradicionalmente se utiliza la estrategia de control droop la cual está definida mediante la ecuación 2.5.

$$V_{dc} = V_{dc}^* + M_{dc}P_{dc} \quad (2.5)$$

Donde V_{dc}^* es el voltaje nominal, P_{dc} es la potencia de salida y M_{dc} es el coeficiente droop negativo. El principal problema de esta estrategia es lograr que las unidades compartan corriente/potencia de forma precisa, debido a las resistencias en las líneas. Además, este controlador origina una desviación de voltaje en torno a su valor nominal, el cual puede ser corregido implementando un nivel de control secundario.

Al igual que en el caso de las micro-redes AC, existen tres esquemas de control a nivel secundario en las micro-redes DC: esquema centralizado, esquema descentralizado y esquema distribuido. El primero consta de un controlador central que se encarga de modificar el set-point de voltaje de todas las unidades de generación. Esto implica que todas las unidades deben estar comunicadas a dicho controlador central. Por otro lado, en el esquema descentralizado cada unidad es responsable de mantener su voltaje cerca del valor nominal sin la necesidad de un controlador central. Por último, en los esquemas distribuidos, la acción de

control es calculada localmente por cada unidad utilizando la información que dispone sobre la operación de la micro-red. Este último será discutido con más detalle en la Sección 2.2.2.

2.1.3. Micro-redes híbridas AC/DC

En las micro-redes híbridas se interconectan micro-redes AC y DC por medio de uno o más interlinking converters bidireccionales (ILC). Este tipo de micro-redes facilitan la interconexión de varias unidades de generación renovable de naturaleza AC y DC, como también reduce las múltiples conversiones debido a la presencia de redes AC y DC individuales [5].

En la figura 2.5 se muestra la estructura básica de una micro-red híbrida AC/DC compuesta por una micro-red AC y una micro-red DC, a cuyos buses respectivos se conectan unidades de generación AC y DC, sistemas de almacenamiento y cargas AC y DC con sus respectivos convertidores dependiendo de la naturaleza del bus. Además, ambos buses están interconectados por medio de uno o más interlinking converters (ILC), los cuales permiten la transferencia de potencia de forma bidireccional entre ambas micro-redes y su operación paralela incrementa la capacidad y confiabilidad [7].

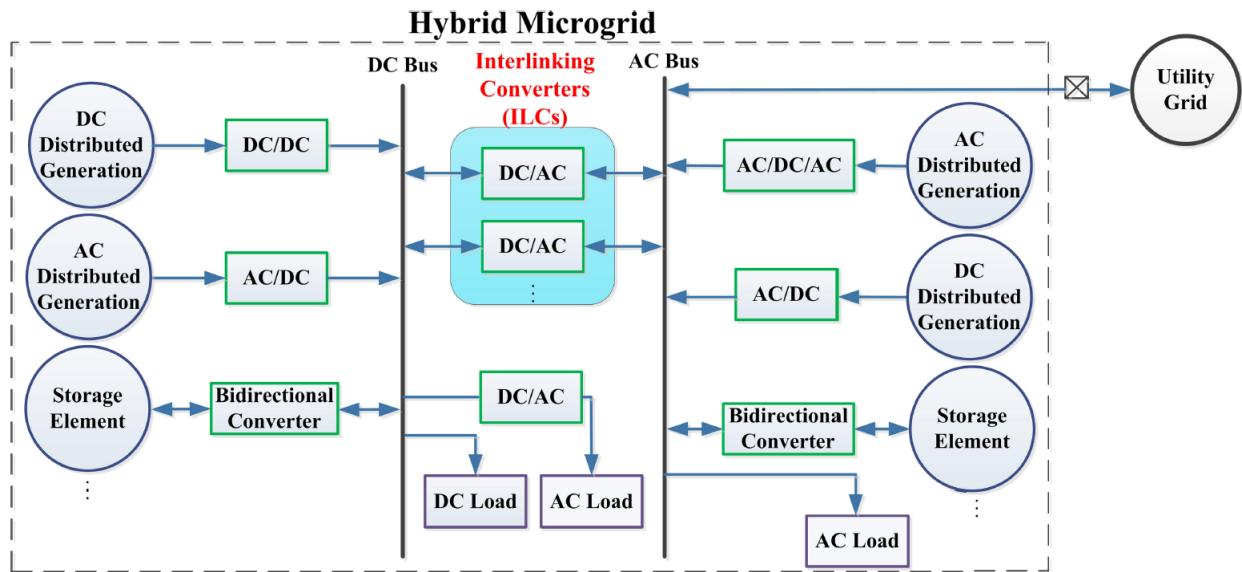


Figura 2.5: Topología general de una micro-red híbrida [5].

En esta topología el interlinking converter tiene un rol crucial, ya que es el que permite, por un lado, conectar eléctricamente el bus AC con el bus DC y, por el otro, controlar el intercambio de potencia activa entre ambas micro-redes. El ILC puede actuar como rectificador o inversor dependiendo de la dirección del flujo de potencia transferida en cada instante. Dependiendo de los objetivos de control aplicados en la micro-red, en la literatura se ha reportado distintas topologías y configuraciones de ILC las cuales se dividen en: una etapa, dos etapas y avanzados [1]. La topología utilizada en esta tesis corresponde a un ILC de dos etapas (figura 2.6) en don el convertidor boost es utilizado para controlar la tensión en el dc-link E_{dc} . Esta tensión es utilizada por un inversor de tres piernas para sintetizar una

tensión V_{ac} en la micro-red AC, esto por medio de algún tipo de modulación tales como PWM o SVM.

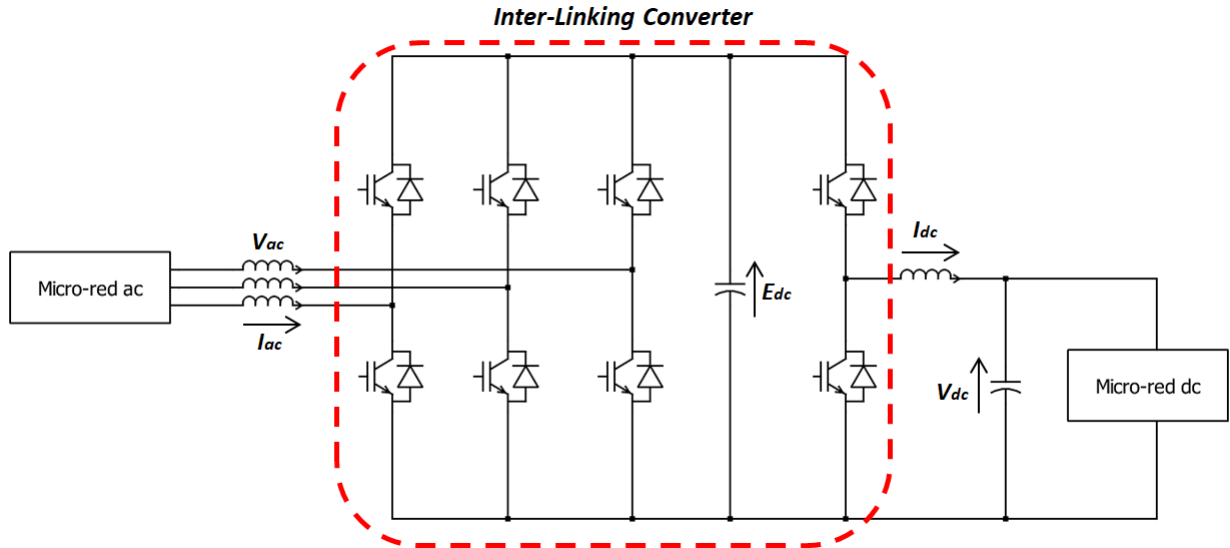


Figura 2.6: Topología de ILC utilizado en esta tesis.

Con respecto al control de micro-redes híbridas, se puede aplicar la estructura de control jerárquico mostrada en las Secciones 2.1.1 y 2.1.2, sin embargo, éstas tienen como objetivo la restauración de las variables de relevancia solo en sus respectivas micro-redes, por lo que no abordan el objetivo de transferencia de potencia activa entre ambas. Es por esto que en la literatura los esfuerzos principales se han focalizado en esto último considerando principalmente dos enfoques [1]:

- El primero establece como objetivo de control una distribución de potencia activa en tiempo real entre las micro-redes AC y DC y, usualmente, se efectúa a nivel primario, por medio del control droop.
- El segundo enfoque permite la distribución de potencia activa siempre y cuando una micro-red (AC o DC) esté sobrecargada; esto es usualmente hecho a través de estrategias basadas en control óptimo, penalizando el flujo de potencia a través de los ILCs.

Los autores en [24] presentan una estrategia de control descentralizado para coordinar el consenso de potencia activa entre las micro-redes AC y DC, considerando una potencia constante y cargas pasivas. Este esquema de control considera una micro-red DC conectada a un bus común DC, en donde los convertidores bidireccionales AC/DC y DC/DC actúan como ILCs. El voltaje DC y la frecuencia en la micro-red AC son regulados mediante el uso de controladores proporcional integral (PI).

Los autores en [25] proponen un sistema de gestión de energía, basado en programación lineal entera mixta, para optimizar el flujo de energía a través del ILC. En este caso, los modelos fenomenológicos de una turbina eólica, un generador diésel, un generador fotovoltaico y un banco de baterías se presentan como restricciones al problema de optimización. Este

controlador prioriza el uso de energías renovables por sobre el generador diésel y el banco de baterías, mejorando el rendimiento de la micro-red y reduciendo los costos operativos. Un enfoque similar se presenta en [26], donde un problema de optimización multi-objetivo, resuelto mediante la optimización de enjambre de partículas, es establecido para optimizar el costo de operación en la micro-red. En este caso, la potencia transferida entre ambas micro-redes se reduce a través de la penalización en la función de costo.

En [27] se propone un esquema de control droop normalizado para el control de una micro-red híbrida, en donde se tiene como objetivo la transferencia de potencia activa entre el lado AC y el DC, con el fin que las unidades de la micro-red compartan potencia de forma proporcional a su capacidad máxima. Para esto, se normaliza la frecuencia del bus AC y tensión del bus DC, las que luego son igualadas y el error de éstas es minimizado usando un controlador PI, del cual se obtiene como resultado la potencia de referencia dada al ILC. No obstante, su desventaja radica en que, al actuar el control secundario, la frecuencia y tensión DC alcanzan su valor nominal en estado estacionario, por lo que el error normalizado entre estas variables es nulo, lo cual interfiere en el cálculo de la potencia de referencia dada al ILC.

A partir de lo anterior, se concluye que la regulación de frecuencia y voltaje podría entrar en conflicto con el objetivo de control que permita la transferencia de potencia activa por medio del ILC. Sin embargo, los esquemas de control secundario como DAPI [32][35], o el control predictivo basado en modelo (MPC) [44] [28], utilizados en micro-redes aisladas, combinan objetivos de regulación y compartido de potencia para cada micro-red AC o DC. Por lo tanto, el esquema de control del ILC debe estar alineado con los objetivos de control secundario de ambas micro-redes, y la mejor manera de lograrlo es integrar estrategias distribuidas de compartido de potencia, que no se vean afectadas cuando los cambios de topología o los problemas de comunicación perturban la micro-redes. En las secciones 2.2.3 y 2.3.3 se abordará con más detalle los trabajos reportados en la literatura al aplicar control distribuido y control predictivo, respectivamente, a nivel secundario en micro-redes híbridas AC/DC.

2.2. Control Secundario Distribuido (DSC)

Como se mencionó en la sección 2.1.1, la estrategia de control secundario puede ser de naturaleza centralizada, descentralizada o distribuida, así como se abordaron las principales ventajas y desventajas de cada una de ellas. Debido a a las ventajas del esquema distribuido, tales como su robustez frente a cambios eléctricos/de comunicación, no depender de un único punto de conexión, menor carga computacional y solución cercana a la óptima, en esta tesis se propone una estrategia de control secundario distribuida aplicada a micro-redes híbridas AC/DC. En las siguientes subsecciones, se aborda el estado del arte de las estrategias de control secundario distribuido aplicado a micro-redes AC, DC e híbridas AC/DC.

2.2.1. DSC aplicado a micro-redes AC

En la literatura se han reportado estrategias de control distribuido a nivel secundario para micro-redes AC. En [29] se propone un control secundario de voltaje de micro-redes basado en el control cooperativo de sistemas multiagentes, para lo cual se utiliza *'input-output feedback linearization'* con el fin de transformar la dinámica no-lineal de los GDs a

dinámica lineal. Esta propuesta inspira otros desarrollos en el contexto del control secundario como el presentado en [32].

En [30] se presenta una estrategia de control secundario distribuido para la restauración de voltaje y frecuencia a sus valores nominales y compartido de potencia activa entre unidades en micro-redes AC. Para la restauración de voltaje se utiliza un control en tiempo finito distribuido, mientras que para la restauración de frecuencia se propone un control distribuido basado en consenso. El uso de la estrategia de control en tiempo finito abre otra línea de futuras investigaciones. No obstante, no considera un análisis relacionado a la capacidad plug-and-play de la micro-red, la tolerancia a fallas en la comunicación y respuesta frente a retardos en las comunicaciones.

En [9] y [31] se propone una estrategia de control secundario distribuido capaz de restaurar frecuencia y amplitud de tensión en la micro-red, junto con el compartido de potencia reactiva entre las unidades. En esta estrategia, cada unidad de generación tiene un controlador secundario local capaz de calcular la acción de control apropiada enviada al control primario, usando las mediciones de las otras unidades en cada tiempo de muestreo. No obstante, esta estrategia está sujeta a que las comunicaciones entre todas las unidades tengan el mismo retardo, así como a que los enlaces se mantengan habilitados.

En [32] se presenta la estrategia de control DAPI (*Distributed Averaging Proportional Integral*) la cual permite restaurar frecuencia y amplitud de tensión, así como el compartido de potencia activa y reactiva entre las unidades. Para esto, consta de controladores que usan la información local y de las unidades vecinas para calcular localmente las acciones de control secundario que luego se envían al control primario. Por lo tanto, cada unidad necesita comunicarse con unidades vecinas lo cual se modela a partir de una matriz de adyacencia de la red de comunicaciones, que contiene la información de los enlaces de comunicación entre las unidades de la micro-red. La ventaja de esta estrategia es que no hay necesidad de conocer la topología de la micro-red, las impedancias, o las cargas. Además, por el hecho de tener una arquitectura distribuida permite mayor flexibilidad y redundancia que un controlador centralizado. Sin embargo, la potencia activa es compartida proporcionalmente entre todas las unidades.

Las ecuaciones 2.6 y 2.7 muestran el controlador DAPI de frecuencia, donde Ω_i y Ω_j corresponden a las variables de control secundario de las unidades i y j respectivamente; a_{ij} es el término de la matriz de adyacencia que representa la comunicación entre las unidades i y j , k_i es la ganancia integral del controlador secundario, ω_i es la frecuencia medida en la unidad y ω^* es la frecuencia nominal del sistema. La primera de estas ecuaciones corresponde al controlador droop al cual se le añade la entrada de control secundario Ω_i , mientras que la segunda ecuación está compuesta por un término que permite la regulación de frecuencia, el cual es representado por el error de frecuencia local $(\omega_i - \omega^*)$ con una ganancia $1/k_i$ asociada, y otro término conocido como ecuación de consenso que permite el compartido de la acción de control secundario entre las unidades comunicadas. A partir de la ecuación 2.7 se puede deducir que en estado estacionario ($\frac{d\Omega_i}{dt} = 0$) los términos $(\omega_i - \omega^*)$ y $(\Omega_i - \Omega_j)$ son iguales a cero, lo cual implica que la frecuencia de operación de la unidad alcanza el valor nominal y que las acciones de control secundario de las unidades comunicadas son las mismas, respectivamente.

$$\omega_i = \omega^* - m_i P_i + \Omega_i \quad (2.6)$$

$$k_i \frac{d\Omega_i}{dt} = -(\omega_i - \omega^*) - \sum_{j=1}^n a_{ij} (\Omega_i - \Omega_j) \quad (2.7)$$

Por otro lado, las ecuaciones 2.8 y 2.9 muestran el controlador DAPI de voltaje, donde e_i es la variable de control secundario de la unidad i , E_i es el voltaje a la salida de la unidad i , E^* es el voltaje nominal del sistema, Q_i y Q_j son las potencias reactiva entregadas por las unidades i y j respectivamente, mientras que Q_i^* y Q_j^* son las potencias reactiva máximas de las unidades i y j respectivamente; κ_i es la ganancia integral del controlador secundario; β_i y b_{ij} ponderan las tareas de regulación de voltaje y de aporte de reactivos en el controlador i respectivamente. Esta última ganancia también está asociada a la matriz de adyacencia, por lo que si tiene valor cero entonces la unidad i está incomunicada con la unidad j . La ecuación 2.8 corresponde a la ecuación del droop de voltaje a la cual se le añade la acción de control secundario e_i , mientras que la ecuación 2.9 esta compuesta por un término que corresponde a la regulación de voltaje y otro que corresponde al consenso de potencia reactiva. Luego, las ganancias β_i y b_{ij} definen un trade off entre regulación de voltaje y comparto de potencia reactiva, debido a las inductancias presentes en el sistema. Finalmente, en esto estacionario ($\frac{de_i}{dt} = 0$) se cumplen ambos objetivos de control.

$$E_i = E^* - n_i Q_i + e_i \quad (2.8)$$

$$\frac{de_i}{dt} = -\beta_i (E_i - E^*) - \sum_{j=1}^n b_{ij} \left(\frac{Q_i}{Q_i^*} - \frac{Q_j}{Q_j^*} \right) \quad (2.9)$$

Una variación del controlador DAPI se presenta en [33] donde las acciones de control del tipo integral son compartidas entre los agentes. En esta estrategia, el último controlador es el que se encarga de mejorar el transitorio del consenso de potencia activa entre las unidades de generación distribuida.

2.2.2. DSC aplicado a micro-redes DC

El control secundario distribuido aplicado a micro-redes DC ha sido abordado escasamente en la literatura. Su objetivo consiste en restaurar el voltaje promedio de las unidades de generación distribuidas sin deteriorar el comparto de potencia/corriente entre ellas. Sin embargo, ambos objetivos no se pueden lograr de forma precisa debido a la presencia de resistencias en las líneas de transmisión, lo cual implica que el voltaje no pueda ser el mismo en todos los nodos. Este *trade off* existente es similar al que se tiene en micro-redes AC con respecto a la regulación de tensión y consenso de potencia reactiva.

En [34] se utilizan controladores de corriente y voltaje DC promedio en cada convertidor para mejorar el compartido de corriente entre las unidades y restaurar el voltaje del bus DC a su valor nominal, respectivamente. Para esto, las unidades vecinas están comunicadas por medio de una red de comunicación de bajo ancho de banda, con el fin de compartir mediciones de corrientes y tensiones, las que luego van al controlador local de cada unidad, el cual procede a efectuar los cálculos de corriente y tensión promedio.

En [35] se propone un control secundario distribuido para micro-redes DC el cual permite restaurar el voltaje DC a su valor nominal y mejorar el consenso de corriente de carga entre las unidades. Para esto se utilizan tres controladores: el primero es un controlador de voltaje promedio local el cual permite restaurar el voltaje DC local a su valor nominal. El segundo y el tercero son los controladores de corriente promedio local y coeficiente droop promedio los cuales trabajan juntos y permiten regular el coeficiente droop, esto con el fin que la impedancia de salida equivalente de cada convertidor pueda ser la misma y así lograr un adecuado compartido de corriente entre las unidades. Al ser un enfoque distribuido, cada unidad consta de un controlador local, el cual utiliza información local e información externa proveniente de las unidades vecinas con las cuales está comunicada.

En [36] se propone un controlador distribuido para asegurar la distribución de carga entre las unidades de manera proporcional a sus capacidades máximas y mejorar la regulación de voltaje en micro-redes DC de bajo voltaje. La salida de dicho controlador corresponde al voltaje necesario que permite compensar la desviación de voltaje producto de la acción del controlador primario basado en la estrategia de droop. El calculo de dicha variación, la cual permite cumplir con la regulación de voltaje, lo realiza por medio del promedio de corrientes a la salida de cada unidad DC, el cual tiene asociado una ganancia determinada. Por otro lado, para cumplir el objetivo de control asociado a la precisión del compartido de potencia entre las unidades, la ganancia asociada del controlador droop debe ser alta de tal forma que limite las desviaciones de corriente a un bajo valor. Luego, la desventaja de esta estrategia es la complejidad en el cálculo de ambas ganancias para cumplir con ambos objetivos de control.

En [37] y [38] se propone un esquema droop adaptativo distribuido para el control primario/secundario de micro-redes DC, el cual está compuesto por dos módulos: el regulador de tensión (VR) y el regulador de corriente (CR). El primero usa un observador de tensión cooperativo que procesa la medición de tensión local y los datos de las unidades vecinas, a través de un consenso dinámico, para estimar la tensión promedio global. Luego, el regulador utiliza esta estimación y ajusta el *set point* de tensión local. Por otro lado, el regulador de corriente compara la corriente actual en por unidad de cada unidad con la de sus vecinos, así como ajusta la impedancia virtual local para efectuar el compartido de carga de forma proporcional entre las unidades.

Las señales de salida de estos módulos (VR y CR) son añadidos al voltaje de referencia global para generar el *set point* de voltaje para cada conversor i , el cual puede ser expresado como:

$$v_i^* = v_i^{ref} - v_i^d + \delta v_i = v_i^{ref} - r_i i_i + \delta v_i \quad (2.10)$$

Donde v_i^{ref} , v_i^d , δv y r_i son el voltaje global de referencia, voltaje droop, término de corrección de voltaje y la impedancia virtual del convertor i respectivamente. Este enfoque tiene varias ventajas como el usar una red de comunicaciones distribuida, regulación de voltaje y compartimento proporcional de carga, aún cuando las impedancias de línea no son despreciables. Además, no requiere de un conocimiento a priori de los parámetros globales tales como el número de fuentes. No obstante, tiene la desventaja que la regulación de voltaje global depende de la sintonización y precisión del observador en el controlador de cada GD.

2.2.3. DSC aplicado a micro-redes híbridas AC/DC

El control secundario distribuido aplicado a micro-redes híbridas AC/DC ha sido abordado escasamente en la literatura. Las estrategias de control secundario existentes son aplicadas en cada lado de forma independiente del otro, mientras que el control del *Interlinking Converter* (ILC) se complejiza debido a la restauración de las variables de cada micro-red a su valor nominal, lo cual implica que la potencia transferida entre ambas micro-redes no sea de forma precisa.

En [39] se propone una estrategia de control secundario distribuido para una micro-red híbrida AC/DC, la cual tiene como objetivo asegurar la regulación de frecuencia, tensión AC y tensión DC; esto mientras se logra el consenso de potencia activa entre las unidades del lado AC y del lado DC. Este último objetivo es efectuado por medio del control de un *Interlinking Converter* (ILC) capaz de controlar el flujo bidireccional de potencia activa. Además, debido a que la estrategia de control es distribuida, permite lograr un buen desempeño frente a fallas en la comunicación y capacidad plug-and-play de las unidades AC y DC. Sin embargo, debido a que este esquema está basado en DAPI, no permite incluir restricciones operacionales y compensar retardo en la red de comunicación. Esto último debido a que su ley de control solo considera información actual, mientras que en un controlador predictivo el retardo estimado puede ser incluido en el problema de optimización.

Las investigaciones se han focalizado en desarrollar de forma separada el lazo de control secundario en cada lado de la micro-red híbrida (AC y DC). Esta independencia asegura la operación descentralizada del ILC mediante controladores droop normalizados, tal como se propone en [40]. En este trabajo se utiliza la frecuencia y tensión DC normalizados, en donde el error entre estas variables es llevado a cero por medio de un controlador PI. Para esto, la salida del controlador es la potencia activa transferida por el ILC, necesaria para lograr el consenso de potencia activa en todas las unidades de la micro-red híbrida. No obstante, este último objetivo no se logra de forma precisa si las variables del control secundario son restauradas a sus valores nominales.

En [41] los autores proponen una estrategia de control distribuido basado en el algoritmo de consenso dinámico para la coordinación de micro-redes híbridas AC/DC. Esta estrategia, además de regular el compartimento de potencia reactiva y corriente DC en los lados AC y DC respectivamente, permite restaurar la frecuencia y la tensión DC a sus valores nominales, manteniendo el consenso de potencia activa entre las dos micro-redes. Para lograr esto último, se propone una mejora al esquema de control droop de frecuencia/voltaje DC normalizados, el cual permite obtener la consigna de potencia activa dada al ILC [42],[43],[27]. Esta estrategia de control es validada experimentalmente y es comparada con el método de impedancia

virtual convencional, mostrando un comportamiento adecuado. No obstante, no se presenta una validación frente a fallas en las comunicaciones, capacidad plug-and-play y retardos en la red de comunicación.

En [44] se propone un esquema de control distribuido para la operación autónoma de una micro-red híbrida compuesta por una micro-red AC, una micro-red DC y un sistema de almacenamiento distribuido, en donde se logra el compartido de potencia en cada red individual, el intercambio de potencia entre las redes AC y DC, y la gestión de potencia entre las tres redes. La propuesta considera un control descentralizado para lograr el compartido de potencia local (LPS) en una micro-red AC y una micro-red DC independientemente, el compartido de potencia global (GPS) entre ambas micro-redes, y el compartido de potencia almacenada (SPS) entre los equipos de almacenamiento distribuidos. En el esquema de control descentralizado cada módulo de potencia puede operar independientemente sin enlaces de comunicación. Por otro lado, considera un control multinivel para el intercambio de potencia en el diseño del LPS, GPS y SPS para reducir innecesariamente el intercambio de potencia entre los lados AC y DC, y la operación del sistema de almacenamiento distribuido con el beneficio de prolongar la vida útil de este último y reducir las pérdidas por transferencia de potencia.

A pesar que [44] considera el control primario distribuido en cada micro-red, no aborda el lazo de control secundario en ambas micro-redes. De hecho, la restauración de frecuencia y voltaje DC afecta el compartido de potencia activa entre ambas micro-redes. Además, cabe destacar que, en la literatura, no se aborda la posibilidad de falla del ILC y, por consiguiente, cómo redistribuir el compartido de potencia activa entre los GDs en ambas micro-redes.

Por lo tanto, como trabajo de tesis se propone abordar el nivel de control secundario con un esquema distribuido para micro-redes híbridas cumpliendo con los objetivos de restauración de frecuencia y voltajes promedios AC y DC, mientras hay un consenso de potencia activa normalizada entre los GDs-ac y los GDs-dc de las micro-redes AC y DC, respectivamente. Además, se tiene como objetivo incluir el ILC en las comunicaciones, con el fin que ante fallas de éste, cada micro-red opere separadamente cumpliendo con los objetivos del control secundario. Por último, como la propuesta está diseñada en base a un controlador predictivo, a continuación se abordará el estado del arte de dicha estrategia de control aplicada a nivel secundario para micro-redes AC, DC e híbridas, con el fin de dejar en claro el porqué se utiliza esta estrategia y cuál es el aporte de esta tesis.

2.3. Control predictivo secundario

El control predictivo basado en modelos se ha desarrollado considerablemente en las últimas décadas, tanto por grupos de investigación pertenecientes al área de control de sistemas, como en la industria, debido a que es probablemente la forma más general de plantear un problema de control de proceso en el dominio del tiempo, esto porque su formulación permite integrar características del control óptimo, control estocástico, control multivariable y referencias futuras. Además, se caracteriza por utilizar un horizonte de control finito, restricciones operacionales y, en general procesos no lineales los cuales son frecuentemente encontrados en la industria [10]. Otras ventajas de esta estrategia de control con respecto a otros métodos son las siguientes:

- Puede ser usado para controlar una gran variedad de procesos.
- Se puede lidiar de forma más simple con sistemas multivariables.
- Introduce el control de prealimentado de forma natural para compensar perturbaciones medibles.
- Su extensión al tratamiento de restricciones es conceptualmente simple, y estas pueden incluirse sistemáticamente durante el proceso de diseño.
- Es muy útil cuando se conocen las referencias futuras.

En la figura 2.7 se presenta la estructura básica del control predictivo basado en modelos, el cual, como su nombre lo indica, consta de modelos de predicción asociados al proceso que se pretende controlar, el cual es usado para predecir las salidas futuras de la planta, esto basado en información actual y pasada acciones de control futuras calculadas de forma óptima. Estas últimas son calculadas por un optimizador que considera una función de costo asociada (donde se considera el error de seguimiento futuro), así como restricciones operacionales sobre los estados y/o acciones de control. Se destaca la importancia de los modelos de predicción del proceso, los cuales deben ser capaces de capturar la dinámica del proceso para predecir las salidas futuras.

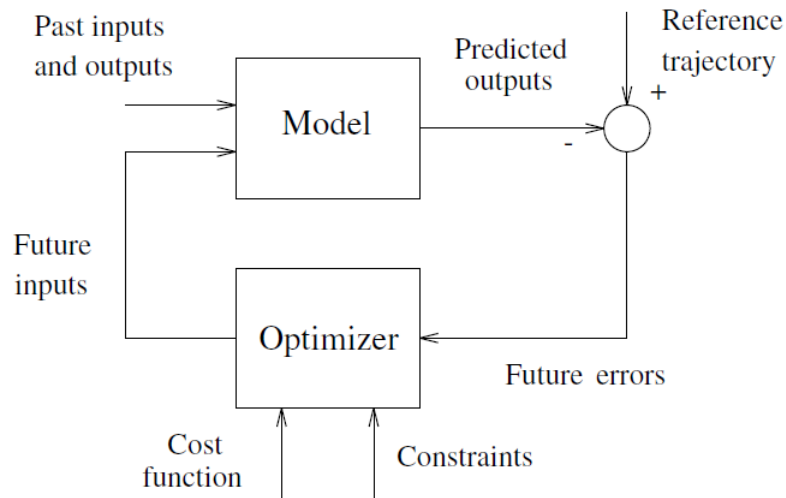


Figura 2.7: Estructura básica de un MPC [10].

El control predictivo aplicado a micro-redes a nivel secundario se ha abordado a partir de dos esquemas: centralizado y distribuido (DMPC) [45]. El primero consiste en un controlador supervisor que se encarga de optimizar el comportamiento futuro del sistema, computando en cada tiempo de muestreo las acciones de control. En [46] se propone un controlador predictivo secundario centralizado para regular frecuencia en una micro-red con dos unidades de generación. Las acciones de control son calculadas optimizando una función de costo, sujeta a restricciones en las variables manipuladas y controladas, que luego se envían al control primario de cada unidad de generación. Para esto el controlador requiere de un modelo

discreto del sistema, el cual es usado para predecir su comportamiento futuro.

Cabe destacar que, si bien el esquema centralizado tiene un buen desempeño con un bajo número de unidades, el sustancial incremento del número de éstas puede incrementar significativamente el tiempo computacional necesario para la solución del problema de optimización, como también reducir la tolerancia a fallas del controlador [45]. Debido al aumento de unidades de generación renovable en micro-redes, las consideraciones anteriores motivan el desarrollo de sistemas de control distribuidos, los cuales utilizan un arreglo de controladores que realizan sus cálculos en procesadores separados, pero se comunican para cooperar de manera eficiente en el logro de los objetivos de la planta a lazo cerrado. En las subsecciones 2.3.1, 2.3.2 y 2.3.3, se presenta un estado del arte sobre control predictivo distribuido (DMPC) aplicado a microredes AC, DC e híbridas AC/DC respectivamente.

2.3.1. MPC secundario distribuido aplicado a micro-redes AC

Recientemente, esquemas de control distribuidos basados en MPC (DMPC) han sido reportados en micro-redes AC como los que se presentan [47], [48], [49] y [50].

En [47] se propone un MPC secundario distribuido para la restauración de tensión y un controlador PI distribuido de frecuencia en micro-redes autónomas. Esta estrategia tiene una buena respuesta frente a cambios en la topología de comunicación entre las unidades, al considerar los términos asociados a la matriz de adyacencia, la cual es variante en el tiempo. Además, tiene capacidad *plug-and-play* frente a la conexión o desconexión de unidades de generación. Sin embargo, su implementación exige un alto costo computacional y se ve dificultada por el hecho del reiterativo intercambio de información entre sus controladores para llegar a una solución óptima.

Debido a esto, en [48] se propone una estrategia MPC secundario distribuido de tensión y un controlador DAPI de frecuencia para micro-redes aisladas, el cual tiene la particularidad de considerar dinámicas no lineales y no idénticas de las unidades de generación individualmente. A partir de esto, se obtiene una solución analítica para la regulación de tensión lo cual reduce el esfuerzo computacional.

En [49] se presenta un controlador DMPC, basado en una versión de consenso del método de dirección alterna del algoritmo de multiplicadores, para regular la frecuencia en una micro-red manipulando los voltajes de las cargas que son sensibles a dicha variable.

Por último, los autores en [50], [51], proponen y validan experimentalmente un DMPC para restauración de frecuencia y voltaje promedio, utilizando modelos a partir de las ecuaciones droop y modelos de transferencia de potencia activa y reactiva. También se considera el compartimento proporcional de potencia activa y reactiva entre las unidades, esto basado en los conceptos abordados en [32]. La potencia compartida se basa en el consenso sobre las contribuciones de potencia activa y reactiva de cada unidad de generación en la micro-red, utilizando una matriz de adyacencia. Usando mediciones/estimaciones externas, este controlador evita la necesidad de modelar la topología de la micro-red. Sin embargo, este trabajo se limita a micro-redes AC, dejando como trabajo futuro aplicar esta estrategia a micro-redes DC y posteriormente a micro-redes híbridas AC/DC.

2.3.2. MPC secundario aplicado a micro-redes DC

La literatura acerca del MPC secundario aplicado a micro-redes DC es escasa. Los trabajos que se han hecho en este tipo de micro-redes abordan, principalmente, los objetivos establecidos en el nivel de control primario, tales como la estabilidad de voltaje y el compartido de potencia entre las unidades. Por ejemplo, en [52] se propone un controlador droop modificado, basado en la estrategia de control predictivo aplicado a una micro-red DC compuesta por tres GDs y un sistema de almacenamiento. Este controlador cumple con los mismos objetivos que el droop convencional, tales como la regulación de voltaje y la carga compartida entre las unidades, sin embargo, este último objetivo lo efectúa de forma más precisa y con una respuesta dinámica más rápida.

En [53] se propone un controlador predictivo para el control de potencia en una micro-red DC, la cual está compuesta por tres GDs-ac conectados a sus respectivos convertidores AC/DC, los que a su vez se conectan a un bus DC. Esta estrategia permite mantener la estabilidad de voltaje en el bus DC, mientras asegura un compartido de potencia entre las unidades de forma más precisa en comparación a la estrategia de control droop.

En [54] se utiliza un controlador predictivo, el cual es seleccionado para ser la unidad de control maestro en una arquitectura de control distribuida para una micro-red DC, esto con el fin de generar valores de referencia a los controladores locales con y así asegurar una operación económica y estable en la micro-red. Este esquema integra las ventajas del control jerárquico y métodos de control maestro-esclavo. Por otro lado, en caso de fallas en las comunicaciones, el sistema de control cambia a un control droop local, lo cual permite proveer redundancia en la elección de la señal de referencia.

Debido a que en general la literatura no aborda los problemas asociados al nivel de control secundario tales como la regulación de tensión DC y consenso de potencia entre las unidades de generación, en este trabajo de tesis se propone una estrategia de control predictivo a nivel secundario de naturaleza distribuida aplicado a micro-redes DC, el cual permite restaurar el promedio de la tensión DC de los GDs a su valor nominal, mientras éstos entregan la misma potencia a razón de su potencia máxima.

2.3.3. MPC secundario aplicado a micro-redes híbridas AC/DC

La literatura acerca del MPC secundario aplicado a micro-redes híbridas es escasa. Los trabajos que se han hecho en este tipo de micro-redes abordan, principalmente, la operación a un nivel de control terciario. Este es el caso de [55], en donde se propone un esquema óptimo basado en un controlador predictivo distribuido (DMPC) para la operación económica de una red compuesta de micro-redes interconectadas, junto a un sistema de almacenamiento híbrido de energía. El algoritmo es diseñado de acuerdo al criterio de mejoramiento de la función de costo de cada micro-red, lo cual permite maximizar el beneficio económico de las micro-redes, minimizar la degradación de cada sistema de almacenamiento, mientras cumple las restricciones del sistema. Además, el problema DMPC es resuelto usando programación lineal entera-mixta.

Debido a que en general el control predictivo aplicado a micro-redes híbridas se utiliza para resolver el problema de operación económica (nivel terciario), en este trabajo de tesis se

utiliza dicha estrategia para cumplir los objetivos de nivel secundario, tales como regulación de frecuencia y tensión promedio en el lado AC y de tensión promedio en el lado DC, así como el consenso de potencia reactiva proporcional entre los GDs-ac y el consenso de potencia activa proporcional entre todos los GDs de la micro-red híbrida AC/DC.

2.4. Discusión

En este capítulo se han presentado los fundamentos de control de las micro-redes de naturaleza AC, DC e híbridas AC/DC. La estructura de control ampliamente utilizada es el control jerárquico, el cual se divide en tres niveles: control primario, control secundario y control terciario. Cabe destacar que el alcance de esta tesis incluye los dos primeros, no obstante, el diseño de la estrategia de control propuesta aborda solo el control secundario, mientras que el control primario es necesario para el correcto funcionamiento de dicha estrategia y de la micro-red.

Con respecto al control primario, existen diversas estrategias reportadas en la literatura, dentro de las cuáles, una de las más utilizadas es el control droop. Esta estrategia es la que se va a utilizar en esta tesis, ya que el diseño de la estrategia DMPC propuesta para micro-redes híbridas incluye modelos de predicción basados en dicho controlador. Es por esto que se asumirá que las impedancias de la micro-red son de naturaleza inductiva, que las cargas son lineales y que la micro-red opera en forma aislada.

Con respecto al control secundario, en la literatura se han reportado trabajos utilizando tres tipos de esquemas: centralizado, descentralizado y distribuido, cada uno con sus ventajas y desventajas. No obstante, en esta tesis se opta por el esquema distribuido, debido a que los trabajos reportados han demostrado una serie de ventajas tales como: solución cercana a la óptima, robustez frente a cambios eléctricos/de comunicación y su eficacia frente a problemas de comunicación, como latencia o pérdida de datos. Además, en comparación al esquema centralizado, no depende de un único punto de conexión y demanda una menor carga computacional.

Finalmente, en la sección 2.3 se presentó un estado del arte del control predictivo aplicado a nivel secundario para micro-redes AC, DC e híbridas. A partir de esta revisión y su posterior análisis, se pudo concluir que los trabajos se han concentrado en micro-redes de naturaleza AC, mientras que en micro-redes híbridas existen trabajos solo a nivel terciario. Con respecto a los trabajos realizados en micro-redes AC, se han aplicado esquemas de control centralizado y distribuido, cada uno con sus ventajas y desventajas como se mencionó en el párrafo anterior. Las ventajas del control predictivo reportado en dichos trabajos radican principalmente en lograr compensar retardos en la red de comunicación, debido a su esquema de horizonte deslizante, y al tratarse de un problema de optimización, se logra obtener una solución óptima (o cercana a ella) y poder incluir restricciones operacionales. Debido a estas ventajas, así como su comprobado buen desempeño estudiado en micro-redes AC y que aún no hay estudios de este tipo en micro-redes híbridas, es que en esta tesis se decide diseñar y evaluar una estrategia de control que esté basada en este tipo de controlador. Por lo tanto, para proceder a esto, en el siguiente capítulo se presenta el diseño de una estrategia DMPC secundario aplicado a micro-redes híbridas AC/DC.

Capítulo 3

Control predictivo secundario AC/DC propuesto

En este capítulo se presenta el diseño propuesto de un controlador predictivo distribuido a nivel secundario para una micro-red híbrida AC/DC, con el fin de restaurar frecuencia y voltaje promedio en el lado AC y voltaje promedio en el lado DC, mientras se logra un consenso de potencia reactiva proporcional entre las unidades del lado AC y un consenso de potencia activa proporcional a la capacidad máxima en todas las unidades de la micro-red híbrida AC/DC.

Primero que todo, cabe destacar que en la propuesta de esta tesis se utiliza la estrategia de control predictivo distribuido a nivel secundario en una micro-red AC, que este trabajo fue realizado en [50],[51], esto último se usa como base para la propuesta que aborda esta tesis, la cual consiste en el diseño de una estrategia de control predictivo distribuido a nivel secundario en una micro-red DC y, además, dos estrategias de control para obtener una consigna de potencia activa que luego es dada al ILC, la cual permite el consenso de potencia activa entre todas las unidades de la micro-red híbrida AC/DC. La primera, basado en [39], consiste en un controlador integral, con una ganancia asociada, el cual permite anular el error de potencia activa normalizada entre las unidades del lado AC y del lado DC. La segunda consiste en un controlador predictivo centralizado cuya función objetivo consta de dos términos, los cuales están asociados al consenso de potencia activa normalizada entre al menos una unidad del lado AC y una unidad del lado DC; y la minimización de la variación de la acción de control. La minimización de la función objetivo permite obtener la consigna de potencia activa dada al ILC.

Este capítulo es organizado de la siguiente forma: en la sección 3.1 se explica la estructura de la micro-red híbrida usada en esta tesis. En la sección 3.2 se presenta un controlador predictivo distribuido secundario aplicado a una micro-red AC, el cual es propuesto en [50],[51], mientras que en la sección 3.3 se presenta un controlador predictivo distribuido secundario aplicado a una micro-red DC, el cual es una propuesta de esta tesis. Luego, en las secciones 3.4 y 3.5 se presentan el controlador integral, basado en [39], y el controlador predictivo, respectivamente, propuestos en esta tesis para el control del ILC. Por último, en la sección 3.6 se presenta una discusión con ventajas y desventajas acerca de la propuesta presentada

en las subsecciones anteriores.

3.1. Configuración de las micro-redes

En esta sección se aborda la estructura de la micro-red híbrida usada en esta tesis.

Se considera una micro-red híbrida compuesta de un conjunto de P GDs, donde $\mathbb{P}_{ac} = 1, \dots, p_{ac}$ representa el subconjunto de GDs en la micro-red AC, $\mathbb{P}_{dc} = 1, \dots, p_{dc}$ representa el subconjunto de GDs en la micro-red DC y, $\mathbb{P}_{ILC} = 1, \dots, p_{ILC}$ representa el subconjunto de *Interlinking Converters*, los cuales conectan eléctricamente las micro-redes AC y DC; por lo tanto, $P = p_{ac} + p_{dc}$. Además, al considerarse una micro-red multi-nodo, no es obligatorio que los ILCs sean conectados al mismo nodo. Por otro lado, se considera que el convertidor de cada unidad de la micro-red híbrida (considerando una configuración back-to-back) actúa como un convertidor fuente de tensión (VSC); por lo tanto, se requiere un filtro LC a la salida. También, se utiliza una inductancia de acople entre el filtro de salida y la micro-red, permitiendo calcular la diferencia de tensión y por consiguiente la contribución de potencia de cada unidad a la micro-red. En el caso de la micro-red AC, esta impedancia es una inductancia (L_i), mientras que en la micro-red DC es una resistencia (R_i). No obstante, estos elementos pueden ser sustituidos por una impedancia virtual [56]; sin embargo, es un problema abierto que escapa del tópico de esta tesis. A pesar que en [50],[51], la desviación de tensión aguas abajo es medida usando sensores en tiempo real, en este caso, dicha tensión es estimada por medio de la Ley de Ohm, no obstante, esto será definido con más detalle en las Secciones 3.2 y 3.3 para las micro-redes AC y DC, respectivamente.

Para el propósito de esta tesis, se desea compartir potencia activa entre las micro-redes AC y DC, preservando la frecuencia y tensión AC promedio, y tensión DC promedio. Para lograr esto, los controladores secundarios de ambas micro-redes, así como del ILC, consideran la potencia activa como una variable de control. Por un lado, el controlador predictivo del ILC permite un consenso de potencia activa entre las micro-redes AC y DC, mientras que los controladores secundarios de las micro-redes AC y DC establecen el consenso de potencia activa en función de sus micro-redes locales. Considerando que los esquemas de control distribuido requieren un intercambio de información para lograr los objetivos del control cooperativo, se establece un modelo de red de comunicación para los fenómenos de latencia y conectividad. La latencia es definida como el retardo de comunicación de extremo a extremo, lo que significa que es una adición de retardos de transporte y procesamiento. Este retardo es expresado por la variable τ_{ij} , y representa el retardo de la información enviada desde la unidad j a la unidad i . Además, es representado en períodos de muestreo, en donde $\tau_{ij} = \tau_{ji}$.

Por otro lado, la conectividad bidireccional es representada por la matriz de adyacencia A de dimensiones $(P + p_{ILC}) \times (P + p_{ILC})$, donde sus entradas a_{ij} son definidas, para $i, j \in \mathbb{P}_{ac} \cup \mathbb{P}_{dc} + \mathbb{P}_{ILC}$, por (3.1) como una función de la información recibida en GD_i en el instante k . Como la comunicación es bidireccional, el grafo asociado es no dirigido; por lo tanto $a_{ij} = a_{ji}$ [57].

$$a_{ij}(k) = \begin{cases} 1 & \text{Datos desde GD}_j \text{ llegan a GD}_i \text{ en } k \\ 0 & \text{Datos desde GD}_j \text{ no llegan a GD}_i \text{ en } k \\ 0 & j = i \end{cases} \quad (3.1)$$

La topología de la micro-red híbrida AC/DC presentada en esta sección es utilizada en la estrategia de control que se presentará a continuación (sección 3.2) y en las propuestas de las secciones 3.3, 3.4 y 3.5. Posteriormente, también se utiliza en los resultados por simulación y experimentales mostrados en los capítulos 4 y 5.

3.2. Control predictivo secundario aplicado a micro-redes AC

La función del controlador predictivo abordado en esta sección, diseñado en [50],[51], es la de restaurar la frecuencia y amplitud de tensión promedio en una micro-red AC a sus valores nominales, mientras las unidades de generación distribuida entregan la misma potencia activa y reactiva a razón de su capacidad nominal. La principal característica de este controlador es que es de naturaleza distribuida, por lo que requiere que cada convertidor i de la micro-red AC deba estar comunicado con al menos una unidad vecina. Las variables compartidas en la micro-red AC son la frecuencia, amplitud de tensión, el porcentaje de potencia activa (P_{pu-i}) y el porcentaje de potencia reactiva (Q_{pu-i}) de la unidad i . Estos dos últimos son calculados mediante las ecuaciones 3.2 y 3.3 respectivamente.

$$P_{pu-i} = \frac{P_i}{S_{max-i}} \quad , \quad 0 \leq P_{pu-i} \leq 1 \quad (3.2)$$

$$Q_{pu-i} = \frac{Q_i}{S_{max-i}} \quad , \quad 0 \leq Q_{pu-i} \leq 1 \quad (3.3)$$

El comportamiento de la micro-red AC se refleja en determinados modelos fenomenológicos tales como: ecuaciones droop de frecuencia y amplitud de tensión, ecuación de ángulo de fase y ecuaciones de transferencia de potencia activa y reactiva. Además, el modelo de la red de comunicación considera la latencia, modelada por un término de retardo, y la conectividad definida por los términos de la matriz de adyacencia (a_{ij}). Otra característica importante es que los modelos definidos para cada unidad necesitan mediciones externas de tensión a la salida del filtro LC (V_i) y en el nodo de medición adyacente (V_i^L), no obstante, este último es obtenido mediante un observador de estado reducido, basado en [59], el cual por medio de un PLL se logra obtener la frecuencia ω_i^L y ángulo θ_i^L en dicho nodo. Para mayor claridad, en la figura 3.1 se muestra una diagrama de bloques con la estrategia de control propuesta en una micro-red AC, junto con sus respectivas variables de importancia, ya sea medidas o estimadas.

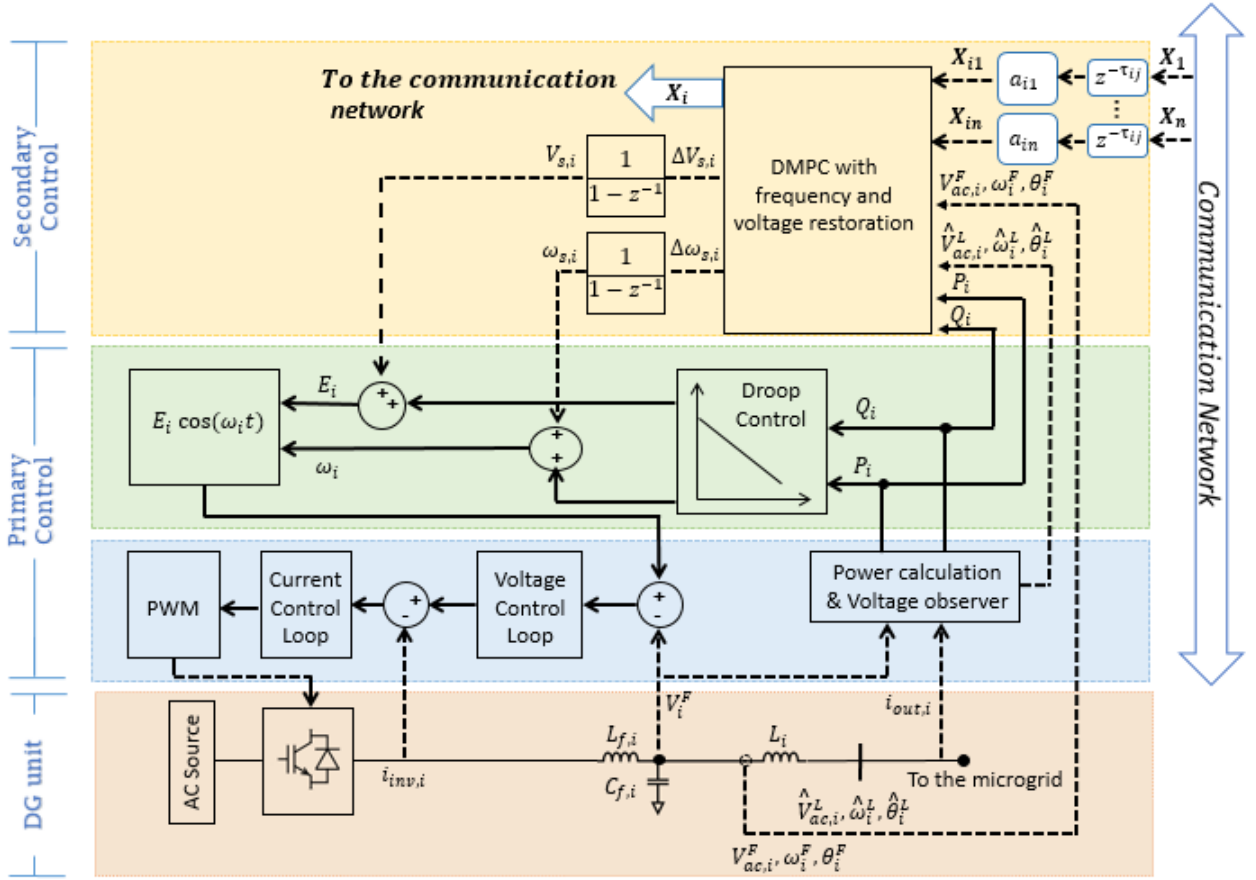


Figura 3.1: Estrategia de control propuesta en la micro-red AC [50],[51].

La estrategia DMPC presentada en esta sección se divide en las siguientes subsecciones: en 3.2.1 se describen las ecuaciones droop de frecuencia y tensión de cada unidad. En 3.2.2 se describe la ecuación de ángulo de fase y el observador de estado reducido a la salida de la inductancia de acople de cada unidad. Luego en 3.2.3 y 3.2.4 se describen las ecuaciones de transferencia de potencia activa y reactiva, respectivamente. En 3.2.5 se presentan un modelo discreto a partir de las ecuaciones de las subsecciones anteriores. Luego, a partir de lo anterior, en 3.2.6 se presenta el controlador predictivo cuyo problema de optimización incluye la función de costo, los modelos de predicción y las restricciones operacionales. Por último, en 3.2.7 se explica la formulación de la programación cuadrática utilizada para resolver el problema de optimización.

3.2.1. Ecuaciones droop

Las ecuaciones droop de frecuencia y tensión son incluidas en el modelo de control secundario debido a que determinan el punto de unión entre este último y el control primario. En 3.4 y 3.5 se muestran las leyes de control droop añadiéndoles las acciones de control secundario $\omega_{s,i}$ y $V_{acs,i}$ respectivamente, para la unidad i .

$$\omega_i(t) = \omega_0 + M_{p\omega,i}P_i(t) + \omega_{s,i}(t) \quad (3.4)$$

$$V_{ac,i}(t) = V_{ac0} + M_{qv,i}Q_i(t) + V_{acs,i}(t) \quad (3.5)$$

3.2.2. Ecuación de ángulo de fase

En la ecuación 3.6 se define la desviación de ángulo $\delta\theta_i$ entre la unidad i y la micro-red, entre los nodos de la inductancia de acople (L_i), la cual tiene un doble propósito: por un lado, conectar la salida del filtro pasa bajos a la micro-red, y por el otro, la desviación de fase es requerida por el controlador presentado en esta sección para estimar la potencia activa y reactiva transferidas desde el GD a la micro-red [58].

Para estimar $\delta\theta_i(t)$, primero que todo se usa la medición de voltaje ($V_{ac,i}$) a la salida del filtro LC del GD, al cual se le aplica un lazo de seguimiento de fase (PLL) para estimar su frecuencia (ω_i) y el ángulo de fase (θ_i). Además, el voltaje ($\hat{V}_{ac,i}^L$) a la salida de la inductancia de acople (L_i) es estimado por medidores virtuales, basados en observadores no lineales de orden reducido, mientras se mantiene el desempeño del controlador. Luego, a dicho voltaje se le aplica un PLL, con el fin de estimar la frecuencia ($\hat{\omega}_i^L$) y ángulo de fase ($\hat{\theta}_i^L$).

El observador de voltaje está basado en [59], cuya principal ventaja es su dinámica lineal para el error de estimación. Por lo tanto, las ganancias del observador pueden ajustarse mediante el ajuste del polo, mejorando el rendimiento en el transitorio del observador y la tasa de convergencia del error de estimación. En cuanto al funcionamiento del observador, éste trabaja en un sistema de referencia $\alpha - \beta$. Los estados estimados son definidos como $\hat{V}_{\alpha ac,i}^L = V_m \sin(\theta_i)$ y $\hat{V}_{\beta ac,i}^L = V_m \cos(\theta_i)$, donde V_m depende de la transformación $abc - \alpha\beta$. La formulación del observador en espacio de estados es obtenida a partir de la ley de voltaje de Kirchhoff, mientras que sus entradas son los valores medidos $V_{ac,i}$ y $i_{ac,i}$ (a la salida del filtro LC), ambos en el sistema de referencia $\alpha - \beta$. Más detalle del diseño del observador se muestra en el anexo 7.1.1.

$$\delta\theta_i(t) = \theta_i(t) - \theta_i^L(t) = \int_0^t [\omega_i(\tau) - \omega_i^L(\tau)] d\tau \quad (3.6)$$

3.2.3. Ecuación de transferencia de potencia activa

El consenso de potencia activa en la micro-red es logrado estimando la contribución de potencia activa de cada unidad en la micro-red. Debido a que esta estrategia de control no utiliza un modelo basado en la matriz de admitancia de la red, se utiliza un modelo basado en la transferencia de potencia activa a través de una inductancia de acople. En 3.7 se presenta la ecuación que determina la potencia activa transferida de la unidad i a la micro-red, donde $B_i = 1/L_i\omega_0$.

$$P_i(t) = B_i V_{ac,i}(t) V_{ac,i}^L(t) \sin(\delta\theta_i(t)) \quad (3.7)$$

3.2.4. Ecuación de transferencia de potencia reactiva

De forma análoga a la sección 3.2.3, el consenso de potencia reactiva en la micro-red es logrado estimando la contribución de potencia reactiva de cada unidad en la micro-red.

Además, se utiliza un modelo basado en la transferencia de potencia reactiva a través de una inductancia de acople. En 3.8 se presenta la ecuación que determina la potencia reactiva transferida de la unidad i a la micro-red.

$$Q_i(t) = B_i[V_{ac,i}(t)^2 - V_{ac,i}V_{ac,i}^L(t)]\cos(\delta\theta_i(t)) \quad (3.8)$$

3.2.5. Modelo en tiempo discreto

Las ecuaciones 3.4, 3.5, 3.6, 3.7 y 3.8 son discretizadas usando el método de Euler, donde $k = nT_{sec}$, $n \in \mathbb{Z}^+$, y T_{sec} es el período de muestreo usado en el nivel de control secundario. Por otro lado, para eliminar el error en estado estacionario se aplican integradores discretos a las salidas del DMPC. Para esto, en la ecuación 3.9 se define el operador incremental Δ el cual se aplica en las ecuaciones 3.4 y 3.5 para computar $\Delta\omega_{s,i}$ y $V_{acs,i}$ respectivamente.

$$\Delta f(k) = [f(k) - f(k-1)] \quad (3.9)$$

Por otro lado, en las ecuaciones 3.7 y 3.8 se aplica una expansión de Taylor en torno al punto medido/estimado $\{\omega_i(k), \hat{\omega}_i^L(k), V_{ac,i}(k), \hat{V}_{ac,i}^L(k), \delta\theta_i(k), P_i(k), Q_i(k)\}$, con el fin de linealizar.. Luego de lo anterior, el modelo lineal en tiempo discreto resultante es mostrado en las ecuaciones 3.10, 3.11, 3.12, 3.13 y 3.14.

$$\omega_i(k+1) = \omega_i(k) + M_{p\omega,i}[P_i(k+1) - P_i(k)] + \Delta\omega_{s,i}(k) \quad (3.10)$$

$$V_{ac,i}(k+1) = V_{ac,i}(k) + M_{qv,i}[Q_i(k+1) - Q_i(k)] + \Delta V_{acs,i}(k) \quad (3.11)$$

$$\delta\theta_i(k+1) = \theta_i(k) + T_{sec}[\omega_i(k+1) - \hat{\omega}_i^L(k)] \quad (3.12)$$

$$\begin{aligned} P_i(k+1) = & P_i(k) + [V_{ac,i}(k+1) - V_{ac,i}(k)]B_i\hat{V}_{ac,i}^L(k)\sin(\delta\theta_i(k)) \\ & + [\delta\theta_i(k+1) - \delta\theta_i(k)]B_iV_{ac,i}(k)\hat{V}_{ac,i}^L(k)\cos(\delta\theta(k)) \end{aligned} \quad (3.13)$$

$$\begin{aligned} Q_i(k+1) = & Q_i(k) + [V_{ac,i}(k+1) - V_{ac,i}(k)]B_i[2V_{ac,i}(k) - \hat{V}_{ac,i}^L(k)\cos(\delta\theta(k))] \\ & + [\delta\theta_i(k+1) - \delta\theta_i(k)]B_iV_{ac,i}(k)\hat{V}_{ac,i}^L(k)\sin(\delta\theta(k)) \end{aligned} \quad (3.14)$$

3.2.6. Controlador predictivo

En la ecuación 3.15 se presenta la función de costo asociada al controlador predictivo distribuido, la cual consta de seis términos con sus respectivos pesos, donde cada uno representa un objetivo de control en la micro-red AC. El primer término representa la regulación de frecuencia promedio, la cual es de carácter global en toda la micro-red, ya que dicho término está basado en predicciones compartidas por medio de la red de comunicación. El segundo término corresponde a la regulación de tensión promedio. El tercer y cuarto término corresponden a la minimización de la variación de la acción de control de frecuencia y tensión

requerida por cada GD_i . Por último, el quinto y sexto término corresponden al consenso de potencia activa y reactiva proporcional de las unidades vecinas.

$$\begin{aligned}
J_{ac,i}(k) = & \min_{\Delta\omega_{s,i}(k), \dots, \Delta\omega_{s,i}(k+N_u-1)} \sum_{m=1}^{N_y} [\lambda_{1i}(\bar{\omega}_i(k+m) - \omega_0)^2 + \lambda_{2i}(\bar{V}_{ac,i}(k+m) - V_{ac0})^2] \\
& + \sum_{m=1}^{N_u} [\lambda_{3i}(\Delta\omega_{s,i}(k+m-1))^2 + \lambda_{4i}(\Delta V_{acs,i}(k+m-1))^2] \\
& + \sum_{j \in \mathbb{P}_{ac}} \sum_{m=1}^{N_y} \lambda_{5i} a_{ij}(k) \left(\frac{P_i(k+m)}{|S_{imax}|} - \frac{P_j(k+m - \hat{\tau}_{ij})}{|S_{jmax}|} \right)^2 \\
& + \sum_{j \in \mathbb{P}_{ac}} \sum_{m=1}^{N_y} \lambda_{6i} a_{ij}(k) \left(\frac{Q_i(k+m)}{|S_{imax}|} - \frac{Q_j(k+m - \hat{\tau}_{ij})}{|S_{jmax}|} \right)^2
\end{aligned} \tag{3.15}$$

El conjunto de ecuaciones 3.16 representan los modelos de predicción utilizados por el controlador y determinan el comportamiento de la unidad en $(k+m)$, con $m \in \mathbb{Z}^+$. Estos modelos consideran la linealización realizada en la Sección 3.2.5 en torno al punto de medición k .

$$\omega_i(k+m) = \omega_i(k+m-1) + M_{p\omega,i}[P_i(k+m) - P_i(k+m-1)] + \Delta\omega_{s,i}(k+m-1) \tag{3.16a}$$

$$V_{ac,i}(k+m) = V_{ac,i}(k+m-1) + M_{qv,i}[Q_i(k+m) - Q_i(k+m-1)] + \Delta V_{acs,i}(k+m-1) \tag{3.16b}$$

$$\delta\theta_i(k+m) = \theta_i(k+m-1) + T_{sec}[\omega_i(k+m) - \hat{\omega}_i^L(k)] \tag{3.16c}$$

$$P_i(k+m) = P_i(k) + [V_{ac,i}(k+m) - V_{ac,i}(k)]B_i\hat{V}_{ac,i}^L(k)\sin(\delta\theta_i(k)) \tag{3.16d}$$

$$+ [\delta\theta_i(k+m) - \delta\theta_i(k)]B_iV_{ac,i}(k)\hat{V}_{ac,i}^L(k)\cos(\delta\theta(k)) \tag{3.16e}$$

$$Q_i(k+m) = Q_i(k) + [V_{ac,i}(k+m) - V_{ac,i}(k)]B_i[2V_{ac,i}(k) - \hat{V}_{ac,i}^L(k)\cos(\delta\theta(k))] \tag{3.16f}$$

$$+ [\delta\theta_i(k+m) - \delta\theta_i(k)]B_iV_{ac,i}(k)\hat{V}_{ac,i}^L(k)\sin(\delta\theta(k)) \tag{3.16g}$$

Por último, el conjunto de ecuaciones presentadas en 3.17 corresponden a las restricciones operacionales de la micro-red.

$$\bar{\omega}_i(k+m) = \frac{\omega_i(k+m) + \sum_{j \in \mathbb{P}_{ac}} a_{ij}(k) \omega_j(k+m - \hat{\tau}_{ij})}{1 + \sum_{j \in \mathbb{P}_{ac}} a_{ij}(k)} \quad (3.17a)$$

$$\bar{V}_{ac,i}(k+m) = \frac{V_{ac,i}(k+m) + \sum_{j \in \mathbb{P}_{ac}} a_{ij}(k) V_{ac,j}(k+m - \hat{\tau}_{ij})}{1 + \sum_{j \in \mathbb{P}_{ac}} a_{ij}(k)} \quad (3.17b)$$

$$\bar{V}_{ac,imin} \leq \bar{V}_{ac,i}(k+m) \leq \bar{V}_{ac,imax} \quad (3.17c)$$

$$|P_i(k)| + |Q_i(k)| + \text{sign}(P_i(k))[P_i(k+m) - P_i(k)] \quad (3.17d)$$

$$+ \text{sign}(Q_i(k))[Q_i(k+m) - Q_i(k)] \leq S_{imax} \quad (3.17e)$$

En específico, las ecuaciones 3.17a y 3.17b definen la frecuencia promedio y tensión promedio respectivamente, las cuales son dependientes de los términos de la matriz de adyacencia a_{ij} . Esto permite incluir solo la información recibida para estimar y predecir los promedios, por consiguiente, otorga robustez en las comunicaciones frente a fallas en la red y pérdida de datos. Por otro lado, las restricciones 3.17c y 3.17d permiten asegurar que la tensión promedio y la potencia aparente de cada unidad permanezcan dentro de un rango específico. La desigualdad de 3.17d es definida a partir de una aproximación interna politópica usando la desigualdad triangular definida en la ecuación 3.18.

$$|S_i(t)| = (P_i(t)^2 + Q_i(t)^2)^{1/2} < S_{imax} \quad (3.18)$$

3.2.7. Formulación programación cuadrática

A partir de lo mostrado en la subsección 3.2.6, se puede construir un problema de programación cuadrática (QP) para cada GD en la micro-red, en donde se define las siguientes matrices/vectores: H_i , F_i , A_i , B_i , $A_{eq,i}$, $B_{eq,i}$. Luego, el vector de salida \mathbb{X}_i , definido en 3.19, está conformado por el conjunto de variables predichas $\mathbb{X}_{p,i}$ y la secuencia de control óptima $\mathbb{X}_{\Delta,i}$ que son definidas en 3.19.

$$\begin{aligned} J_{ac,i}(k) = \min_{\mathbb{X}_i} & \quad \frac{1}{2} \mathbb{X}_i^T H_i \mathbb{X}_i \\ s.a. & \quad A_i \mathbb{X}_i \leq B_i \\ & \quad A_{eq,i} \mathbb{X}_i = B_{eq,i} \\ & \quad \mathbb{X}_i = \{\mathbb{X}_{p,i}, \mathbb{X}_{\Delta,i}\} \\ \mathbb{X}_{p,i} = & \quad \{\bar{\omega}_i(k+m), \bar{V}_{ac,i}(k+m), \omega_i(k+m), V_{ac,i}(k+m), \\ & \quad \delta\theta_i(k+m), P_i(k+m), Q_i(k+m)\}_{k=1}^{N_y} \\ \mathbb{X}_{\Delta,i} = & \quad \{\Delta\omega_{s,i}(k+m-1), \Delta V_{acs,i}(k+m-1)\}_{k=1}^{N_u} \end{aligned} \quad (3.19)$$

Para que el controlador predictivo presentando anteriormente sea estable, requiere que haya una solución factible para el problema de optimización [10], para lo cual se deben

cumplir una serie de condiciones. En [50],[51], en donde se propone la estrategia de control presentada en esta sección, se menciona algunas condiciones para asegurar la estabilidad, sin embargo, no se ahonda más en ello, ya que no es un alcance de ese estudio. A pesar de esto, algunas condiciones que se mencionan están relacionadas a garantizar una condición inicial que sea factible, para lo cual se procede a activar el DMPC sólo cuando la micro-red opera con una frecuencia y tensión cercanas a ω_0 y V_{ac0} , respectivamente. Otra condición que se menciona, que está relacionada con la factibilidad del QP, es el costo computacional, el cual es reducido mediante las limitaciones de rango y valor final de la solución. Por último, se menciona la viabilidad del QP la cual es garantizada, debido a que el sistema opera dentro de los límites físicos en todo el horizonte de predicción (ecuaciones 3.17a a 3.17d).

3.3. Propuesta control predictivo distribuido secundario aplicado a micro-redes DC

La función del controlador predictivo propuesto en esta sección es la de restaurar el voltaje promedio a su valor nominal en una micro-red DC, mientras las unidades de generación distribuida entregan la misma potencia activa a razón de su capacidad nominal. La principal característica del controlador diseñado es que es de naturaleza distribuida, por lo que requiere que cada convertidor i de la micro-red DC deba estar comunicado con al menos una unidad vecina. La variable compartida en la micro-red DC es el porcentaje de potencia generado por la unidad i (P_{pu-i}) el cual está dado por:

$$P_{pu-i} = \frac{P_i}{P_{max-i}} \quad , \quad 0 \leq P_{pu-i} \leq 1 \quad (3.20)$$

El comportamiento de la micro-red DC se refleja en determinados modelos fenomenológicos, tales como la ecuación droop $P-v$ y la ecuación de transferencia de potencia activa de cada unidad a la micro-red. Además, el modelo de la red de comunicación considera la latencia, modelada por un término de retardo, y la conectividad, definida por los términos de la matriz de adyacencia (a_{ij}). Otra característica importante es que los modelos definidos para cada unidad necesitan mediciones externas de tensión a la salida del filtro LC ($V_{dc,i}$) y en el nodo de medición adyacente ($V_{dc,i}^R$), el cual es definido como el nodo aguas abajo de la resistencia de acople R_i . No obstante, para obtener este último término se puede utilizar la Ley de Ohm teniendo como información el voltaje antes de la resistencia de acople R_i y la corriente a través de ella.

Para mayor claridad, en la figura 3.2 se muestra una diagrama de bloques con la estrategia de control propuesta en una micro-red DC junto con sus respectivas variables de importancia ya sea medidas o estimadas.

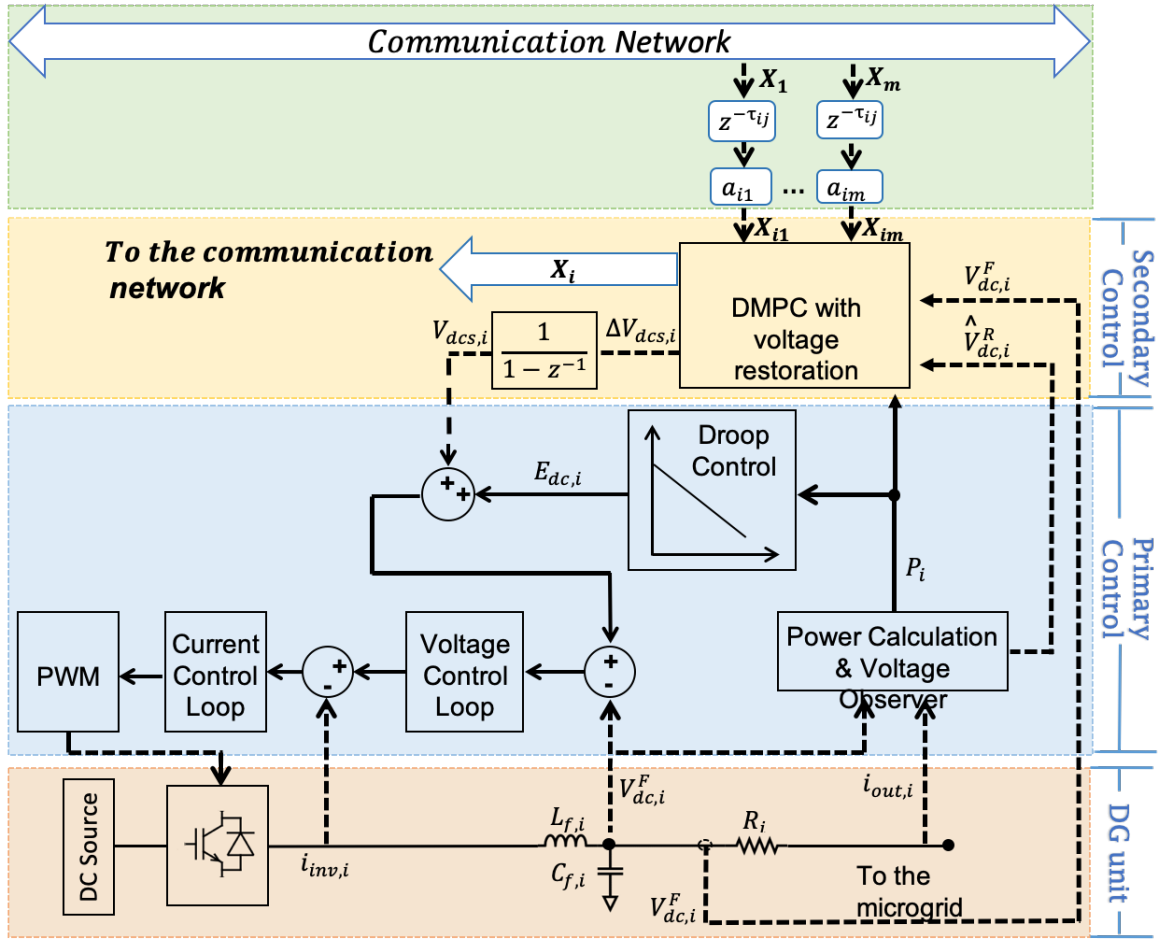


Figura 3.2: Estrategia de control propuesta en la micro-red DC.

La estrategia DMPC presentada en esta sección se divide en las siguientes subsecciones: en 3.3.1 y 3.3.2 se describen las ecuación droop de tensión y la ecuación de transferencia de potencia de cada unidad, respectivamente. En 3.3.3 se presenta un modelo discreto a partir de las ecuaciones de las subsecciones anteriores. Luego, a partir de lo anterior, en 3.3.4 se presenta el controlador predictivo cuyo problema de optimización incluye la función de costo, los modelos de predicción y las restricciones operacionales. Por último, en 3.3.5 se explica la formulación de la programación cuadrática utilizada para resolver el problema de optimización.

3.3.1. Ecuación droop

La ecuación droop es incluida en el modelo de control secundario debido a que determina el punto de unión entre los niveles de control primario y secundario. En 3.21 se muestra la ley de control droop añadiéndole la acción de control secundario $V_{dcs,i}$ para la unidad i .

$$V_{dc,i}(t) = V_{dc0} + M_{dc,i}P_i(t) + V_{dcs,i}(t) \quad (3.21)$$

3.3.2. Ecuación de transferencia de potencia

El consenso entre las unidades es logrado estimando la contribución de potencia activa de cada una de éstas a la micro-red. Debido a que la estrategia de control propuesta no utiliza un modelo basado en la matriz de admitancia de la red, se propone un modelo basado en la transferencia de potencia a través de una resistencia de acople. En la ecuación 3.22 se determina la potencia activa transferida de la unidad i a la micro-red, donde $G_i = 1/R_i$.

$$P_i(t) = V_{dc,i}(t) \cdot I_{dc,i}(t) = G_i V_{dc,i}(t) (V_{dc,i}(t) - \hat{V}_{dc,i}^R(t)) \quad (3.22)$$

De manera similar a la micro-red AC, en la ecuación 3.23 se define el voltaje estimado $\hat{V}_{dc,i}^R$, el cual se calcula aguas abajo de la resistencia de acople R_i usando la ley de Ohm.

$$\hat{V}_{dc,i}^R = V_{dc,i} - I_{dc,i} R_i \quad (3.23)$$

3.3.3. Modelo en tiempo discreto

Las ecuaciones 3.21 y 3.22 son discretizadas usando el método de Euler, donde $k = nT_{sec}$, $n \in \mathbb{Z}^+$, y T_{sec} es el período de muestreo usado en el nivel de control secundario. Además, para eliminar el error en estado estacionario se aplica un integrador a la variación de la acción de control la cual corresponde a la salida del DMPC. Para esto, se utiliza el operador incremental Δ definido en la sección 3.2.5 el cual se aplica en la ecuación 3.21 para computar $\Delta V_{dc,i}$.

Por otro lado, en la ecuación 3.22 se aplica una expansión de Taylor en torno al punto medido/estimado $\{V_{dc,i}^F(k), \hat{V}_{dc,i}^R(k), P_{dc,i}(k)\}$, con el fin de simplificar el problema de optimización. Luego de lo anterior, el modelo lineal en tiempo discreto resultante es mostrado en las ecuaciones 3.24 y 3.25.

$$V_{dc,i}(k+1) = V_{dc,i}(k) + M_{dc,i} [P_{dc,i}(k+1) - P_{dc,i}(k)] + \Delta V_{dc,i}(k) \quad (3.24)$$

$$P_i(k+1) = P_i(k) + [V_{dc,i}(k+1) - V_{dc,i}(k)] G_i [2V_{dc,i}(k) - \hat{V}_{dc,i}^R(k)] \quad (3.25)$$

3.3.4. Controlador predictivo propuesto

La función de costo 3.26 consta de tres términos con sus respectivos pesos, donde cada uno representa un objetivo de control en la micro-red. El primer término representa la regulación de voltaje promedio, la cual es de carácter global para toda la micro-red, ya que dicho término está basado en predicciones compartidas por medio de la red de comunicación. El segundo término corresponde a la minimización de la acción de control requerida por cada GD_i . Por último, el tercer término permite lograr consenso de potencia activa de las unidades.

$$\begin{aligned}
J_{dc,i}(k) = & \min_{\Delta V_{dcs,i}(k), \dots, \Delta V_{dcs,i}(k+N_u-1)} \sum_{m=1}^{N_y} \lambda_{1i} (\bar{V}_{dc,i}(k+m) - V_{dc0})^2 \\
& + \sum_{m=1}^{N_u} \lambda_{2i} (\Delta V_{dcs,i}(k+m-1))^2 + \sum_{j \in \mathbb{P}_{dc}} \sum_{m=1}^{N_y} \lambda_{3i} a_{ij}(k) \left(\frac{P_i(k+m)}{P_{imax}} - \frac{P_j(k+m-\hat{\tau}_{ij})}{P_{jmax}} \right)^2
\end{aligned} \tag{3.26}$$

El conjunto de ecuaciones 3.27 representan los modelos de predicción utilizados por el controlador predictivo propuesto y determinan el comportamiento de la unidad en $(k+m)$, con $m \in \mathbb{Z}^+$. Estos modelos consideran la linealización realizada anteriormente en torno al punto medido k .

$$V_{dc,i}(k+m) = V_{dc,i}(k+m-1) + M_{dc,i}[P_i(k+m) - P_i(k+m-1)] + \Delta V_{dcs,i}(k+m-1) \tag{3.27a}$$

$$P_i(k+m) = P_i(k) + [V_{dc,i}(k+m) - V_{dc,i}(k)]G_i[2V_{dc,i}(k) - \hat{V}_{dc,i}^R(k)] \tag{3.27b}$$

Por último, el conjunto de ecuaciones presentadas en 3.28 corresponden a las restricciones operacionales de la micro-red. En específico, la ecuación 3.28a define el voltaje promedio el cual depende de los términos de la matriz de adyacencia a_{ij} . Esto permite incluir solo la información recibida para estimar y predecir los promedios, lo que permite robustez en las comunicaciones frente a fallas en la red y pérdida de datos. Por otro lado, las restricciones 3.28b y 3.28c corresponden a los límites mínimos y máximos de potencia activa entregada por la unidad i en cada paso de predicción, y variación de la acción de control respectivamente.

$$\bar{V}_{dc,i}(k+m) = \frac{V_{dc,i}(k+m) + \sum_{j \in \mathbb{P}_{dc}} a_{ij}(k)V_{dc,j}(k+m-\hat{\tau}_{ij})}{1 + \sum_{j \in \mathbb{P}_{dc}} a_{ij}(k)} \tag{3.28a}$$

$$P_{imin} \leq P_i(k+m) \leq P_{imax} \tag{3.28b}$$

$$\Delta V_{dcs,imin} \leq \Delta V_{dcs,i}(k+m-1) \leq \Delta V_{dcs,imax} \tag{3.28c}$$

3.3.5. Formulación programación cuadrática

A partir de lo mostrado en la subsección 3.3.4 se puede construir un problema de programación cuadrática (QP) para cada GD en la micro-red, en donde se define las siguientes matrices/vectores: H_i , F_i , A_i , B_i , $A_{eq,i}$, $B_{eq,i}$. Luego, el vector de salida \mathbb{X}_i , definido en 3.29, está conformado por el conjunto de variables predichas $\mathbb{X}_{p,i}$ y la secuencia de control óptima $\mathbb{X}_{\Delta,i}$ que son definidas en 3.29.

$$\begin{aligned}
J_{dc,i}(k) = & \underset{\mathbb{X}_i}{\text{mín}} \quad \frac{1}{2} \mathbb{X}_i^T H_i \mathbb{X}_i \\
& \text{s.a.} \quad A_i \mathbb{X}_i \leq B_i \\
& \quad \quad A_{eq,i} \mathbb{X}_i = B_{eq,i} \\
& \quad \quad \mathbb{X}_i = \{\mathbb{X}_{p,i}, \mathbb{X}_{\Delta,i}\} \\
& \quad \quad \mathbb{X}_{p,i} = \{\bar{V}_{dc,i}(k+m), V_{dc,i}(k+m), P_i(k+m)\}_{k=1}^{N_y} \\
& \quad \quad \mathbb{X}_{\Delta,i} = \{\Delta V_{dcs,i}(k+m-1)\}_{k=1}^{N_u}
\end{aligned} \tag{3.29}$$

La estabilidad del controlador propuesto en esta sección no es abordada, ya que no está dentro de los alcances de esta tesis, sin embargo, tal como se mencionó en 3.2.7, algunas condiciones para asegurar estabilidad es que se garantiza una condición inicial que sea factible, para lo cual se procede a activar el DMPC sólo cuando la micro-red opera con una tensión cercana a V_{dc0} . Además, se asegura que el sistema dentro de los límites físicos en todo el horizonte de predicción (ecuaciones 3.28a a 3.28c).

3.4. Propuesta DMPC secundario aplicado a micro-redes AC/DC con controlador integral en el ILC

El controlador predictivo utilizado en la sección 3.2 y el propuesto en la sección 3.3 permiten restaurar las variables de control de cada micro-red AC y DC a sus valores nominales, mientras se logra el consenso de potencia activa y reactiva proporcional entre las unidades del lado AC y el consenso de potencia proporcional entre las unidades del lado DC.

Además de lo anterior, también se tiene como objetivo que las unidades del lado AC y del lado DC estén comunicadas, con el fin que puedan entregar la misma potencia activa a razón de su potencia máxima. Para lograr esto, es necesario conectar físicamente ambas micro-redes, para lo cual una solución es usar un interlinking converter (ILC). Sin embargo, este ILC necesita una consigna de potencia para que se pueda efectuar la transferencia de potencia activa entre ambas micro-redes y se logre el objetivo antes mencionado.

Para cumplir con este objetivo se procede a diseñar un controlador PI para el ILC, el cual está inspirado en el trabajo realizado en [39]. Este último está basado en un controlador DAPI definido en la ecuación 3.30, donde η_l representa la ganancia integral para el ILC_l , y $l \in \mathbb{P}_{ILC}$. En este caso el consenso es llevado a cabo en todos los GDs con un enlace de comunicación directa con el ILC_l , representado por los términos de adyacencia a_{il} y a_{jl} para los GDs-ac ($i \in \mathbb{P}_{ac}$) y GDs-dc ($j \in \mathbb{P}_{dc}$), respectivamente. Notar que en este caso, la salida del controlador, $P_{ILC_l}^*$, es un set point relacionado a la potencia activa transferida por el ILC, la cual, como convención, es definida desde el lado DC al lado AC ($P_{ILC_l}^* > 0$).

$$\eta_l \frac{dP_{ILC_l}^*}{dt} = \sum_{i \in \mathbb{P}_{ac}} \sum_{j \in \mathbb{P}_{dc}} a_{il}(t) a_{jl}(t) \left(\frac{P_i(t)}{P_{imax}} - \frac{P_j(t)}{P_{jmax}} \right) \tag{3.30}$$

3.5. Propuesta DMPC secundario aplicado a micro-redes AC/DC con controlador predictivo en el ILC

Esta propuesta consiste en un controlador predictivo centralizado que permite calcular la acción de control dada al ILC, que en este caso es la consigna de potencia activa. Para esto, en el problema de optimización se utiliza dos tipos de modelos para cada unidad de la micro-red híbrida, los cuales se diferencian en que uno es utilizado para las unidades del lado AC, comunicadas con el ILC, y el otro para las unidades del lado DC comunicadas con el ILC. El primero, el cual se muestra en la ecuación 3.31, permite calcular la potencia activa de la unidad i del lado AC en el instante k como la suma de la potencia activa de la misma unidad en el instante anterior más el aporte de potencia activa transferida por el ILC. De forma análoga, el segundo modelo (ecuación 3.32) permite calcular la potencia activa de la unidad j del lado DC en el instante k como la diferencia entre la potencia activa de la misma unidad en el instante anterior menos y aporte de potencia activa transferida por el ILC. El signo positivo y negativo del segundo término de las ecuaciones 3.31 y 3.32, respectivamente, se debe a que el primer modelo considera que la micro-red AC recibe potencia activa proveniente por el ILC desde el lado DC, mientras que el segundo considera que la micro-red DC entrega potencia activa, por medio del ILC, hacia el lado AC, o viceversa. El esquema de control propuesto se muestra en la figura 3.3.

$$P_i(k) = P_i(k-1) + P_{ILC_{i,i}}(k-1) \quad \forall i \in \mathbb{P}_{ac} \quad (3.31)$$

$$P_j(k) = P_j(k-1) - P_{ILC_{i,j}}(k-1) \quad \forall j \in \mathbb{P}_{dc} \quad (3.32)$$

Las ecuaciones presentadas en 3.31 y 3.32 son modelos discretos donde $k = nT_{sec}$, $n \in \mathbb{Z}^+$, y T_{sec} es el período de muestreo usado en el nivel de control secundario. Por otro lado, para eliminar el error en estado estacionario se aplica un integrador a la salida del controlador. Para esto, en 3.9 se define el operador incremental Δ , el cual se aplica en las ecuaciones 3.31 y 3.32 para computar $\Delta P_{ILC_{i,i}}$ y $\Delta P_{ILC_{i,j}}$, cuyos modelos resultantes se muestran en 3.33c y 3.34c respectivamente.

$$\Delta P_i(k) = \Delta P_i(k-1) + \Delta P_{ILC_{i,i}}(k-1) \quad (3.33a)$$

$$P_i(k) - P_i(k-1) = P_i(k-1) - P_i(k-2) + \Delta P_{ILC_{i,i}}(k-1) \quad (3.33b)$$

$$P_i(k) = 2P_i(k-1) - P_i(k-2) + \Delta P_{ILC_{i,i}}(k-1) \quad \forall i \in \mathbb{P}_{ac} \quad (3.33c)$$

$$\Delta P_j(k) = \Delta P_j(k-1) - \Delta P_{ILC_{i,j}}(k-1) \quad (3.34a)$$

$$P_j(k) - P_j(k-1) = P_j(k-1) - P_j(k-2) - \Delta P_{ILC_{i,j}}(k-1) \quad (3.34b)$$

$$P_j(k) = 2P_j(k-1) - P_j(k-2) - \Delta P_{ILC_{i,j}}(k-1) \quad \forall j \in \mathbb{P}_{dc} \quad (3.34c)$$

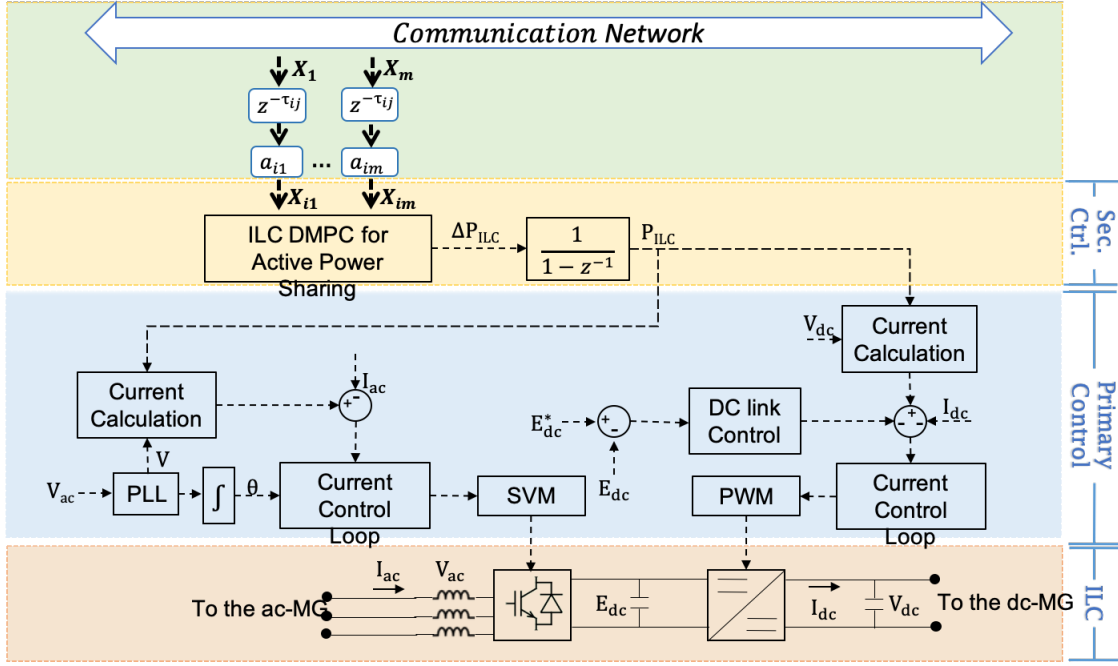


Figura 3.3: Diagrama de control del Interlinking Converter.

La función de costo 3.35 consta de dos términos con sus respectivos pesos, donde cada uno representa un objetivo de control. El primer término corresponde a la penalización de la variación de la acción de control ΔP_{ILC_i} , con el fin que ésta tenga una trayectoria más suave, mientras que el segundo término representa el consenso de potencia activa normalizada entre las unidades del lado AC y las del lado DC que estén comunicadas con el ILC. Esto último se modela por medio de los términos de la matriz de adyacencia $a_{il}(k)$ y $a_{jl}(k)$, los cuales representan la comunicación entre la unidad i y j con el ILC, respectivamente.

$$\begin{aligned}
 J_{ILC,l}(k) = & \min_{\Delta P_{ILC_l}(k), \dots, \Delta P_{ILC_l}(k+N_u-1)} \sum_{k=1}^{N_u} \lambda_{1l} (\Delta P_{ILC_l}(k+m-1))^2 + \\
 & \sum_{i \in \mathbb{P}_{ac}} \sum_{j \in \mathbb{P}_{dc}} \sum_{k=1}^{N_y} \lambda_{2l} a_{il}(k) a_{jl}(k) \left(\frac{P_i(k+m-\hat{\tau}_{il})}{P_{imax}} - \frac{P_j(k+m-\hat{\tau}_{jl})}{P_{jmax}} \right)^2
 \end{aligned} \quad (3.35)$$

A pesar de que podría considerarse una red enmallada para comunicar todas las unidades en la micro-red tales como los GDs-ac, GDs-dc y los ILCs, las ecuaciones 3.15, 3.26 y 3.35 se definen considerando una red segmentada. Esto significa que los GDs-ac y GDs-dc comparten información solo entre sus pares usando redes dedicadas, en donde al menos un GD-ac y un GD-dc están conectados a cada ILC en la micro-red. Esto satisface el principio de grafo conectado requerido para lograr el consenso global [60], mientras que el tráfico total a través de la red de comunicación, y sus problemas colaterales, son reducidos [61].

El conjunto de ecuaciones 3.36, 3.37 y 3.38 representan los modelos de predicción utilizados por el controlador predictivo propuesto. En específico, las ecuaciones 3.36 y 3.37 corresponden a la generalización a m pasos de las ecuaciones 3.33c y 3.34c respectivamente, con la diferencia,

que la primera está asociada a una unidad AC, lo cual está plasmado en el signo positivo del término $\Delta P_{ILC,i}$, mientras que la segunda está asociada a una unidad DC, lo cual se relaciona con el signo negativo del término $\Delta P_{ILC,j}$. Por otro lado, la ecuación 3.38 corresponde al balance de las variaciones de los términos $\Delta P_{ILC,i}$ y $\Delta P_{ILC,j}$ entre el lado AC y el DC, lo cual significa que la variación total de la potencia activa transferida desde el *ILC* al lado AC debe ser igual a la variación total de la potencia activa transferida desde el lado DC al *ILC*.

$$P_i(k+m) = 2P_i(k+m-1) - P_i(k+m-2) + \Delta P_{ILC,i}(k+m-1) \quad \forall i \in \mathbb{P}_{ac} \quad (3.36)$$

$$P_j(k+m) = 2P_j(k+m-1) - P_j(k+m-2) - \Delta P_{ILC,j}(k+m-1) \quad \forall j \in \mathbb{P}_{dc} \quad (3.37)$$

$$\begin{aligned} \Delta P_{ILC_i}(k+m-1) &= \sum_{i \in \mathbb{P}_{ac}} a_{il}(k) \Delta P_{ILC_{l,i}}(k+m-1) \\ &= \sum_{j \in \mathbb{P}_{dc}} a_{jl}(k) \Delta P_{ILC_{l,j}}(k+m-1) \quad \forall m = 1 \dots N_u \end{aligned} \quad (3.38)$$

Por último, en 3.39, 3.40 y 3.41 se añaden restricciones de desigualdad para la variación de la acción de control resultante, con el fin que permanezcan dentro de un rango específico.

$$P_{ILC_{l,min}} - P_{ILC_l}(k-1) \leq \Delta P_{ILC_l}(k+m-1) \quad \forall m = 1 \dots N_u \quad (3.39)$$

$$\Delta P_{ILC_l}(k+m-1) \leq P_{ILC_{l,max}} - P_{ILC_l}(k-1) \quad \forall m = 1 \dots N_u \quad (3.40)$$

$$\Delta P_{ILC_{l,min}} \leq \Delta P_{ILC_l}(k+m-1) \leq \Delta P_{ILC_{l,max}} \quad \forall m = 1 \dots N_u \quad (3.41)$$

3.5.1. Formulación programación cuadrática

A partir de la función de costo y restricciones mostrados en la sección 3.5, se puede construir un problema de programación cuadrática (QP) para controlador del ILC, en donde se define las siguientes matrices/vectores: H_l , F_l , A_l , B_l , $A_{eq,l}$, $B_{eq,l}$. Luego, el vector de salida \mathbb{X}_l , definido en 3.42, está conformado por el conjunto de variables predichas $\mathbb{X}_{p,l}$ y la secuencia de control óptima $\mathbb{X}_{\Delta,l}$ que son definidas en 3.42. Cabe destacar que la estabilidad del controlador propuesto en esta sección no es abordada, ya que no está dentro de los alcances de esta tesis.

$$\begin{aligned}
J_{ILC,l}(k) = & \underset{\mathbb{X}_l}{\text{mín}} \quad \frac{1}{2} \mathbb{X}_l^T H_l \mathbb{X}_l \\
\text{s.a.} \quad & A_l \mathbb{X}_l \leq B_l \\
& A_{\text{eq},l} \mathbb{X}_l = B_{\text{eq},l} \\
& \mathbb{X}_l = \{\mathbb{X}_{p,l}, \mathbb{X}_{\Delta,l}\} \\
\mathbb{X}_{p,l} = & \{P_i(k+m), P_j(k+m)\}_{m=1}^{N_y} \quad \forall i \in \mathbb{P}_{ac}; \forall j \in \mathbb{P}_{dc} \\
\mathbb{X}_{\Delta,l} = & \{\Delta P_{ILC,l}(k+m-1)\}_{m=1}^{N_u}
\end{aligned} \tag{3.42}$$

3.6. Discusión

En este capítulo se presentó la estrategia DMPC propuesta aplicada a nivel secundario en micro-redes híbridas AC/DC. La propuesta en sí consta de una estrategia DMPC aplicada a nivel secundario en una micro-red DC y una estrategia MPC aplicado a un *Interlinking Converter* (ILC), en cambio, la estrategia DMPC aplicada a nivel secundario en una micro-red AC es utilizada a partir del trabajo presentado en [50] y [51].

La primera propuesta es una estrategia DMPC secundario aplicada a micro-redes DC, la cual consiste en un controlador predictivo, propio de cada unidad, con un horizonte de predicción y control definidos. Este controlador consta de un problema de optimización, cuya función objetivo está compuesta por tres términos penalizados por pesos sintonizados heurísticamente, los cuales corresponden a un *trade-off* entre los tres objetivos de control. El primer término tiene como objetivo la regulación de voltaje promedio, el segundo la variación suave de la acción de control y el último el consenso de potencia proporcional entre las unidades del lado DC, el cual depende de los términos de la matriz de adyacencia asociada a la red de comunicaciones de la micro-red. Por otro lado, los modelos de predicción a m pasos se obtienen a partir de la discretización de la ecuación droop tensión/potencia y la ecuación de transferencia de potencia antes linealizada. Por último, se añaden restricciones operacionales correspondientes al cálculo de la tensión promedio y límites máximos y mínimos de la potencia entregada por la unidad de generación y la variación de la acción de control. La solución del problema de optimización, obtenida por medio de programación cuadrática (QP), es un vector de predicciones cuyo primer elemento es el que es aplicado e integrado para obtener la variable de control secundario, la cual es sumada al control primario de la unidad.

La siguiente propuesta es una estrategia MPC aplicada a un *Interlinking Converter* (ILC). Este controlador consta de un problema de optimización, cuya función objetivo esta compuesta por dos términos con horizontes de control y predicción definidos, los cuales están ponderados por pesos sintonizados heurísticamente y que son producto de un *trade-off* entre los dos objetivos de control. El primer término tiene como objetivo suavizar la variación de la acción de control, en cambio, el segundo permite lograr el consenso de potencia proporcional entre las unidades del lado AC y del lado DC, el cual depende de los términos de la matriz de adyacencia asociada a la red de comunicación entre las unidades de la micro-red híbrida y el ILC. Por otro lado, los modelos de predicción a m pasos se obtienen a partir de las ecuaciones 3.31 y 3.32 que tienen relación al balance de potencia activa en la micro-red híbrida. Por último, se añaden restricciones operacionales correspondientes a los límites máximos y mínimos de capacidad de potencia del ILC y la variación de la acción de control. La solución

del problema de optimización, obtenida por medio de programación cuadrática (QP), es un vector de predicciones cuyo primer elemento es el que es aplicado e integrado para obtener la consigna de potencia activa dada al ILC.

Por último, también se utiliza la estrategia DMPC secundario aplicada a micro-redes AC que fue realizada en [50] y [51]. Este controlador, propio de cada unidad del lado AC, permite restaurar la frecuencia y tensión promedio, así como lograr el consenso de potencia activa y reactiva proporcionales entre las unidades de la micro-red AC.

Con respecto a las ventajas de la estrategia DMPC secundario propuesta para micro-redes híbridas, primero que todo, cabe señalar que, al estar basado en un problema de optimización, permite obtener una solución óptima e incluir restricciones operacionales. Además, al consistir en un esquema de horizonte deslizante, permite compensar retardos en la red de comunicación, esto también sujeto al período de muestreo del controlador y la estimación del retardo $\hat{\tau}_{ij}$. Por otro lado, como está basado en un esquema distribuido, permite robustez frente a cambios eléctricos y de comunicaciones, así como lidiar con problemas asociados a este último aspecto, tales como la latencia o pérdida de datos.

No obstante, también esta propuesta tiene ciertas desventajas como que se debe determinar los modelos fenomenológicos del sistema a controlar, ya que estos son utilizados en el problema de optimización. Además, el diseño del controlador es más complejo en comparación a otras estrategias, como las basadas en el control proporcional-integral (PI) y, por último, los pesos que permiten penalizar los términos de la función objetivo de cada controlador son difíciles de sintonizar y esto se complejiza aún más al aumentar el número de términos. Además, a pesar que los valores finales de los pesos son producto de un *trade-off* entre los objetivos de control, primero se prioriza el término asociado a la variación de la acción de control y luego un *trade-off* entre los demás objetivos de control, con el fin que la acción de control no tenga cambios bruscos y así no conduzca a un mal desempeño del controlador.

Luego de haber diseñado y determinado las ventajas y desventajas de la estrategia DMPC secundario propuesta para micro-redes híbridas, en los capítulos 4 y 5 se presentan los resultados por simulación y obtenidos de manera experimental, respectivamente, a partir de dicha estrategia con el fin de evaluar su desempeño.

Capítulo 4

Resultados por simulación

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos por simulación para validar la estrategia DMPC propuesta en el capítulo 3. Las simulaciones son desarrolladas en Matlab/Simulink y además, dentro de este entorno de programación, se utiliza Plects Blockset con el fin de simular las componentes eléctricas de la micro-red.

Este capítulo está organizado de la siguiente forma: la sección 4.1 muestra los resultados obtenidos a partir de la estrategia DMPC aplicada a una micro-red DC. Para esto, en las subsecciones 4.1.1, 4.1.2 y 4.1.3 se muestran, respectivamente, los resultados de las siguientes pruebas realizadas: impacto y desconexión de cargas, capacidad plug-and-play, y respuesta del controlador frente a retardo en la red de comunicación. Por otra parte, la sección 4.2 muestra los resultados obtenidos a partir de la estrategia DMPC aplicada a una micro-red híbrida AC/DC, considerando el controlador predictivo del ILC definido en 3.5. En las subsecciones 4.2.1, 4.2.2 y 4.2.3 se muestran, respectivamente, los resultados de las siguientes pruebas realizadas: impacto y desconexión de cargas, capacidad plug-and-play, y respuesta del controlador frente a retardo en la red de comunicación. Por último, en la sección 4.3 se presenta una discusión de los resultados obtenidos en las secciones anteriores analizando las ventajas y desventajas de la estrategia DMPC propuesta.

4.1. DMPC secundario aplicado a Micro-redes DC

En esta sección se presentan los resultados obtenidos al aplicar la estrategia de control DMPC propuesta en una micro-red DC, cuya topología se puede observar en la figura 4.1. Esta topología consta de una micro-red DC compuesta por tres unidades de generación distribuida con sus respectivos filtros LC a la salida. Además, a la salida de las unidades (después del filtro), se conecta una resistencia de acople ($R_{out,i}$) y, luego de ésta, una carga de tipo resistiva. Finalmente, para conectar eléctricamente las unidades se consideran líneas de transmisión de naturaleza resistiva. Por último, esta micro-red consta de una red de comunicaciones, construida a partir de fibra óptica, en donde todas las unidades de la micro-red están comunicadas entre sí de forma bidireccional.

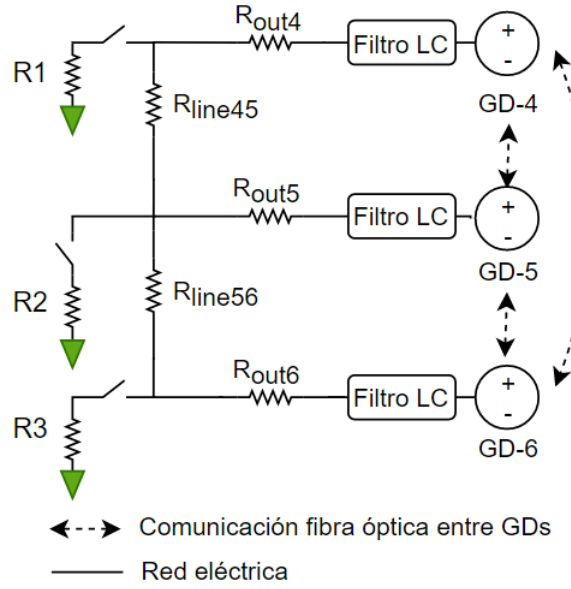


Figura 4.1: Topología de la micro-red DC por simulación

A partir de la red de comunicaciones mencionada anteriormente, a continuación se define una matriz de adyacencia de dimensiones de 3 x 3 que representa los enlaces de comunicación entre las unidades tal como se abordó en la sección 3.1.

$$A = \begin{pmatrix} a_{44} & a_{45} & a_{46} \\ a_{54} & a_{55} & a_{56} \\ a_{64} & a_{65} & a_{66} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 0 \end{pmatrix}$$

Por otro lado, en la tabla 4.1 se muestran los parámetros eléctricos utilizados en la micro-red DC simulada, en cambio, en la tabla 4.2 se muestran los parámetros correspondientes a los controladores primarios de dicha micro-red. Por último, en la tabla 4.3 se muestran los parámetros de sintonía de los controladores secundarios de los GDs-dc. La sintonización de estos parámetros se realizó de manera heurística, en donde primero se procedió a ajustar el peso asociado a la variación de la acción de control de cada controlador, con el fin que ésta tenga una respuesta suave. Luego, se realizó un '*trade-off*' al sintonizar los pesos asociados a la regulación de la tensión promedio y consenso de potencia proporcional a las capacidades máximas de las unidades, de manera que el tiempo de establecimiento de ambos fuese de aproximadamente 5s.

Tabla 4.1: Parámetros eléctricos utilizados en la micro-red DC.

Parámetro	Valor	Unidades	Descripción
L_{fi}	0.85	mH	Inductancia de filtro a la salida del convertor i
C_{fi}	70	μ F	Capacitancia de filtro a la salida del convertor i
$R_{out4}, R_{out5}, R_{out6}$	0.67, 0.94, 0.47	Ω	Resistencias de acople entre la salida de los GDs-dc y la micro-red DC
R_{line45}, R_{line56}	0.5, 0.78	Ω	Líneas de transmisión micro-red DC
R_1, R_2, R_3	1.54, 1.06, 1.06	kW	Cargas locales de la micro-red DC
P_4, P_5, P_6	2.0, 1.5, 1.5	KW	Potencia máxima de salida de los GDs-dc
V_{dc0}	130	V	Voltaje nominal de la micro-red DC

Tabla 4.2: Parámetros de los controladores primarios de la micro-red DC.

Parámetro	Valor	Unidades	Descripción
T_s	0.625	μ S	Tiempo de muestreo para los controladores del nivel primario
m_{dc1}	0.005	V/KW	Pendiente droop p-V del GD-4
m_{dc2}	0.008	V/KW	Pendiente droop p-V del GD-5
m_{dc3}	0.0133	V/KW	Pendiente droop p-V del GD-6

Tabla 4.3: Parámetros de sintonía controladores secundarios de la micro-red DC.

Parámetro	Valor	Unidades	Descripción
T_{sec}	0.1	s	Tiempo de muestreo controladores del nivel secundario
N_y	10	-	Horizonte de predicción
N_u	10	-	Horizonte de control
$\lambda_{41}, \lambda_{51}, \lambda_{61}$	7E1, 7E1, 7E1	$[1/V]^2$	Peso asociado al error de voltaje promedio de los GDs-dc
$\lambda_{42}, \lambda_{52}, \lambda_{62}$	8E2, 8E2, 8E2	$[1/V]^2$	Peso asociado a la acción de control de voltaje de los GDs-dc
$\lambda_{43}, \lambda_{53}, \lambda_{63}$	1E3, 1E3, 1E3	-	Peso asociado al consenso de potencia activa de los GDs-dc

Para validar la estrategia DMPC propuesta, en las subsecciones 4.1.1, 4.1.2 y 4.1.3 se muestran los resultados de diversas pruebas realizadas tales como: impacto y desconexión de cargas, capacidad Plug-and-Play, y respuesta del controlador frente a retardo en la red de comunicación.

4.1.1. Impactos de carga

En este escenario se muestran los resultados que permiten validar por simulación la estrategia DMPC propuesta aplicada a una micro-red DC frente impactos de carga. Para esto se simularon distintos casos en distintos instantes de tiempo tal como se muestra en la tabla 4.4.

Tabla 4.4: Eventos realizados durante la prueba de impacto y desconexión de cargas en la micro-red DC.

Tiempo [s]	Evento
0	Conexión y sincronización de los GDs-dc. Conexión de controladores primarios.
1	Impacto de carga $R_1=1.54$ kW
10	Conexión de controladores secundarios de la micro-red DC
20	Impacto de carga $R_2=1.06$ kW
30	Impacto de carga $R_3=1.06$ kW
40	Desconexión de carga $R_3=1.06$ kW
50	Desconexión de carga $R_2=1.06$ kW

En las figuras 4.2(a) y 4.2(b) se presentan los resultados por simulación para el caso de impactos de carga. A los $t=10$ s se activan los controladores secundarios DMPC de las tres unidades que componen la micro-red DC para lo cual se observa que todas ellas logran el consenso de potencia activa a razón de sus capacidades máximas, ya que convergen a un mismo valor. Como también, se observa que la tensión promedio de las unidades se restaura a su valor nominal ($V=130$ V).

A los $t=20$ s se efectúa un impacto de carga $R_2 = 1,06$ kW del cual se observa que la unidad que se ve más afectada en el transitorio es GD_5 , ya que el impacto ocurre a la salida de dicha unidad. No obstante, se cumplen todos los objetivos de control para lo cual el tiempo de estabilización es de aproximadamente 6 segundos. De igual manera, en los eventos restantes de conexión y desconexión de cargas, los controladores secundarios de las unidades logran el consenso de potencia activa y la restauración de la tensión promedio a su valor nominal, con un tiempo de estabilización de aproximadamente 6 segundos.

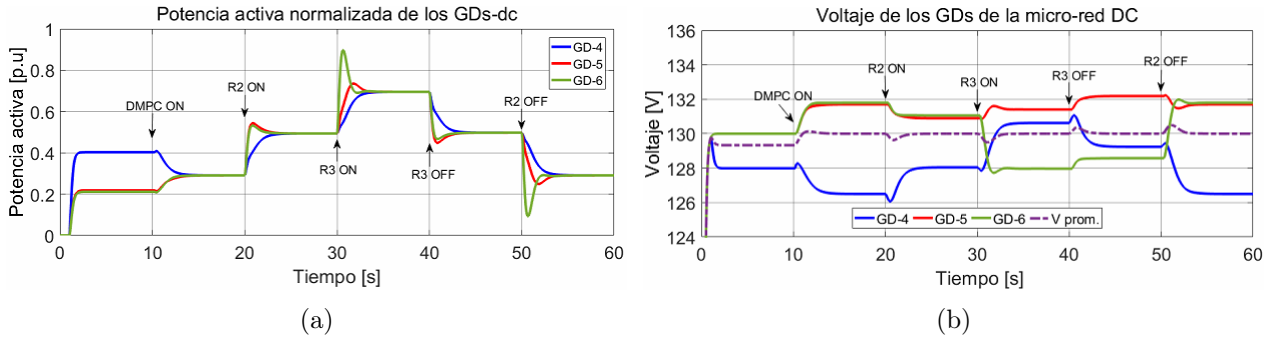


Figura 4.2: Resultados por simulación del DMPC secundario aplicado a una micro-red DC para la prueba de impactos de carga: (a) Potencia activa normalizada entregada por los GDs-dc. (b) Voltaje de los GDs-dc.

4.1.2. Capacidad Plug and Play

En este escenario se muestran los resultados que permiten validar por simulación la estrategia DMPC propuesta aplicada a una micro-red DC frente a la capacidad *plug-and-play* de dicha micro-red. Para esto se simularon distintos casos en distintos instantes de tiempo tal como se muestra en la tabla 4.5.

Tabla 4.5: Eventos realizados durante la prueba de capacidad Plug and Play en la micro-red DC.

Tiempo [s]	Evento
0	Conexión y sincronización de los GDs-dc. Conexión de controladores primarios.
1	Impacto de carga $R_1=1.54$ kW
10	Conexión de controladores secundarios de la micro-red DC
20	Desconexión de GD-5 de la micro-red DC
30	Impacto de carga $R_2=1.06$ kW
40	Desconexión de carga $R_2=1.06$ kW
50	Reconexión de GD-5 de la micro-red DC

En las figuras 4.3(a) y 4.3(b) se presentan los resultados por simulación para el caso de capacidad Plug and Play de la micro-red DC. A los $t=10$ s se activan los controladores secundarios de las tres unidades que componen la micro-red DC. A los $t=20$ s, el GD-5 se desconecta de la micro-red, por lo que las demás unidades compensan la potencia que dejó de entregar dicha unidad y logran el consenso de potencia activa en un tiempo de aproximadamente siete segundos. En cuanto a la regulación de tensión, se observa que la tensión promedio se restaura a su valor nominal y que la tensión local de la unidad desconectada se regula a su valor nominal, ya que esta unidad está en vacío. A los $t=30$ s y $t=40$ s se procede a conectar y desconectar la carga $R_2 = 1,06$ kW, mientras GD-5 sigue desconectado, no obstante, se observa que las unidades conectadas logran el consenso de potencia activa y la tensión promedio se restaura a su valor nominal. Finalmente, a los $t=50$ s se procede a reconectar GD-5 a la

micro-red para lo cual se sigue cumpliendo los dos objetivos de control antes mencionados, con un tiempo de estabilización de 6 segundos aproximadamente.

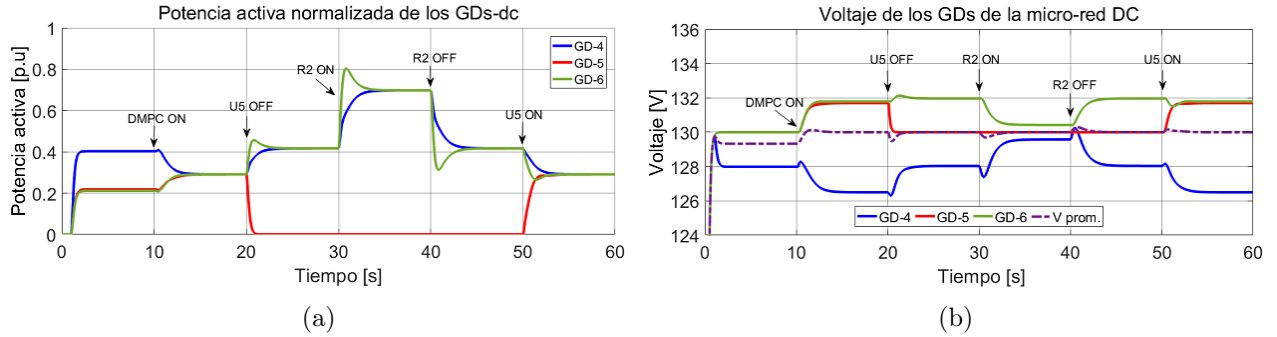


Figura 4.3: Resultados por simulación del DMPC secundario aplicado a una micro-red DC para la prueba de capacidad Plug and Play: (a) Potencia activa normalizada entregada por los GDs-dc. (b) Voltaje de los GDs-dc.

4.1.3. Retardo en la red de comunicación

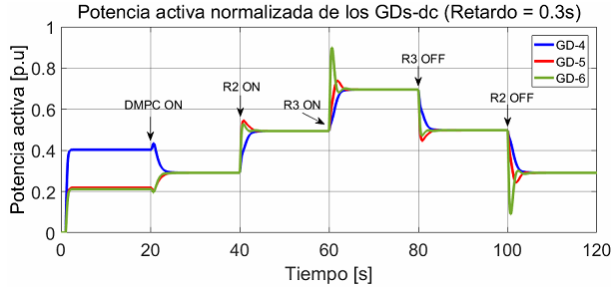
En este escenario se muestran los resultados que permiten validar por simulación la estrategia DMPC propuesta aplicada a una micro-red DC frente a retardos en la red de comunicación. Para esto se simularon distintos casos en distintos instantes de tiempo tal como se muestra en la tabla 4.6.

Tabla 4.6: Eventos realizados durante la prueba de retardo en la red de comunicación en la micro-red DC. Los retardos considerados son de 0.3s, 0.5s y 0.8s.

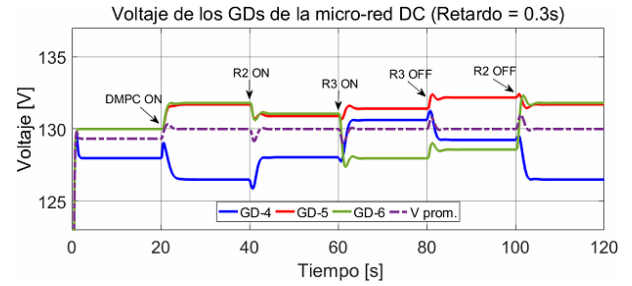
Tiempo [s]	Evento
0	Conexión y sincronización de los GDs-dc. Conexión de controladores primarios.
1	Impacto de carga $R_1=1.54$ kW
20	Conexión de controladores secundarios de la micro-red DC
40	Impacto de carga $R_2=1.06$ kW
60	Impacto de carga $R_3=1.06$ kW
80	Desconexión de carga $R_3=1.06$ kW
100	Desconexión de carga $R_2=1.06$ kW

En las figuras 4.4 y 4.5 se presentan los resultados por simulación para el caso de retardo en la red de comunicación, considerando retardos de 0.3s, 0.5s y 0.8s en toda la micro-red. A los $t=20$ s se activan los controladores secundarios de las tres unidades que componen la micro-red DC. Luego, los siguientes eventos corresponden a los mismos impactos y desconexiones de cargas que en el caso base, para lo cual se observa que, a medida que aumenta el retardo en la red de comunicación, el transitorio de potencia activa normalizada y tensión promedio de las unidades es más oscilatorio, aumentando el tiempo de estabilización de dichas variables, de hecho, al considerar un retardo de 0.3s, el tiempo de estabilización es de

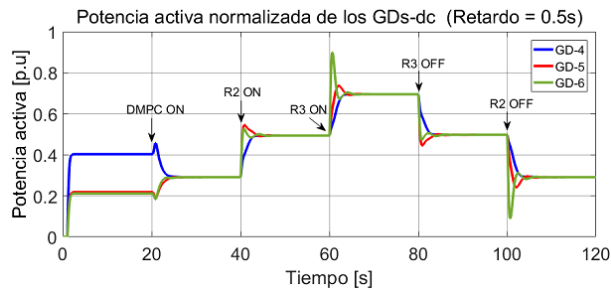
aproximadamente 6 segundos, mientras que al considerar un retardo de 0.8s, éste aumenta a 12 segundos aproximadamente. A pesar de lo anterior, el DMPC logra el consenso de potencia activa entre las unidades, así como, la restauración de la tensión promedio a su valor nominal, esto compensando el retardo asociado.



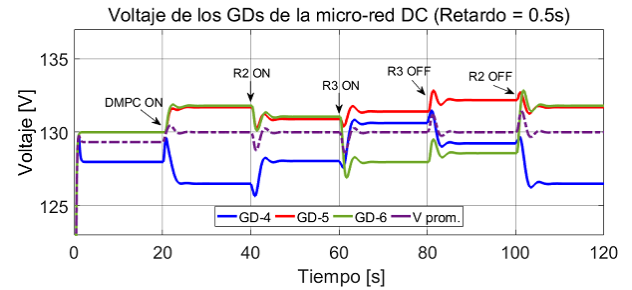
(a)



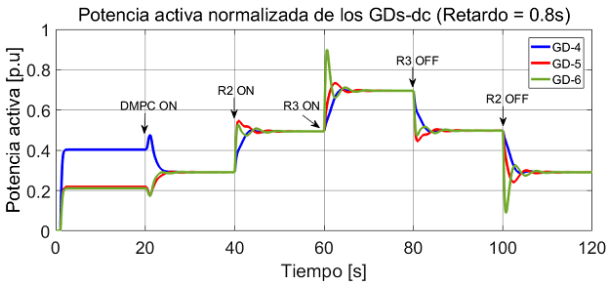
(a)



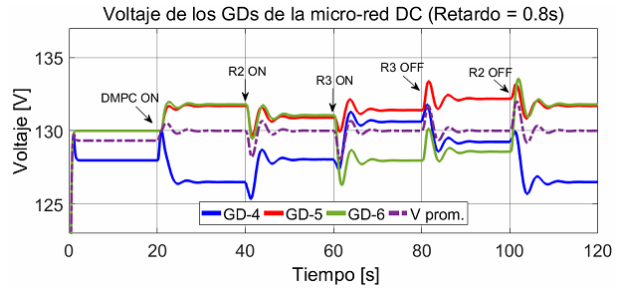
(b)



(b)



(c)



(c)

Figura 4.4: Consenso de potencia activa entre las unidades de la micro-red DC para el caso de retardos en la red de comunicación: (a) $\tau_{ij} = 0,3s$. (b) $\tau_{ij} = 0,5s$. (c) $\tau_{ij} = 0,8s$.

Figura 4.5: Tensión de los GDs de la micro-red DC para el caso de retardos en la red de comunicación: (a) $\tau_{ij} = 0,3s$. (b) $\tau_{ij} = 0,5s$. (c) $\tau_{ij} = 0,8s$.

4.2. DMPC secundario aplicado a Micro-redes híbridas AC/DC con un ILC

En esta sección se presentan los resultados obtenidos por simulación al aplicar la estrategia de control DMPC propuesta en una micro-red híbrida AC/DC, cuya topología se puede

observar en la figura 4.6. Esta topología consta de dos micro-redes, una AC y una DC, cada una compuesta por tres unidades de generación distribuida con sus respectivos filtros LC a la salida. En el caso de la micro-red AC, a la salida de las unidades (después del filtro) se conecta una inductancia de acople ($L_{out,i}$) y luego de ésta una carga de tipo resistiva. Finalmente, para conectar eléctricamente las unidades, se consideran líneas de transmisión de naturaleza inductiva. De forma análoga, en la micro red DC se tiene la misma topología solo que, en vez de inductancias de acople y de línea, se tienen resistencias de acople y de línea. Por otro lado, para conectar eléctricamente y permitir el intercambio de potencia entre ambas micro-redes, se utiliza un ILC (con sus respectivos filtros en cada lado) al cual le llega una consigna de potencia activa a partir del controlador predictivo propuesto, con el fin de cumplir con el consenso de potencia activa proporcional entre todas las unidades de la micro-red híbrida. Por último, la micro-red híbrida consta de una red de comunicaciones, construida a partir de fibra óptica, en donde todas las unidades de cada micro-red (AC y DC) están comunicadas entre sí de forma bidireccional. Además, para el consenso de potencia activa entre ambas micro-redes se considera la comunicación de todas las unidades de los lados AC y DC con el ILC.

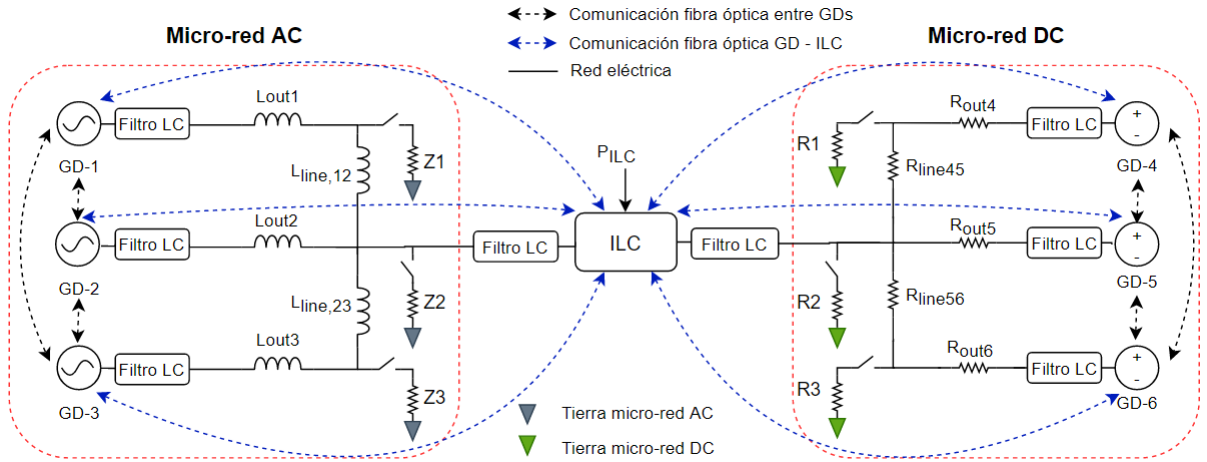


Figura 4.6: Topología de la micro-red híbrida por simulación

A partir de la red de comunicaciones mencionada anteriormente, la matriz de adyacencia utilizada es una matriz cuadrada con dimensiones de 7×7 la cual es de la siguiente forma:

$$A = \begin{pmatrix} AC_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & ILCac_{3 \times 1} \\ 0_{3 \times 3} & DC_{3 \times 3} & ILCdc_{3 \times 1} \\ ILCac_{3 \times 1} & ILCdc_{3 \times 1} & 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \end{pmatrix}$$

Por otro lado, las tablas que se presentan a continuación, muestran los parámetros utilizados en las simulaciones. Específicamente, la tabla 4.7 muestra los parámetros eléctricos

utilizados en las micro-redes AC y DC, en cambio, en la tabla 4.8 se muestran los parámetros correspondientes a los controladores primarios de ambas micro-redes. Por último, en la tabla 4.9 se muestran los parámetros de sintonía de los controladores secundarios de los GDs-ac y GDs-dc. La sintonización de estos parámetros se realizó de manera heurística en el controlador de cada unidad y en el controlador del ILC. Con respecto al controlador de cada unidad de la micro-red AC, primero se procedió a ajustar los pesos asociados a la variación de la acción de control de frecuencia y tensión promedio, con el fin que éstas tengan una respuesta suave. Luego, se realizó un '*trade-off*' al sintonizar los pesos asociados a la regulación de frecuencia y consenso de potencia activa proporcional a las capacidades máximas de las unidades y, de igual forma, un '*trade-off*' al sintonizar los pesos asociados a la regulación de tensión promedio y consenso de potencia reactiva proporcional a las capacidades máximas de las unidades, sujeto a que el tiempo de establecimiento de estas variables fuesen similares (menor a 5s). De manera similar, en el controlador de cada unidad de la micro-red DC se procedió a ajustar primero el peso asociado a la variación de la acción de control y luego se realizó un '*trade-off*' al ajustar el peso asociado a la regulación de tensión promedio y consenso de potencia proporcional a las capacidades máximas de las unidades. Por último, con respecto al controlador del ILC, primero se procedió a ajustar el peso asociado a la variación de la acción de control con el fin que ésta tenga una respuesta suave y luego se ajustó el peso asociado al consenso de potencia activa de las unidades comunicadas con el ILC.

Tabla 4.7: Parámetros eléctricos utilizados en la micro-red híbrida.

Parámetro	Valor	Unidades	Descripción
L_{fi}	0.85	mH	Inductancia de filtro a la salida del convertor i
C_{fi}	70	μ F	Capacitancia de filtro a la salida del convertor i
L_i	2.5	mH	Inductancia de acople entre la salida del GD-ac y la micro-red AC
$L_{line,i}$	2.5	mH	Línea de transmisión micro-red AC
$R_{out4}, R_{ou5}, R_{out6}$	0.67,0.94,0.47	Ω	Resistencias de acople entre la salida de los GDs-dc y la micro-red DC
R_{line45}, R_{line56}	0.5,0.78	Ω	Líneas de transmisión micro-red DC
Z_1, Z_2, Z_3	1.02,1.50,0.64	kW	Cargas locales de la micro-red AC
R_1, R_2, R_3	1.54,1.06,1.06	kW	Cargas locales de la micro-red DC
S_1, S_2, S_3	1.5,1.5,1.0	kVA	Potencia máxima de salida de los GDs-ac
P_4, P_5, P_6	2.0,1.5,1.5	kW	Potencia máxima de salida de los GDs-dc
ω_0	100π	rad/s	Frecuencia nominal
V_0	150	V	Voltaje nominal (peak) de la micro-red AC
V_{dc0}	130	V	Voltaje nominal de la micro-red DC

Tabla 4.8: Parámetros de los controladores primarios de las micro-redes AC y DC.

Parámetro	Valor	Unidades	Descripción
T_s	0.625	μS	Tiempo de muestreo para los controladores del nivel primario
K_{ipll}	24.595	-	K_i del PLL
K_{ppll}	0.296	-	K_p del PLL
K_{pi}	5.341	-	K_p lazo de corriente primario (500 Hz)
K_{ii}	8171.88	-	K_i lazo de corriente primario (500 Hz)
K_{pv}	0.44	-	K_p lazo de tensión primario (50 Hz)
K_{iv}	69.747	-	K_p lazo de tensión primario (50 Hz)
$m_{p\omega 1}$	0.000628	$\text{rad} * \text{s}^{-1}/\text{kW}$	Pendiente droop p- ω del GD-1
$m_{p\omega 2}$	0.000785	$\text{rad} * \text{s}^{-1}/\text{kW}$	Pendiente droop p- ω del GD-2
$m_{p\omega 3}$	0.001	$\text{rad} * \text{s}^{-1}/\text{kW}$	Pendiente droop p- ω del GD-3
$m_{qv 1}$	0.004	V/VAR	Pendiente droop q-V del GD-1
$m_{qv 2}$	0.005	V/VAR	Pendiente droop q-V del GD-2
$m_{qv 3}$	0.0067	V/VAR	Pendiente droop q-V del GD-3
$m_{dc 1}$	0.005	V/kW	Pendiente droop p-V del GD-4
$m_{dc 2}$	0.008	V/kW	Pendiente droop p-V del GD-5
$m_{dc 3}$	0.0133	V/kW	Pendiente droop p-V del GD-6
ω_c	2π	rad/s	Frecuencia corte controlador droop GDs-ac

Tabla 4.9: Parámetros de sintonía controladores secundarios de micro-redes AC y DC.

Parámetro	Valor	Unidades	Descripción
T_{sec}	0.1	s	Tiempo de muestreo controladores del nivel secundario
N_y	10	-	Horizonte de predicción
N_u	10	-	Horizonte de control
$\lambda_{11}, \lambda_{21}, \lambda_{31}$	9E3, 9E3, 9E3	$[s/rad]^2$	Peso asociado al error de frecuencia promedio de los GDs-ac
$\lambda_{12}, \lambda_{22}, \lambda_{32}$	8E1, 8E1, 8E1	$[1/V]^2$	Peso asociado al error de voltaje promedio de los GDs-ac
$\lambda_{13}, \lambda_{23}, \lambda_{33}$	8E4, 8E4, 8E4	$[s/rad]^2$	Peso asociado a la acción de control de frecuencia de los GDs-ac
$\lambda_{14}, \lambda_{24}, \lambda_{34}$	7E1, 7E1, 7E1	$[1/V]^2$	Peso asociado a la acción de control de voltaje de los GDs-ac
$\lambda_{15}, \lambda_{25}, \lambda_{35}$	3E2, 3E2, 3E2	$[VA/W]^2$	Peso asociado al consenso de potencia activa de los GDs-ac
$\lambda_{16}, \lambda_{26}, \lambda_{36}$	2E3, 2E3, 2E3	$[VA/VAr]^2$	Peso asociado al consenso de potencia reactiva de los GDs-ac
$\lambda_{41}, \lambda_{51}, \lambda_{61}$	7E1, 7E1, 7E1	$[1/V]^2$	Peso asociado al error de voltaje promedio de los GDs-dc
$\lambda_{42}, \lambda_{52}, \lambda_{62}$	8E2, 8E2, 8E2	$[1/V]^2$	Peso asociado a la acción de control de voltaje de los GDs-dc
$\lambda_{43}, \lambda_{53}, \lambda_{63}$	1E3, 1E3, 1E3	-	Peso asociado al consenso de potencia activa de los GDs-dc
$\lambda_{ILC,1}$	2	$[1/W]^2$	Peso asociado a la variación de la acción de control P_{ILC}
$\lambda_{ILC,2}$	1E6	-	Peso asociado al consenso de potencia activa entre los GDs-ac y GDs-dc

Para validar la estrategia DMPC propuesta, en las subsecciones 4.2.1, 4.2.2 y 4.2.3 se muestran, respectivamente, los resultados de diversas pruebas realizadas tales como: impacto y desconexión de cargas, capacidad *plug-and-play*, y respuesta del controlador frente a retardo en la red de comunicación.

4.2.1. Impacto y desconexión de cargas

En este escenario se muestran los resultados que permiten validar por simulación la estrategia DMPC propuesta en una micro-red híbrida AC/DC frente a la conexión y desconexión de cargas. Para esto se simularon distintos casos en distintos instantes de tiempo tal como se muestra en la tabla 4.10.

Tabla 4.10: Eventos realizados durante la prueba de impacto y desconexión de cargas de la micro-red híbrida.

Tiempo [s]	Evento
0	Conexión y sincronización de GDs-ac y GDs-dc. Conexión de controladores primarios.
1	Impactos de carga $Z_1=1.02$ kW, $R_1=1.54$ kW y $R_3=1.54$ kW
3	Conexión de controladores secundarios de las micro-redes AC y DC
20	Conexión controlador predictivo del ILC
40	Impacto de carga $Z_2=1.50$ kW
60	Desconexión de carga $R_3=1.54$ kW
80	Impacto de carga $R_2=1.03$ kW
100	Desconexión de carga $Z_2=1.50$ kW

En las figuras 4.7 y 4.8 se presentan los resultados por simulación de la estrategia de control propuesta, definida en el capítulo 3, a partir de los eventos mostrados en la tabla 4.10. Es importante destacar que las pruebas se realizan considerando que las unidades de ambas micro-redes están conectadas y sincronizadas, así como que el control primario está operando establemente luego de los impactos de carga.

A partir de lo anterior, a los $t=3$ s se activan los controladores secundarios de frecuencia y voltaje DC en ambas micro-redes operando separadamente, de los cuales se puede observar que las unidades del lado AC logran restaurar la frecuencia y tensión promedio al valor nominal, mientras que, de igual manera, el voltaje promedio de la micro-red DC se restaura al valor nominal. Además, las unidades de cada micro-red logran el consenso de potencia activa a razón de sus capacidades máximas y, adicionalmente, las unidades del lado AC logran el consenso de potencia reactiva proporcional.

Luego, a los $t=20$ s se activa el controlador del ILC del cual se observa que todas las unidades de la micro-red híbrida logran el consenso de potencia activa a razón de su potencia máxima (figura 4.7(a)), mientras se restablecen la frecuencia, tensión AC promedio y tensión DC promedio a sus valores nominales. Cabe destacar que en el transitorio, la frecuencia está bajo su valor nominal mientras que la tensión DC está por sobre ella, esto debido a que la transferencia de potencia activa es desde el lado AC al DC, por lo que las unidades de la micro-red AC ven que su demanda aumenta, mientras que las unidades de la micro-red DC ven que su demanda disminuye. Con respecto a la potencia activa transferida por el ILC, en la figura 4.7(c) se observa que alcanza aproximadamente los 70 [W] con signo negativo lo cual significa que se transfiere potencia desde el lado AC al lado DC.

Posteriormente, a los $t=40$ s se efectúa un impacto de carga $Z_2 = 1,50$ kW, lo cual se traduce en que todas las unidades compartan mayor potencia activa en proporción a su capacidad máxima, mientras la transferencia de potencia por el ILC cambia de signo negativo a positivo, lo cual significa que se está transfiriendo potencia activa desde el lado DC al lado AC. Además, se observa que la frecuencia y voltaje DC se restablecen a sus valores nominales, debido a la acción de los controladores secundarios de ambas micro-redes. A pesar que se cumple el objetivo de control en las unidades, se observa la existencia de sobre oscilaciones

de potencia activa en el transitorio por parte de las unidades AC, esto debido principalmente a que el impacto de carga se realiza en la micro-red AC. Por último, a los $t=60s$, $t=80s$ y $t=100s$ se efectúa una desconexión de carga en el lado DC, un impacto de carga en el lado DC y una desconexión de carga en el lado AC respectivamente, en cuyos casos se logra cumplir los objetivos de control.

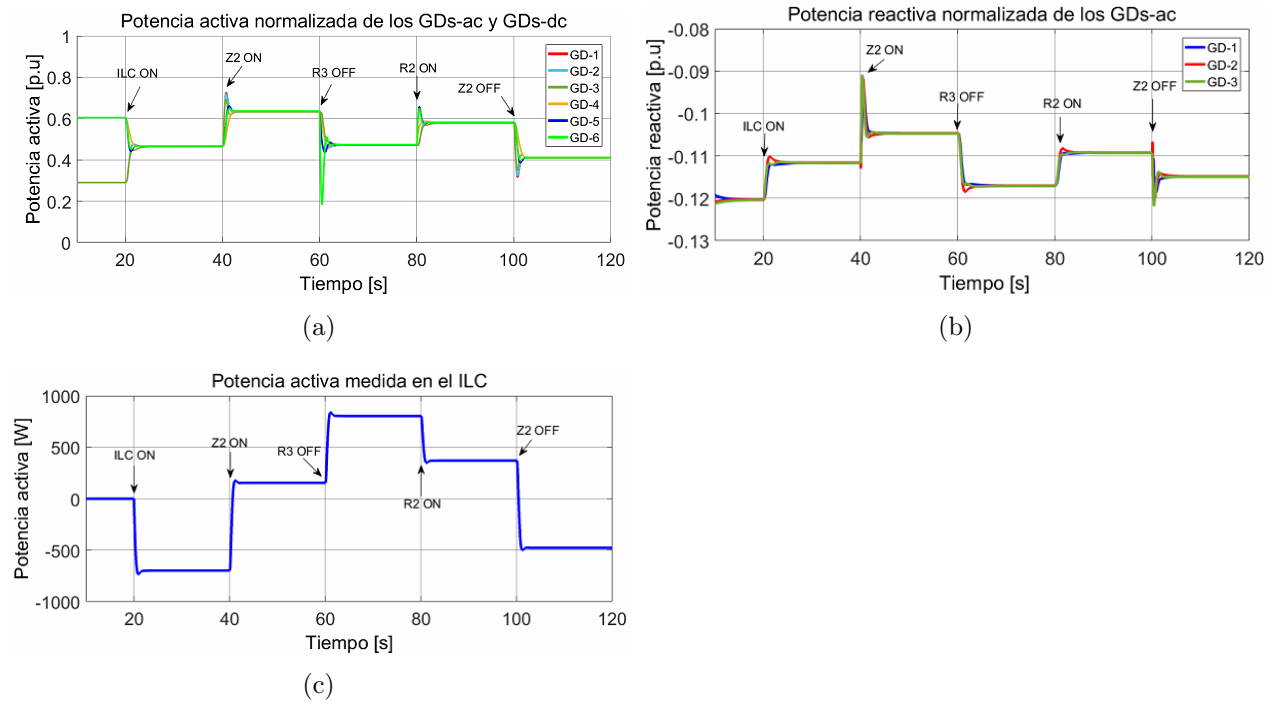


Figura 4.7: Resultados por simulación del DMPC secundario aplicado a una micro-red híbrida AC/DC para el caso de conexión y desconexión de cargas: (a) Potencia activa normalizada entregada por los GDs-ac y GDs-dc. (b) Potencia reactiva normalizada entregada por los GDs-ac. (c) Potencia activa transferida por el ILC.

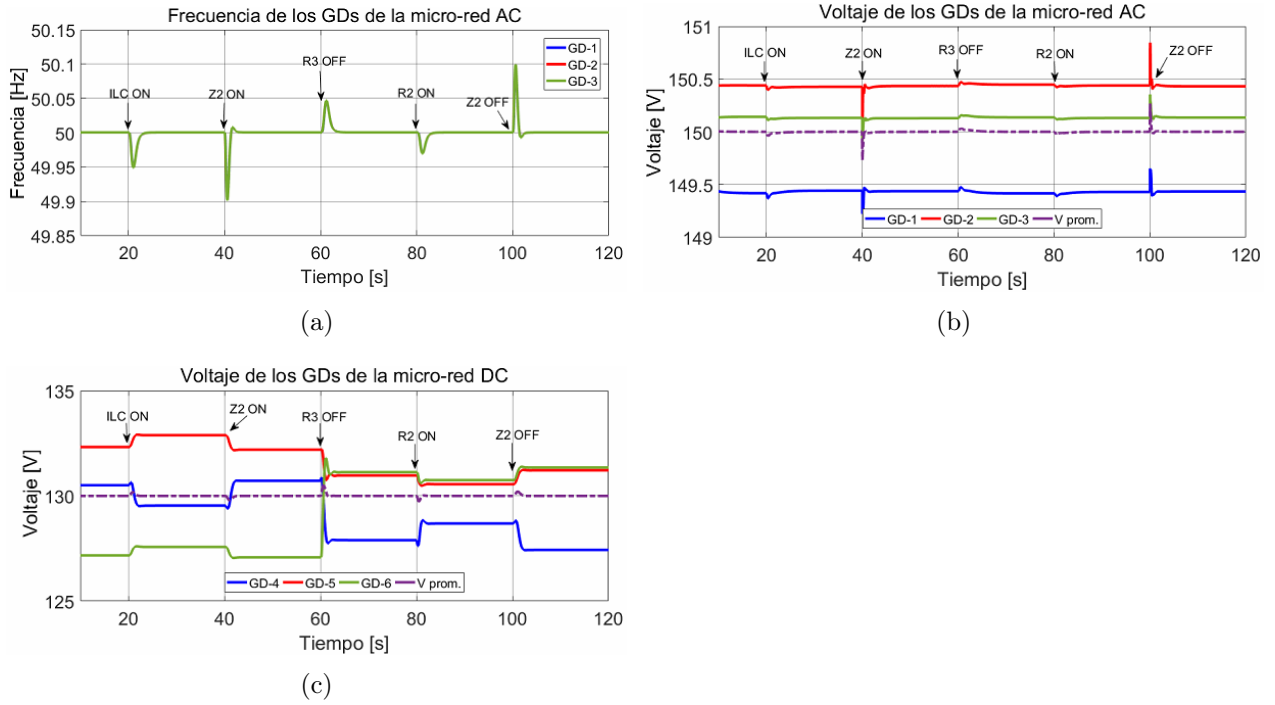


Figura 4.8: Resultados por simulación del DMPC secundario aplicado a una micro-red híbrida AC/dC para el caso de conexión y desconexión de cargas: (a) Frecuencia de los GDs de la micro-red AC. (b) Voltaje de los GDs de la micro-red AC. (c) Voltaje de los GDs de la micro-red DC.

4.2.2. Capacidad Plug-and-Play

En este escenario se muestran los resultados que permiten validar por simulación la estrategia DMPC propuesta en una micro-red híbrida AC/DC frente a la capacidad *plug-and-play* de las unidades de generación. Para esto, se simularon distintos casos en distintos instantes de tiempo, tal como se muestra en la tabla 4.11.

Tabla 4.11: Eventos realizados durante la prueba de *plug-and-play* de la micro-red híbrida.

Tiempo [s]	Evento
0	Conexión y sincronización de GDs-ac y GDs-dc. Conexión de controladores primarios.
1	Impactos de carga $Z_1=1.02$ kW, $R_1=1.54$ kW y $R_3=1.54$ kW
3	Conexión de controladores secundarios de las micro-redes AC y DC
20	Conexión controlador predictivo del ILC
30	Desconexión del GD-2 (U2) de la micro-red AC
40	Reconexión del GD-2 (U2) de la micro-red AC
50	Desconexión del GD-5 (U5) de la micro-red DC
60	Reconexión del GD-5 (U5) de la micro-red DC
70	Desconexión GD-2 (U2) y GD-5 (U5) de la micro-red AC y DC respect.
80	Reconexión GD-2 (U2) y GD-5 (U5) de la micro-red AC y DC respect.

En las figuras 4.9 y 4.10 se presentan los resultados por simulación para el caso de capacidad de Plug-and-Play. A los $t=3s$ y $t=20s$ se activan los controladores secundarios de las micro-redes y el controlador predictivo del ILC, respectivamente, para lo cual se observa que todas las unidades de la micro-red híbrida logran el consenso de potencia activa y reactiva a razón de sus capacidades máximas (figuras 4.9(a) y 4.9(b)), como también, se cumplen los objetivos de restauración de frecuencia, tensión DC promedio y tensión AC promedio a sus valores nominales (figuras 4.10(a) y 4.10(c) 4.10(b) respectivamente).

A los $t=30s$ la unidad n^o2 (U2) se desconecta eléctricamente de la micro-red AC lo que se traduce en que opere a frecuencia y tensión nominal sin entregar potencia activa y reactiva. A pesar de dicha desconexión, las demás unidades de la micro-red híbrida logran un consenso de potencia activa y reactiva, como también, restauran la frecuencia, tensión DC promedio y tensión AC promedio a sus valores nominales. Además, cabe destacar que en el transiente de potencia activa, las unidades que presentan una mayor sobre oscilación son las pertenecientes a la micro-red AC, lo cual tiene sentido, ya que la desconexión afecta directamente a dicha micro-red.

Luego a los $t=40s$ se procede a reconectar U2 procurando sincronizarlo con el resto de la micro-red. A partir de esto, se observa que todas las unidades logran los objetivos de control de forma análoga a cómo lo hacían antes de que la unidad se desconectara.

De forma análoga, a los $t=50s$ y $t=60s$ la unidad n^o5 (U5) se desconecta y reconecta de la micro-red DC respectivamente. Con respecto al primer caso, se observa que la unidad desconectada queda operando a tensión nominal, mientras que las demás unidades de la micro-red híbrida cumplen con los objetivos de consenso y restauración de las variables de control. También, se puede observar que en el transiente, las unidades que presentan mayor sobre oscilación son las que pertenecen a la micro-red DC debido a que la desconexión afecta directamente a dicha micro-red. Luego, al reconectarse la unidad a los $t=60s$, se observa que todas las unidades de la micro-red híbrida cumplen con los objetivos de consenso y restauración e las variables de control.

Posteriormente, a los $t=70s$ ocurre la desconexión de U2 y U5, y a los $t=80s$ se reconectan dichas unidades. Los resultados en ambos casos son análogos a los obtenidos en los casos de desconexión y reconexión anteriores, con la diferencia, que la potencia transferida por el ILC (figura 4.9(c)) tiene una mayor oscilación en el transitorio, esto producto que la perturbación en la micro-red híbrida es mayor dada la desconexión y reconexión de dos unidades y no de solo una como en los eventos anteriores.

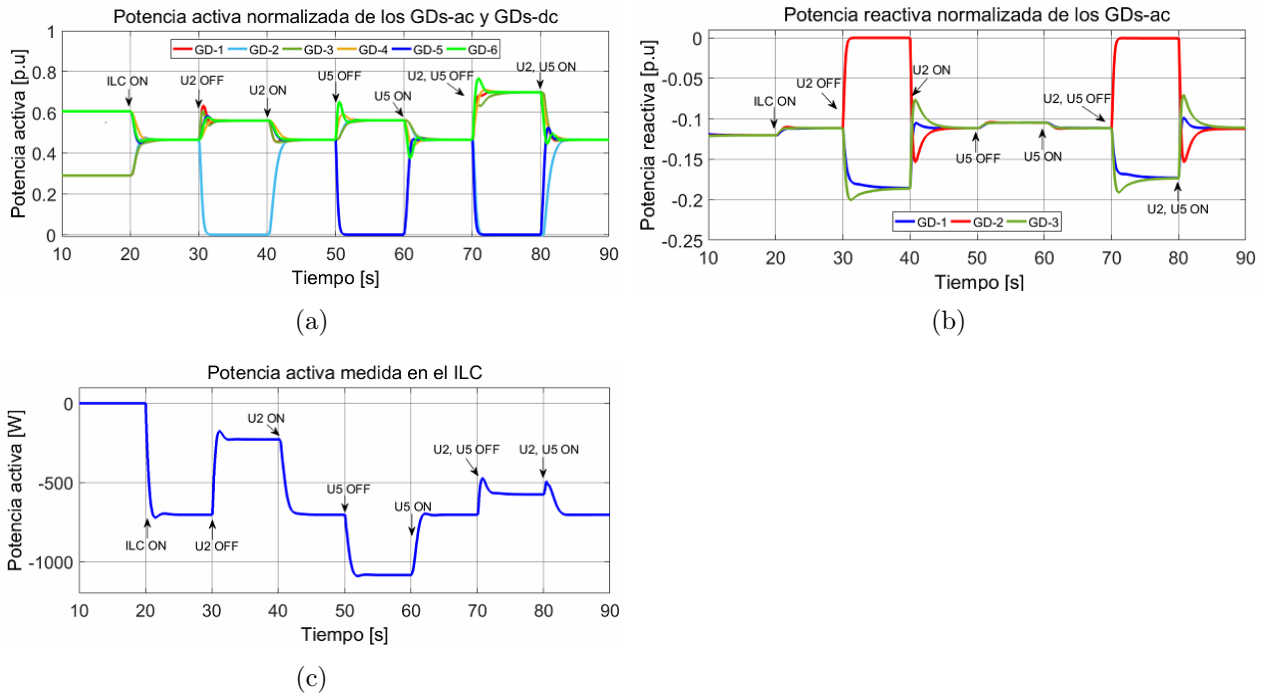


Figura 4.9: Resultados por simulación del DMPC secundario aplicado a una micro-red híbrida AC/DC para la prueba de capacidad *plug-and-play*: (a) Potencia activa normalizada entregada por los GDs-ac y GDs-dc. (b) Potencia reactiva normalizada entregada por los GDs-ac. (c) Potencia activa transferida por el ILC.

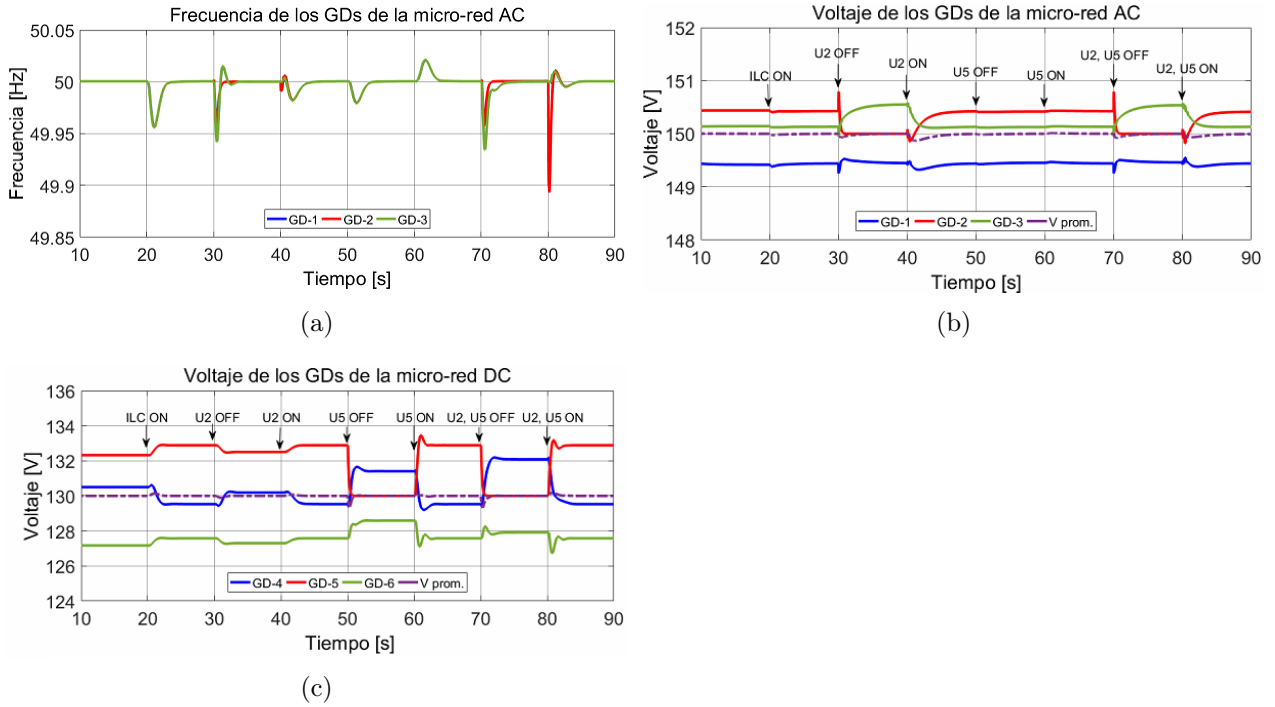


Figura 4.10: Resultados por simulación del DMPC secundario aplicado a una micro-red híbrida AC/DC para la prueba de capacidad *plug-and-play*: (a) Frecuencia de los GDs-ac de la micro-red AC. (b) Voltaje a la salida de los GDs-ac en la micro-red AC. (c) Voltaje a la salida de los GDs-dc en la micro-red DC.

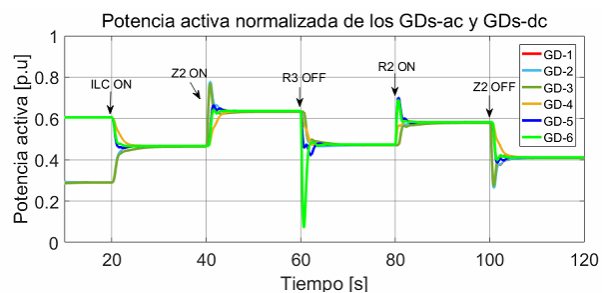
4.2.3. Retardo en la red de comunicación

En este escenario se muestran los resultados que permiten validar por simulación la estrategia DMPC propuesta en la micro-red híbrida AC/DC frente retardos en la red de comunicación. Para esto se simularon distintos casos en distintos instantes de tiempo tal como se muestra en la tabla 4.12.

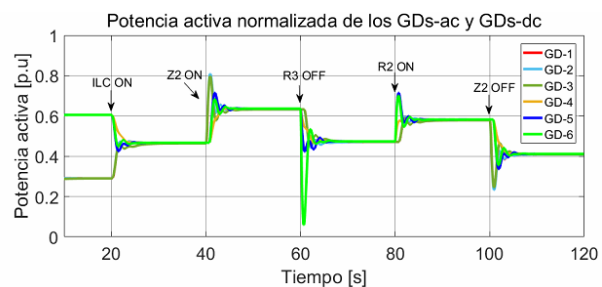
Tabla 4.12: Eventos realizados durante la prueba de retardo en la red de comunicación de la micro-red híbrida.

Tiempo [s]	Evento
0	Conexión y sincronización de GDs-ac y GDs-dc. Conexión de controladores primarios.
1	Impactos de carga $Z_1=1.02$ kW, $R_1=1.54$ kW y $R_3=1.54$ kW
3	Conexión de controladores secundarios de las micro-redes AC y DC
20	Conexión controlador predictivo del ILC
40	Impacto de carga $Z_2=1.50$ kW
60	Desconexión de carga $R_3=1.54$ kW
80	Impacto de carga $R_2=1.03$ kW
100	Desconexión de carga $Z_2=1.50$ kW

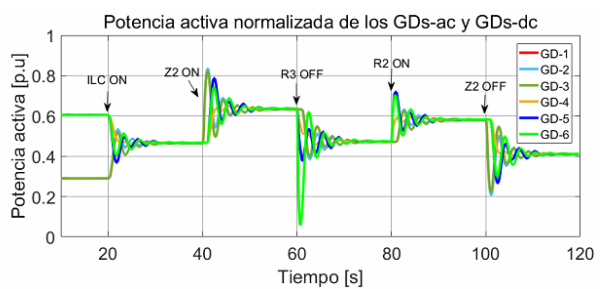
En las figuras 4.11, 4.12, 4.13, 4.14, 4.15 y 4.16 se presentan los resultados por simulación para el caso de retardos en la red de comunicación, considerando los mismo eventos mostrados en el escenario anterior y que la información recibida por todas las unidades de la micro-red híbrida, así como la que le llega al ILC, presenta el mismo retardo. Además, este escenario compara la respuesta de la micro-red híbrida frente a diferentes valores de τ_{ij} , pero tomando como base $\hat{\tau}_{ij}$, el cual corresponde a un período de muestreo. A partir de esto, se observa que a medida que aumenta el retardo, las variables mostradas incrementan su sobrepaso y tiempo de establecimiento, sin embargo, de igual forma alcanzan un valor constante en régimen permanente, cumpliendo los objetivos de control secundario de la micro-red híbrida, aún cuando el retardo llega a ser hasta de 0.8s. Estos resultados se deben a que el DMPC es capaz de compensar el retardo mediante los horizontes de control y predicción deslizantes, el período de muestreo del secundario y la estimación del retardo $\hat{\tau}_{ij}$. No obstante, se debe tener en consideración que el aumento del primero y la disminución del segundo incrementan el esfuerzo computacional.



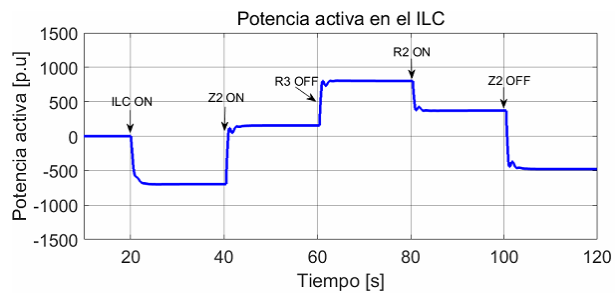
(a)



(b)



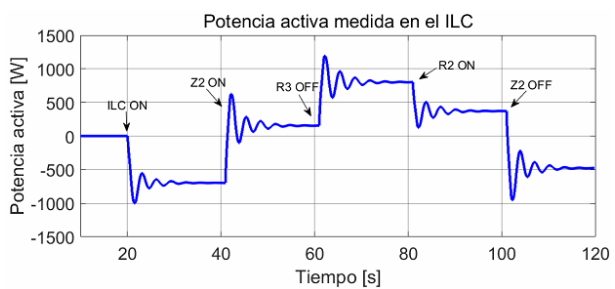
(c)



(a)



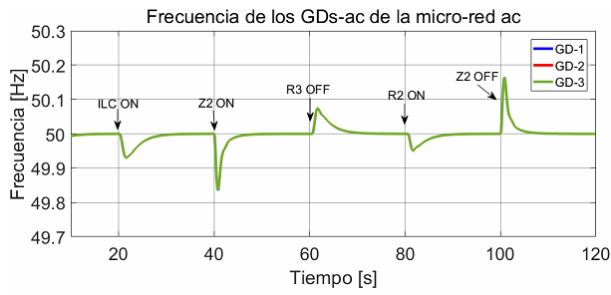
(b)



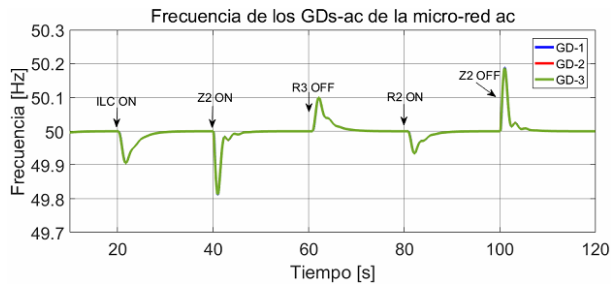
(c)

Figura 4.11: Consenso de potencia activa entre todas las unidades de la micro-red híbrida para el caso de retardos en la red de comunicación: (a) $\tau_{ij} = 0,3s$. (b) $\tau_{ij} = 0,5s$. (c) $\tau_{ij} = 0,8s$.

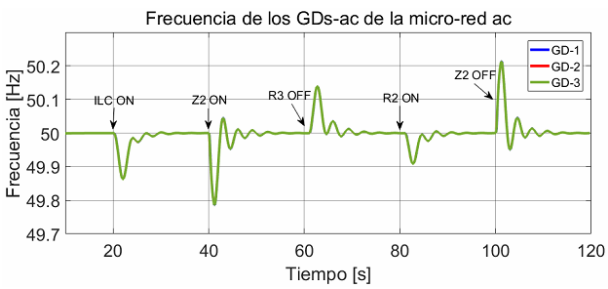
Figura 4.12: Potencia activa transferida por el ILC para el caso de retardos en la red de comunicación: (a) $\tau_{ij} = 0,3s$. (b) $\tau_{ij} = 0,5s$. (c) $\tau_{ij} = 0,8s$.



(a)

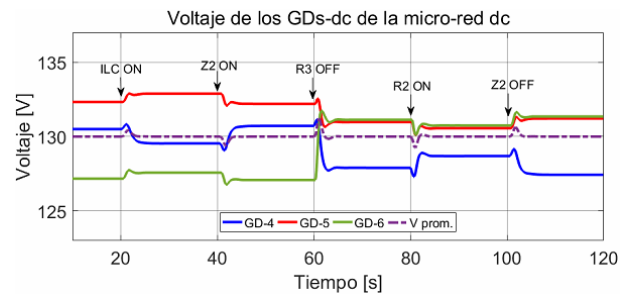


(b)

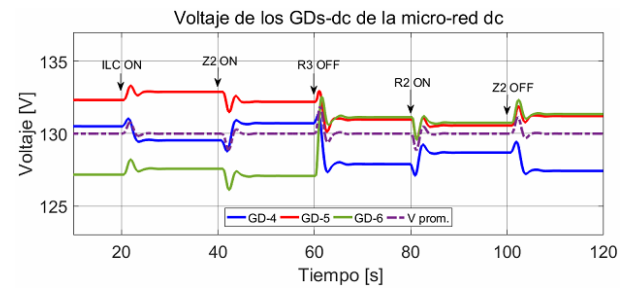


(c)

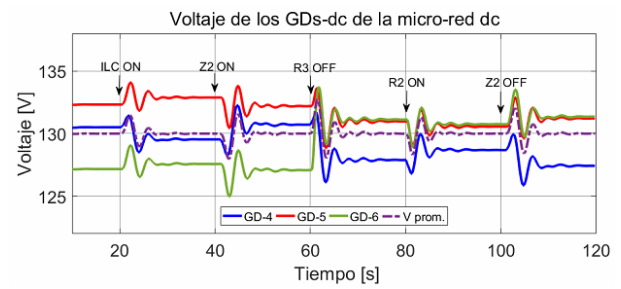
Figura 4.13: Frecuencia de las unidades de generación de la micro-red AC para el caso de retardos en la red de comunicación: (a) $\tau_{ij} = 0,3s$. (b) $\tau_{ij} = 0,5s$. (c) $\tau_{ij} = 0,8s$.



(a)

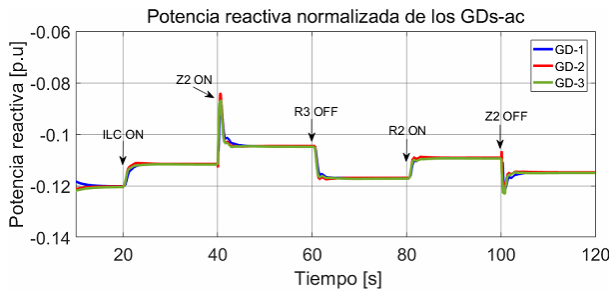


(b)

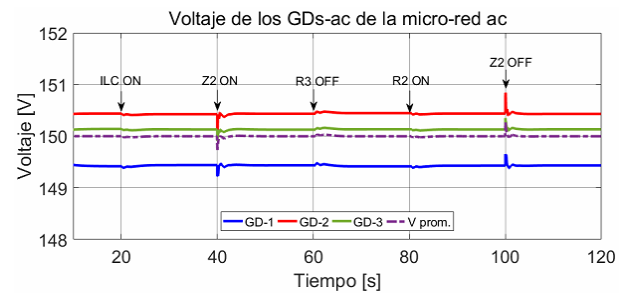


(c)

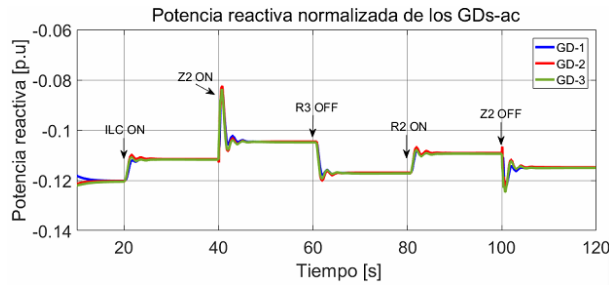
Figura 4.14: Tensión de las unidades de generación de la micro-red DC para el caso de retardos en la red de comunicación: (a) $\tau_{ij} = 0,3s$. (b) $\tau_{ij} = 0,5s$. (c) $\tau_{ij} = 0,8s$.



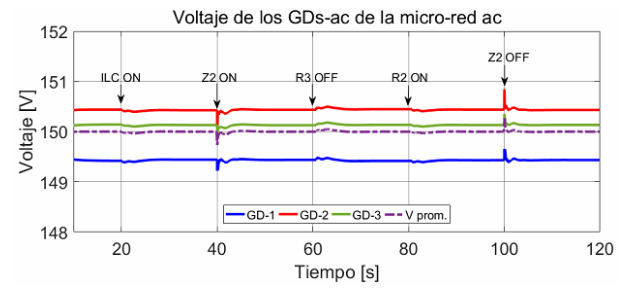
(a)



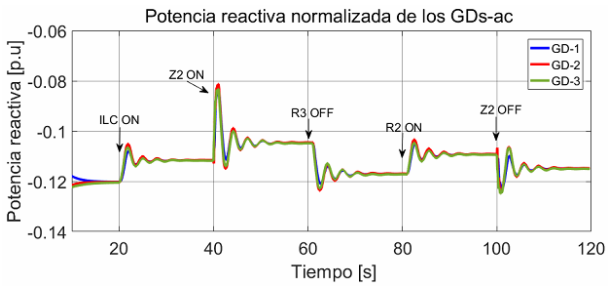
(a)



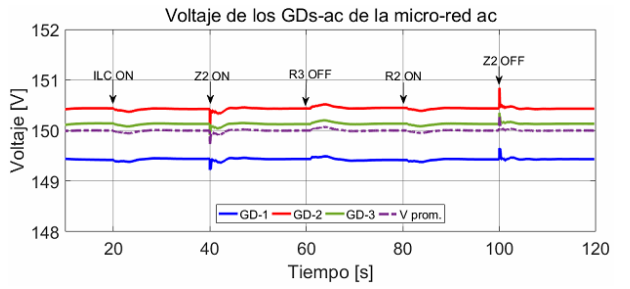
(b)



(b)



(c)



(c)

Figura 4.15: Consenso de potencia reactiva entre las unidades de la micro-red AC para el caso de retardos en la red de comunicación: (a) $\tau_{ij} = 0,3s$. (b) $\tau_{ij} = 0,5s$. (c) $\tau_{ij} = 0,8s$.

Figura 4.16: Tensión de las unidades de generación de la micro-red AC para el caso de retardos en la red de comunicación: (a) $\tau_{ij} = 0,3s$. (b) $\tau_{ij} = 0,5s$. (c) $\tau_{ij} = 0,8s$.

4.3. Discusión

En este capítulo se presentaron los resultados obtenidos por simulación a partir de la estrategia DMPC secundario propuesta para micro-redes DC y de la estrategia DMPC secundario propuesta para micro-redes híbridas AC/DC. Con respecto a la primera estrategia, la topología de la micro-red DC está compuesta por tres unidades de generación distribuida, resistencias de acople y de línea, y cargas resistivas. Además, los enlaces de comunicación son bidireccionales, en donde todas las unidades están comunicadas entre sí. Por otro lado, los resultados de esta estrategia abarcan tres tipos de escenarios: impactos de carga, capacidad *plug-an-play* y retardo en la red de comunicación. Estos resultados muestran que, en todos los escenarios, la estrategia DMPC propuesta logra restaurar la tensión promedio a su valor

nominal, así como lograr el consenso de potencia proporcional entre las unidades conectadas a la micro-red DC, esto incluso para un retardo de hasta 0.8s. Cabe destacar que el tiempo de estabilización es de aproximadamente 6s y aumenta, junto al sobre nivel, cuando aumenta el retardo.

Por otro lado, con respecto a la segunda estrategia, la topología de la micro-red híbrida AC/DC está compuesta por una micro-red AC, una micro-red DC y un *interlinking converter* (ILC). La micro-red AC consta de tres unidades de generación distribuida, inductancias de acople y de línea, y cargas resistivas. En cambio la micro-red DC, consta de tres unidades, resistencias de acople y de línea, y cargas resistivas. Además, los enlaces de comunicación son bidireccionales, en donde todas las unidades de cada micro-red están comunicadas entre sí y con el ILC. Por otro lado, los resultados de esta estrategia de control propuesta abarcan los tres tipos de escenarios aplicados en la estrategia anterior. Estos resultados muestran que en todos los escenarios la estrategia DMPC propuesta logra restaurar a su valor nominal la frecuencia y tensión promedio de las unidades de la micro-red AC y la tensión promedio de las unidades del lado DC, así como lograr el consenso de potencia reactiva proporcional entre las unidades de la micro-red AC y el consenso de potencia activa proporcional entre todas las unidades de la micro-red híbrida AC/DC. Esto último mediante la transferencia de potencia activa por medio de un *interlinking converter* (ILC) de manera bidireccional. Cabe destacar, que los impactos de carga afectan en mayor medida a la micro-red (AC o DC) en el que se realizó, sin embargo, esto no afecta al desempeño del controlador. Además, el tiempo de estabilización de las variables asociadas a los objetivos de control es de aproximadamente 5s, sin embargo, este parámetro va a depender de cuán enmallada esté la red de comunicaciones de la micro-red híbrida y de la sintonización de los pesos de los términos de la función objetivo, lo cual depende del *trade-off* definido entre dichos términos. Por otro lado, esta estrategia propuesta también logra los objetivos de control frente a la desconexión y/o reconexión de unidades en el lado AC y/o DC, y para retardos en la red de comunicación de hasta 0.8s. Esto último, debido a que esta estrategia de control permite compensar dicho retardo debido a su esquema de horizonte deslizante.

A pesar del buen desempeño de la estrategia DMPC secundario propuesta para micro-redes DC e híbridas AC/DC, las dificultades radican en la sintonización de los pesos, la cual aumenta en complejidad al aumentar los términos de la función objetivo, así como la necesidad de modelos fenomenológicos del sistema, con el fin de determinar los modelos de predicción utilizados en el problema de optimización. Además, el uso de estos modelos puede no reflejar exactamente el sistema real de estudio, ya que hay una serie de simplificaciones y dinámicas no consideradas que ocurren en el sistema real, por lo que al validar esta estrategia de control experimentalmente, puede no presentar el mismo desempeño en comparación al obtenido por simulación, como también haya que sintonizar nuevamente los pesos asociados a los objetivos de control. Para corroborar el desempeño de esta estrategia de control propuesta en un sistema real, en el siguiente capítulo se presentan los resultados obtenidos a partir una micro-red híbrida experimental montada en el laboratorio de Control de Micro-redes de la Universidad de Chile.

Capítulo 5

Resultados experimentales

La estrategia de control propuesta es validada experimentalmente en la micro-red híbrida montada en el Laboratorio de Control de Micro-redes de la Universidad de Chile. El equipamiento utilizado corresponde a módulos de electrónica de potencia proporcionados por la empresa Triphase. Para contextualizar, el Sistema de Potencia Distribuido Triphase entrega una plataforma escalable, flexible y abierta para la creación de prototipos y pruebas *hardware in the loop* de aplicaciones relacionadas a Sistemas de Potencia. Las soluciones proporcionadas por Triphase son abiertas y completamente programables, por lo que se adaptan a las necesidades del usuario [62].

En el Laboratorio de Control de Micro-redes de la Universidad de Chile hay cinco unidades Triphase [63], de las cuales cuatro se utilizan en la micro-red híbrida experimental que permite validar la estrategia propuesta en esta tesis. A continuación se describen las características principales de las unidades Triphase que son utilizadas en esta tesis.

5.1. Unidades Triphase

5.1.1. Unidad PM15F120C

Esta unidad tiene una potencia nominal de 11.5 kW y consta de un convertidor *back to back* AC/AC con dos entradas y dos salidas AC por lo que aporta con dos unidades AC en la micro-red híbrida. Además, tanto en la entrada como en la salida tiene filtros LC y es alimentado desde la red eléctrica del laboratorio, sin embargo, entre medio, se conecta un transformador de aislación. La topología de esta unidad es mostrada en la figura 5.1.

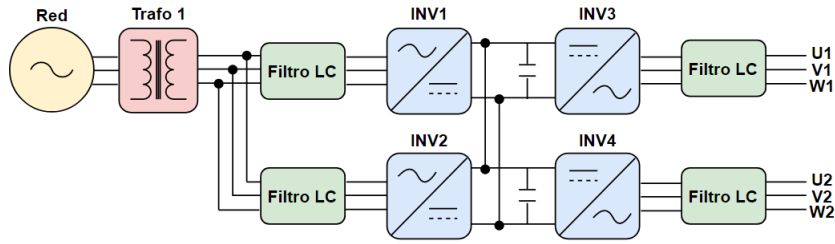


Figura 5.1: Topología unidad Triphase PM15F120C.

5.1.2. Unidad PM5F60R

Esta unidad tiene una potencia nominal de 5 kW y consta de un convertidor *back to back* AC/AC con una entrada y una salida AC por lo que aporta con una unidad AC en la micro-red híbrida. Además, tanto en la entrada como en la salida tiene filtros LC y es alimentado desde la red eléctrica del laboratorio, sin embargo entre medio se conecta un transformador de aislamiento. La topología de esta unidad es mostrada en la figura 5.2.

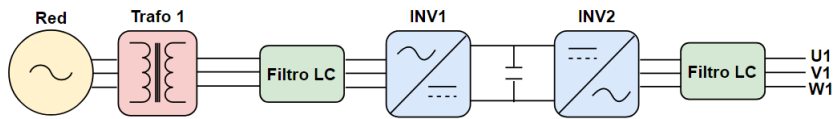


Figura 5.2: Topología unidad Triphase PM5F60R.

5.1.3. Unidad PM5F42R

Esta unidad tiene una potencia nominal de 5 kW y consta de un convertidor *back to back* AC/DC con una entrada DC y una salida AC. Esta unidad es utilizada como ILC en la micro-red híbrida por lo que controla y transfiere potencia activa de forma direccional entre la micro-red AC y la micro-red DC. La topología de esta unidad es mostrada en la figura 5.3.

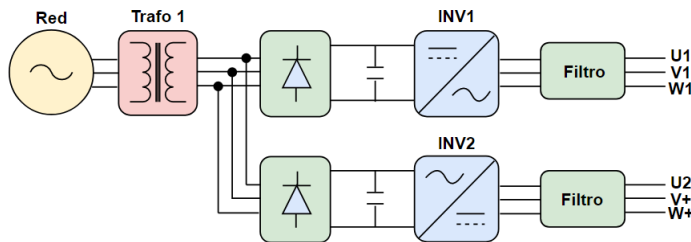


Figura 5.3: Topología unidad Triphase PM5F42R.

5.1.4. Unidad PM15I60F06

Esta unidad tiene una potencia nominal de 30 kW y consta de un convertidor *back to back* AC/DC con una entrada AC y seis salidas DC, no obstante, para la topología experimental usada en esta tesis, aporta con tres unidades DC en la micro-red híbrida. Además, tanto

en la entrada como en la salida tiene filtros LC y es alimentado desde la red eléctrica del laboratorio, sin embargo entre medio se conecta un transformador de aislamiento. La topología de esta unidad es mostrada en la figura 5.4.

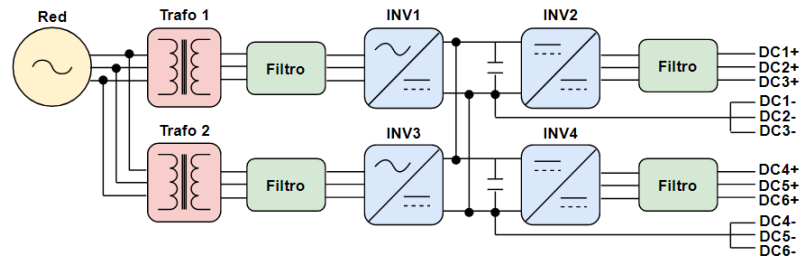


Figura 5.4: Topología unidad Triphase PM15I60F06.

5.2. Topología experimental

En la figura 5.5 se muestra la topología de la micro-red híbrida AC/DC experimental utilizada para validar la estrategia de control propuesta en esta tesis. Esta topología está compuesta por una micro-red AC y otra DC, cada una con tres unidades de generación distribuida. En el caso de las unidades AC, éstas constan a la salida de un filtro LC, una inductancia de acople (usada en el modelo de predicción del DMPC) y una carga resistiva. Además, estas unidades se interconectan por medio de inductancias de línea. Análogamente, la micro-red DC consta de los mismos elementos, con la diferencia que, en vez de usar inductancias de acople y de línea, se utilizan resistencias. Asimismo, ambas micro-redes se interconectan por medio de un *Interlinking Converter* (ILC) que cumple la función de transferir potencia activa de manera bidireccional entre ellas.

La red de comunicación base montada en esta topología permite que todas las unidades del lado AC estén conectadas entre sí, al igual que las unidades del lado DC. Además, permite que una unidad del lado AC y una del lado DC estén conectadas con el ILC.

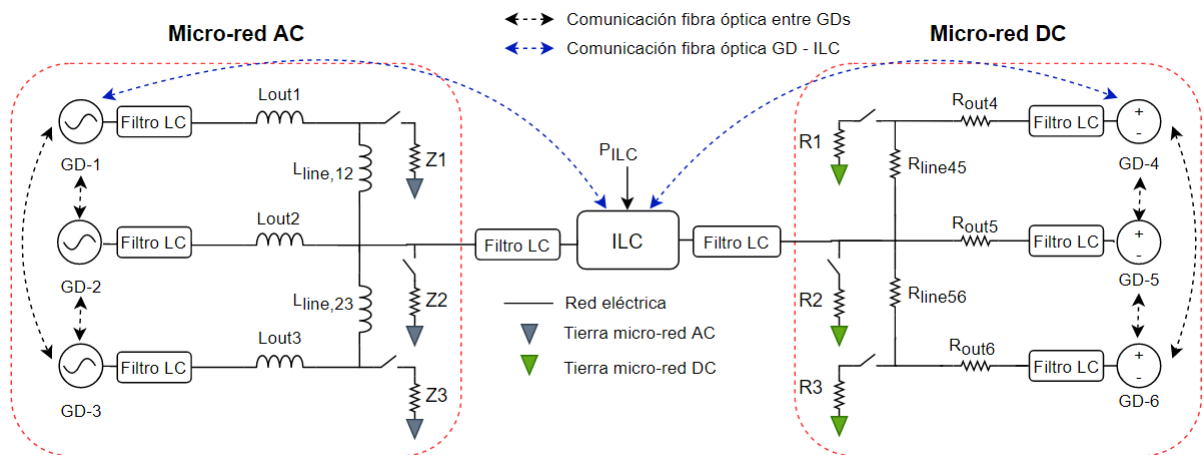


Figura 5.5: Topología micro-red híbrida experimental.

A partir de la red de comunicaciones mencionada anteriormente, la matriz de adyacencia utilizada es una matriz cuadrada con dimensiones de 7 x 7 la cual es de la siguiente forma:

$$A = \begin{pmatrix} AC_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & ILCac_{3 \times 1} \\ 0_{3 \times 3} & DC_{3 \times 3} & ILCdc_{3 \times 1} \\ ILCac_{3 \times 1} & ILCdc_{3 \times 1} & 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

Tal como se mostró en la sección 5.1, las unidades Triphase utilizadas en el laboratorio se muestran en la figura 5.6(a). En la topología experimental, las unidades de generación AC son emuladas por las unidades PM15F120 y PM5F60, en donde la primera consta de dos unidades y la segunda con una. En el caso de las unidades de naturaleza DC, son emuladas por la unidad Triphase PM15I60F06, la cual se configuró para tres unidades. Cada módulo es controlado por un computador con una tarjeta de tiempo real (RTT) (figura 5.6(b)) donde el DMPC de cada unidad es descargado a partir del modelo compilado en el software Matlab/Simulink.

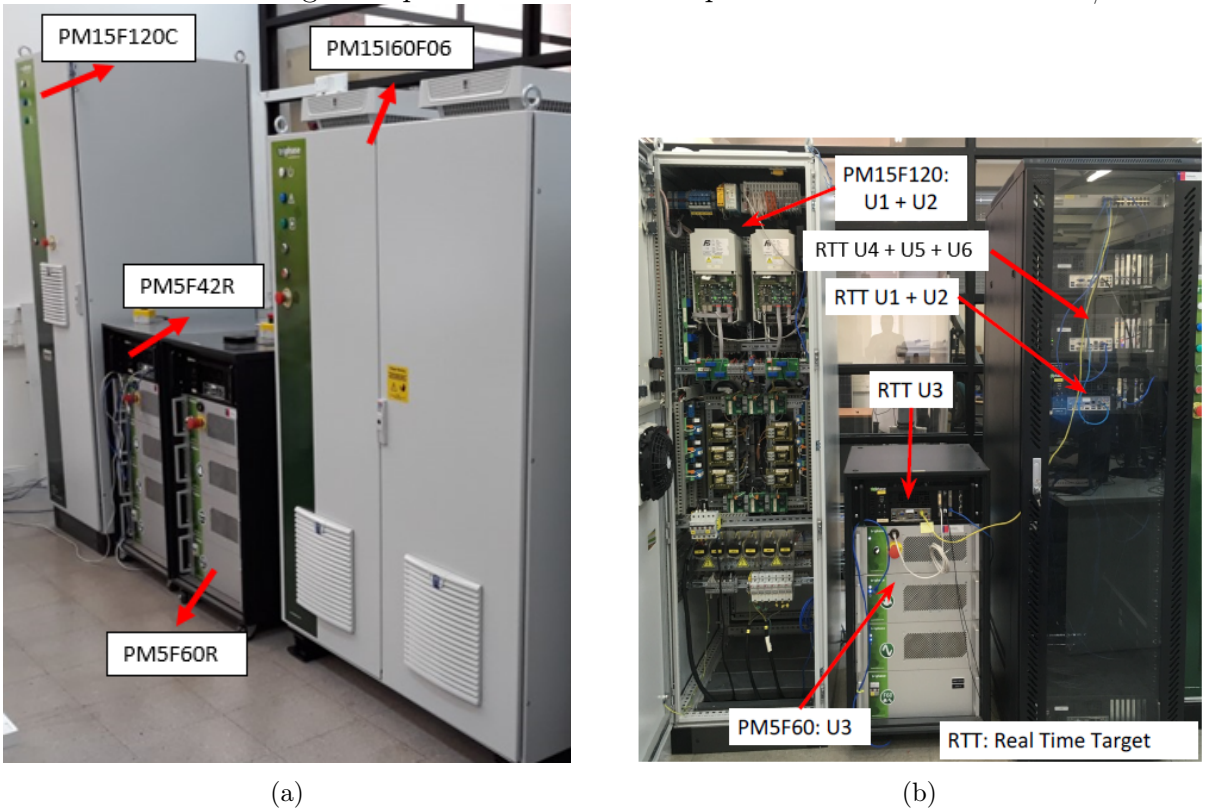


Figura 5.6: Equipos utilizados para el montaje experimental (a) Unidades Triphase. (b) CPUs con tarjetas de tiempo real (RTT).

Por otro lado, los elementos adicionales utilizados en esta topología, tales como: inductancias y resistencias de acople y de línea, y cargas resistivas, son montados en dos gabinetes,

uno AC y otro DC, los cuales son mostrados en las figuras 5.7(a) y 5.7(b) respectivamente. Adicionalmente, la red de comunicaciones de la micro-red es efectuada por fibra óptica.

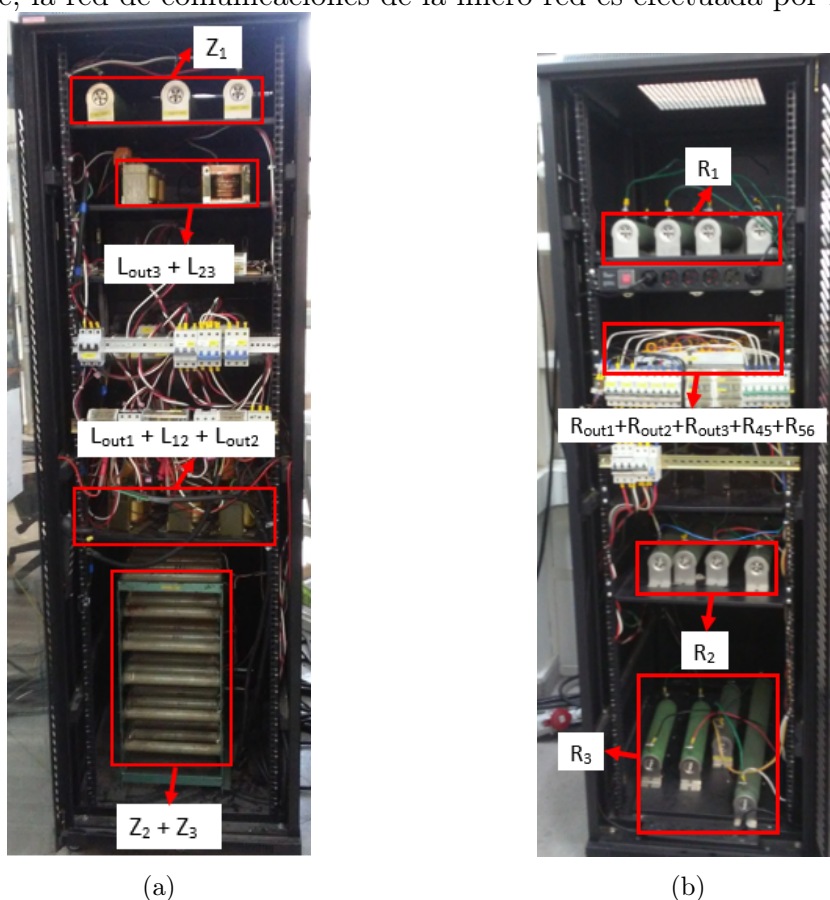


Figura 5.7: Elementos adicionales de la micro-red híbrida experimental (a) Rack de la micro-red AC. (b) Rack de la micro-red DC.

5.3. Resultados

La estrategia de control propuesta en las secciones 3.2, 3.3 y considerando el controlador predictivo del ILC definido en 3.5 es validada experimentalmente con la modificación que, en vez de utilizar un DMPC de tensión AC promedio y potencia reactiva, se utiliza un controlador DAPI (como el presentando en [32]) para cumplir ambos objetivos de control. Esta modificación es hecha debido a la limitación del número de variables que se pueden transmitir por la red de comunicación, en donde el DMPC sobre pasa dicho límite. No obstante, esto no afecta al proceso de validación de la estrategia de control propuesta, ya que el DMPC de tensión AC promedio y potencia reactiva no es una propuesta de esta tesis (trabajo hecho en [50],[51]). A pesar de esto último, se debe recalcar que el controlador DAPI puede afectar levemente los resultados, produciendo una respuesta cada vez más oscilatoria al aumentar el retardo en la red de comunicación, esto ya que no permite compensar este último.

Para obtener los resultados a partir de las distintas pruebas experimentales realizadas, se utilizaron los parámetros eléctricos y de control presentados en las tablas 5.1, 5.2 y 5.3.

Con respecto a la tabla 5.3, cabe destacar que los horizontes de predicción y control son menores a los usados en la simulación, debido a que en la parte experimental hubo un límite de variables que se podían transmitir por los enlaces de fibra óptica entre los controladores de las unidades. Por otro lado, los factores de peso asociados al DMPC de cada unidad de las micro-redes AC y DC y al MPC del ILC son ajustados heurísticamente, ajustando primero la variación de la acción de control, con el fin que ésta tenga una variación suave frente a cualquier acción del controlador. Luego, para los controladores de las unidades del lado AC se establece un *trade-off* entre la regulación de frecuencia y el consenso de potencia activa, mientras que en el lado DC el *trade-off* es entre la regulación de tensión DC promedio y consenso de potencia entre las unidades. En ambos casos se procura que la frecuencia y tensión DC promedio alcancen sus valores nominales, mientras las unidades logran un consenso de potencia activa. Por último, con respecto al controlador del ILC, primero se procedió a ajustar el peso asociado a la variación de la acción de control con el fin que ésta tenga una respuesta suave y luego se ajustó el peso asociado al consenso de potencia activa de las unidades comunicadas con el ILC. Cabe destacar que la diferencia de valores entre los pesos utilizados en la parte experimental y la simulación puede estar asociado a las simplificaciones hechas en este último. Por un lado, se debe considerar que en la simulación unidades son representadas como fuentes ideales de tensión, mientras el ILC es representado por fuentes de corriente. Estas simplificaciones pueden no considerar dinámicas lineales y no lineales de la micro-red híbrida que sí aparecen en la parte experimental.

Tabla 5.1: Parámetros eléctricos utilizados en la micro-red híbrida.

Parámetro	Descripción	Valor
T_{prim}	Período de muestreo nivel primario	1/16E3 s
L_{fi}	Inductancia de filtro del GD_i	0.85 mH
C_{fi}	Capacitancia de filtro del GD_i	70 uF
L_{outi}	Inductancia de acople del $GD_{ac,i}$	2.5 mH
L_{ij}	Inductancia de línea micro-red AC	2.5 mH
R_{outi}	Resistencia de acople del $GD_{dc,i}$	0.67,0.94,0.47 Ω
R_{45}, R_{56}	Resistencia de línea micro-red DC	0.78, 0.5 Ω
Z_1, Z_2, Z_3	Cargas locales de la micro-red AC	1.02,1.5,0.64 kW
R_1, R_2, R_3	Cargas locales de la micro-red DC	1.54,1.03,1.54 kW
S_1, S_2, S_3	Potencia máxima de los GD_{ac}	1.5,1.5,1.0 kW
P_4, P_5, P_6	Potencia máxima de los GD_{dc}	2.0,1.5,1.5 kW
ω_0	Frecuencia nominal micro-red AC	314.159 rad/s
V_{ac0}	Voltaje nominal de la micro-red AC	150 V
V_{dc0}	Voltaje nominal de la micro-red DC	130 V
ω_c	Frecuencia de corte de la micro-red AC	2π rad/s

Tabla 5.2: Pendientes droop del control primario de la micro-red híbrida.

Param.	Unidad	Descripción	GD1	GD2	GD3
$M_{p\omega}$	[rad/sW]	Curva droop P- ω	-3.3e-4	-3.3e-4	-5e-4
M_{qv}	[V/VAR]	Curva droop Q-V	-6.6E-3	-6.6E-3	-9.9E-3
Param.	Unidad	Descripción	GD4	GD5	GD6
M_{pv}	[V/W]	Curva droop P-V	-2.5E-3	-3.3E-3	-3.3E-3

Tabla 5.3: Parámetros de sintonía de los controladores secundarios de las micro-redes AC y DC.

Parámetro	Unidad	Descripción	Valor
Tsec	s	Tiempo de muestreo del nivel secundario	0.1
Ny	-	Horizonte de predicción	5
Nu	-	Horizonte de control	5
$\lambda_{11}, \lambda_{21}, \lambda_{31}$	$[\frac{s}{rad}]^2$	Peso error de frecuencia promedio	2E3
$\lambda_{12}, \lambda_{22}, \lambda_{32}$	$[\frac{s}{rad}]^2$	Peso acción de control de frecuencia	9E3
$\lambda_{13}, \lambda_{23}, \lambda_{33}$	$[\frac{VA}{W}]^2$	Peso consenso de potencia activa	2E2
$\lambda_{41}, \lambda_{51}, \lambda_{61}$	$[\frac{1}{V}]^2$	Peso error de voltaje dc promedio	50
$\lambda_{42}, \lambda_{52}, \lambda_{62}$	$[\frac{1}{V}]^2$	Peso acción de control de voltaje dc	55
$\lambda_{43}, \lambda_{53}, \lambda_{63}$	-	Peso consenso de potencia activa	1.8E4
LambdaILC,1	$[\frac{1}{W}]^2$	Peso acción de control PILC	8E5
LambdaILC,2	-	Peso consenso de potencia activa de la micro-red híbrida	0.5

A continuación, en las subsecciones 5.3.1 y 5.3.2 se presentan los resultados experimentales para validar el desempeño del DMPC, considerando la topología de la figura 5.5, los cuales abordan dos escenarios: impactos de carga y retardos en la red comunicación. Por último, en la subsección 5.3.3 se presenta una discusión de los resultados obtenidos en las subsecciones anteriores analizando las ventajas y desventajas de la estrategia DMPC propuesta.

5.3.1. Escenario I (Caso Base) - Impactos de carga

En este escenario se efectúan impactos de carga de naturaleza resistiva en la micro-red híbrida, tanto en el lado AC como en el DC, con el fin de evaluar el desempeño del DMPC. En la tabla 5.4 se muestra los distintos eventos realizados durante este escenario en determinados instantes de tiempo.

Tabla 5.4: Eventos realizados durante la prueba de impactos de carga en la micro-red híbrida.

Tiempo [s]	Evento
0	- Conexión y sincronización de GDs-ac y GDs-dc. - Conexión de controladores primarios. - Impactos de carga $Z_1=1.02$ kW, $R_1=1.54$ kW y $R_3=1.54$ kW - Conexión de controladores secundarios de las micro-redes AC y DC
15	Conexión controlador predictivo del ILC
60	Impacto de carga $Z_2=1.5$ kW
105	Desconexión de carga $R_3=1.54$ kW
150	Impacto de carga $R_2=1.03$ kW

En $t = 0s$, en las micro-redes AC y DC se habilita el control interno y control primario basado en curvas droop, además, la carga conectada en el lado AC es $Z_1 = 1,02$ kW, mientras que en el lado DC, las cargas conectadas son $R_1 = R_3 = 1,54$ kW. Luego, actúa el DMPC secundario de cada micro-red de forma separada en donde, en el caso de la micro-red AC, la frecuencia se restablece a su valor nominal logrando, además, el consenso de potencia activa proporcional entre todas las unidades. En tanto, en la micro-red DC, la tensión promedio se restablece a su valor nominal logrando el consenso de potencia entre las unidades. Posteriormente, a los $t=15s$ se habilita el control del ILC, lo cual implica que éste controle la potencia activa transferida entre ambas micro-redes, específicamente, desde el lado AC al lado DC (figura 5.8(c)), con el fin de lograr el consenso de potencia activa entre las unidades de generación AC y DC (figura 5.8(a)). Un aspecto que es importante destacar es que la dinámica de cada micro-red queda condicionada a la sintonización de los pesos de los controladores, lo cual se efectúa heurísticamente, y a la dinámica del ILC, ya que el consenso de potencia activa en las unidades de cada lado es más rápido que el consenso de potencia activa entre las unidades del lado AC y del lado DC. Esto último se puede mejorar enmallando aún más la red de comunicaciones entre las unidades de ambos lados y el ILC, así como una comunicación directa entre unidades AC y unidades DC, ya que el controlador local de cada unidad recibirá información de más unidades por lo que la respuesta dinámica será más rápida. Esto explica la diferencia en el tiempo de estabilización de las variables entre los resultados experimentales y por simulación, ya que en el primero solo una unidad de cada lado se comunica con el ILC, mientras que en la simulación, tres unidades de cada lado están comunicadas con el ILC. Además, se debe considerar que las simplificaciones hechas en la topología por simulación, las cuales pueden no considerar dinámicas lineales y no lineales que están presentes en la topología experimental.

Mientras se logra el consenso de potencia activa, el DMPC de cada unidad permite que las variables de frecuencia (figura 5.9(a)) y voltaje DC promedio (figura 5.9(c)) alcancen sus valores nominales. Por otro lado, cabe destacar que al haber implementado un controlador DAPI de tensión y potencia reactiva, se observa que hay una mejor regulación de la primera, esto debido a que se opta por otorgarle un mayor peso a la restauración de dicha variable (figuras 5.9(b) y 5.8(b))

A los $t=60s$ se efectúa un impacto de carga en el lado AC de $Z_2=1.5$ kW, para lo cual se observa que la transferencia de potencia activa por el ILC cambia de sentido y ahora es

desde el lado DC al lado AC (figura 5.8(c)) y, al igual que en el caso anterior, se logran el consenso de potencia activa entre todas las unidades y la restauración de frecuencia y voltaje DC promedio a sus valores nominales (figuras 5.8 y 5.9). También se puede observar que en el transiente, la potencia activa y frecuencia de las unidades AC son las variables más afectadas en la micro-red híbrida. Esto sucede debido a que el impacto de carga se efectúa en el lado AC, por lo que la micro-red AC se ve directamente afectada y esto se refleja en el peak de potencia activa de las unidades AC. Además, al aumentar la carga en dicha micro-red, la frecuencia disminuye para luego restablecerse a su valor nominal.

Luego, a los $t=105s$ y $t=150s$ se procede a desconectar y reconectar, respectivamente, una carga en el lado DC de $R_3=1.54$ kW, para lo cual se logran los objetivos de control señalados anteriormente (figuras 5.8 y 5.9). No obstante, estos dos eventos se diferencian del anterior en que en el transiente, se observa un peak notorio de las potencias de las unidades DC en comparación a las AC. Esto se debe a que la desconexión y reconexión de la carga resistiva es en el lado DC, por lo que la micro-red DC se ve directamente afectada. Producto de esto mismo el voltaje DC promedio de las unidades se ve más afectado en el transiente, en comparación a la frecuencia de las unidades AC, aumentando al desconectar la carga y disminuyendo al reconectarla.

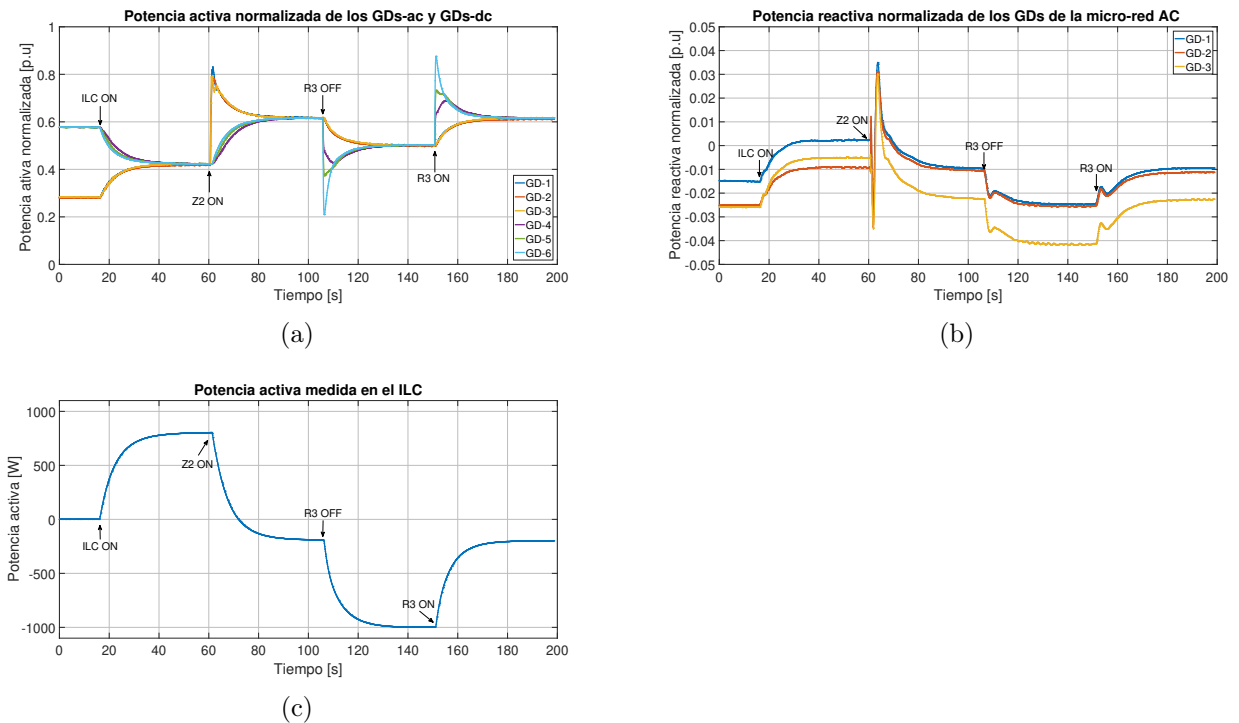


Figura 5.8: Resultados experimentales del DMPC secundario aplicado a una micro-red híbrida AC/DC para el caso de conexión y desconexión de cargas: (a) Potencia activa normalizada entregada por los GDs-ac y GDs-dc. (b) Potencia reactiva normalizada entregada por los GDs-ac. (c) Potencia activa transferida por el ILC.

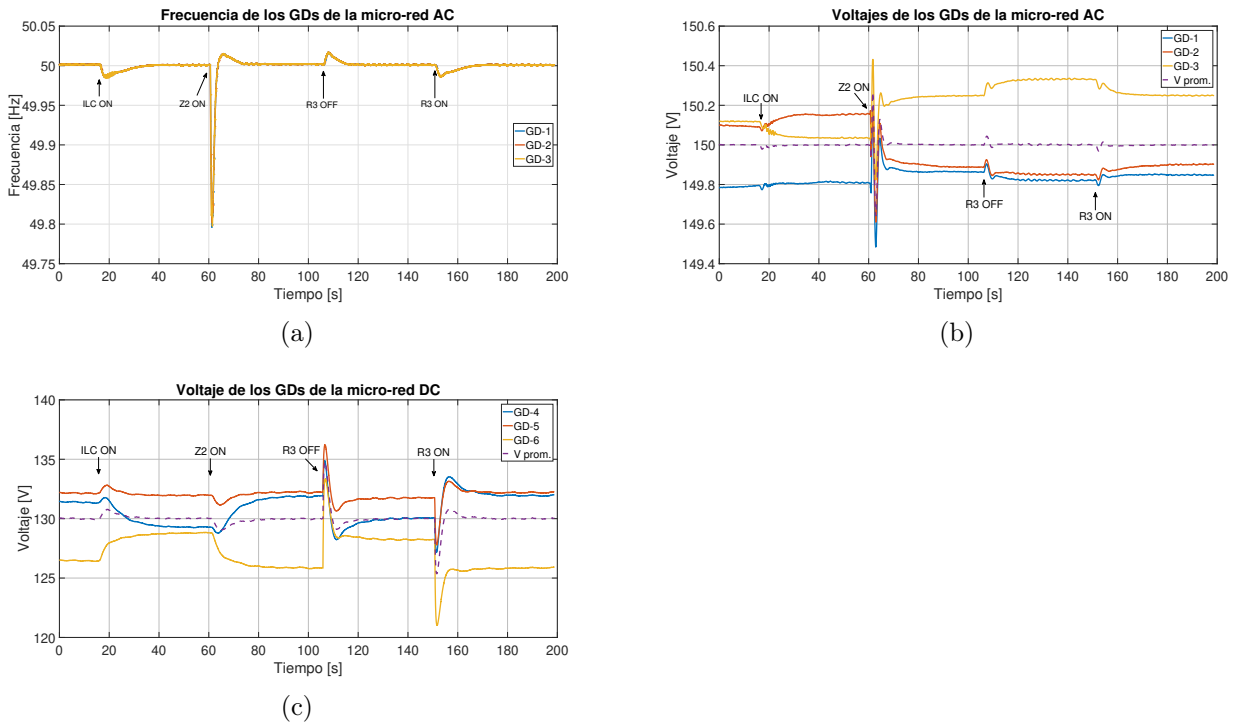


Figura 5.9: Resultados experimentales del DMPC secundario aplicado a una micro-red híbrida AC/DC para el caso de conexión y desconexión de cargas: (a) Frecuencia de los GDs-ac. (b) Voltaje de los GDs-ac. (c) Voltaje de los GDs-dc.

5.3.2. Escenario II - Retardo en la red de comunicación

En este escenario se valida el controlador propuesto frente a retardos en la red de comunicación de la micro-red híbrida. Los retardos considerados son: 0.3s, 0.5s y 0.8s. En la tabla 5.5 se muestra los distintos eventos realizados durante este escenario en determinados instantes de tiempo.

Tabla 5.5: Eventos realizados durante la prueba de retardo en la red de comunicación en la micro-red híbrida.

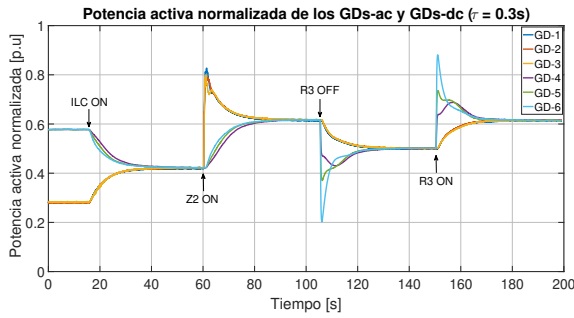
Tiempo [s]	Evento
0	- Conexión y sincronización de GDs-ac y GDs-dc. - Conexión de controladores primarios. - Impactos de carga $Z_1=1.02$ kW, $R_1=1.54$ kW y $R_3=1.54$ kW - Conexión de controladores secundarios de las micro-redes AC y DC
15	Conexión controlador predictivo del ILC
60	Impacto de carga $Z_2=1.5$ kW
105	Desconexión de carga $R_3=1.54$ kW
150	Impacto de carga $R_2=1.03$ kW

Inicialmente, las condiciones de operación son las mismas que en el escenario base. Luego,

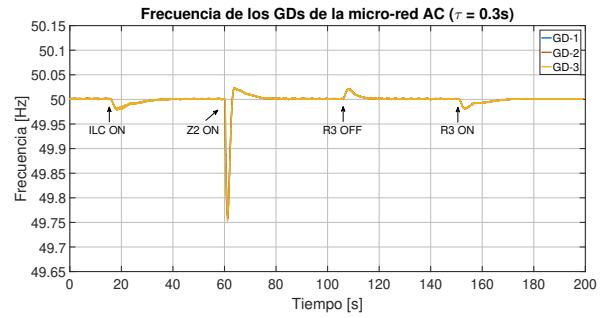
para los casos aplicados en los instantes $t=15s$, $t=60s$, $t=105s$ y $t=150s$, se observa que el controlador tiene un buen desempeño. Por un lado, en las figuras 5.10 y 5.15 se puede observar que, a medida que aumenta el retardo, la potencia activa de las unidades AC y DC y la potencia activa transferida por el ILC se ven levemente afectadas en el transiente, habiendo diferencias poco notorias. Además, para los tres retardos, llegan a converger a un mismo valor independiente de su comportamiento en el transitorio.

Las variables que se ven más afectadas con el aumento de retardo son la frecuencia y la tensión DC promedio (figuras 5.11 y 5.14 respectivamente). En el caso de ambas, al aumentar el retardo se observa en el transiente una dinámica distinta en comparación a la potencia activa de las unidades y transferida por el ILC, ya que al aumentar el retardo el sobre nivel es mayor, donde la caída o subida mayor depende de si se conecta más o menos carga, respectivamente. A pesar de esto, el DMPC tiene un buen desempeño, ya que ambas variables logran alcanzar su valor nominal. El buen desempeño mostrado por el DMPC se debe a su esquema de horizonte deslizante, el cual actualiza la acción de control en cada período de muestreo, compensando los efectos del retardo. Cabe destacar, que esto último depende de los horizontes de predicción y control, período de muestreo y retardo estimado $\hat{\tau}_{ij}$. Por otro lado, al comparar estos resultados con los obtenidos por simulación, se observan diferencias en los tiempos de estabilización y respuestas en el transitorio, en donde los resultados experimentales muestran una respuesta más lenta y con menores oscilaciones al aumentar el retardo. Las causas asociadas a estas diferencias pueden estar relacionadas a la topología de comunicación utilizada, simplificaciones hechas en la simulación (tal como se explicaron en el primer escenario experimental) y diferencias en la sintonización de pesos de los controladores.

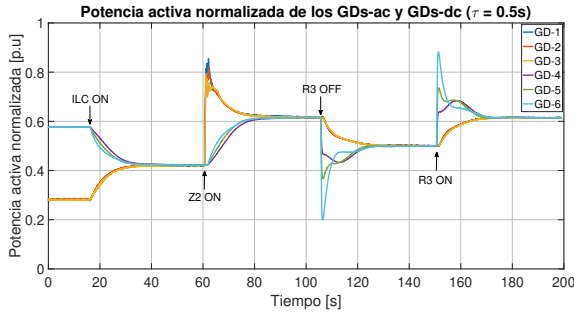
Por último, la tensión AC y potencia reactiva de las unidades AC sí se ven más afectadas, teniendo un comportamiento evidentemente más oscilatorio en el transiente. Esto debido a que en vez de utilizar DMPC, el cual permite compensar el retardo, se utiliza el controlador DAPI.



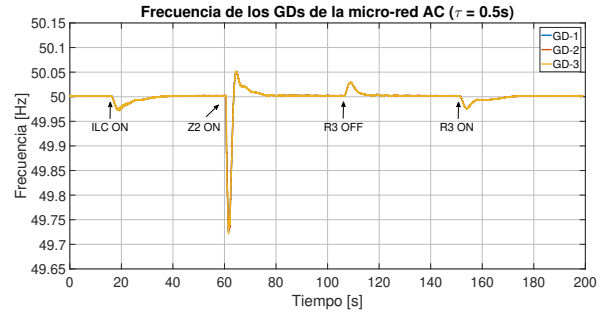
(a)



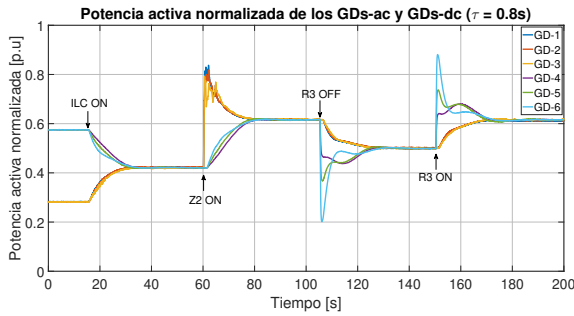
(a)



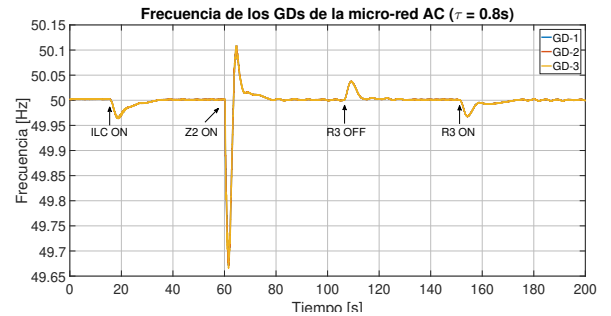
(b)



(b)



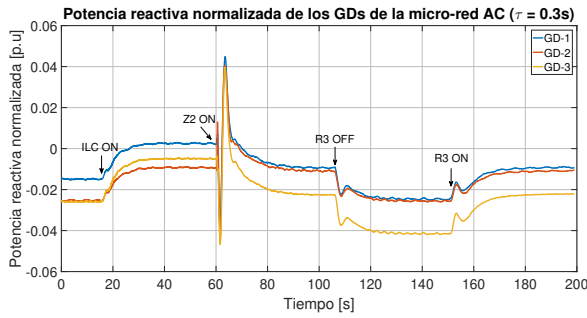
(c)



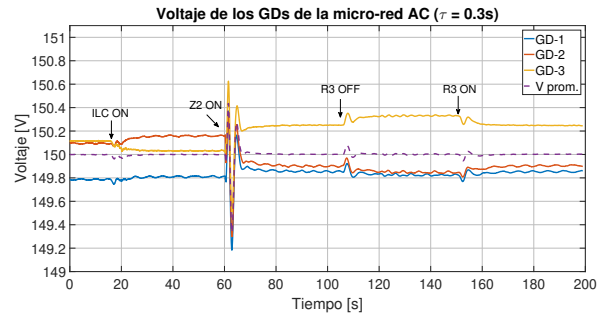
(c)

Figura 5.10: Potencia activa normalizada de los GDs-ac y GDs-dc para los siguientes retardos: (a) $\tau_{ij} = 0,3s$. (b) $\tau_{ij} = 0,5s$. (c) $\tau_{ij} = 0,8s$.

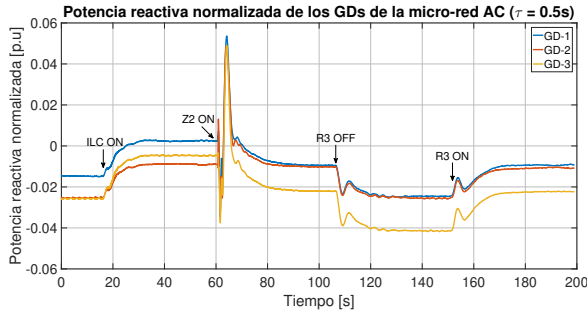
Figura 5.11: Frecuencia de los GDs-ac para los siguientes retardos: (a) $\tau_{ij} = 0,3s$. (b) $\tau_{ij} = 0,5s$. (c) $\tau_{ij} = 0,8s$.



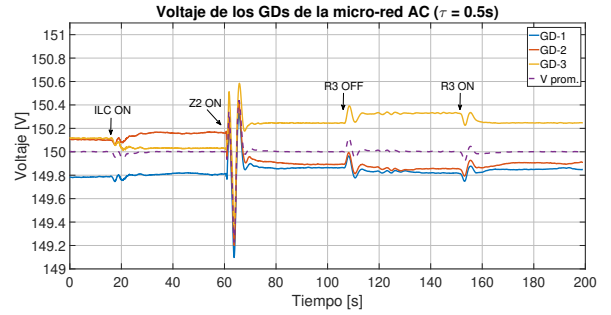
(a)



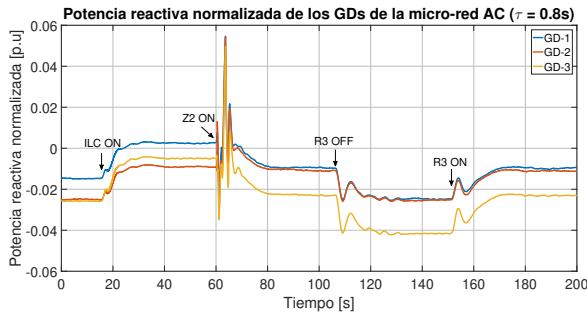
(a)



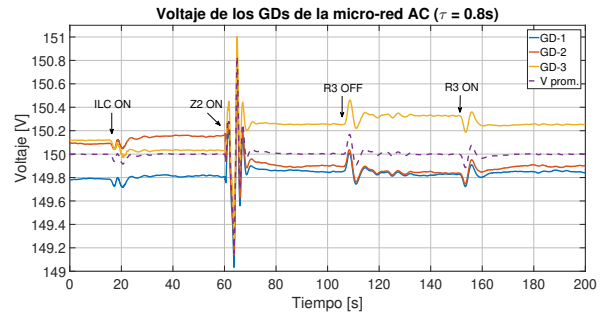
(b)



(b)



(c)



(c)

Figura 5.12: Potencia reactiva normalizada de los GDs-ac para los siguientes retardos: (a) $\tau_{ij} = 0,3s$. (b) $\tau_{ij} = 0,5s$. (c) $\tau_{ij} = 0,8s$.

Figura 5.13: Voltaje de los GDs-ac para los siguientes retardos: (a) $\tau_{ij} = 0,3s$. (b) $\tau_{ij} = 0,5s$. (c) $\tau_{ij} = 0,8s$.

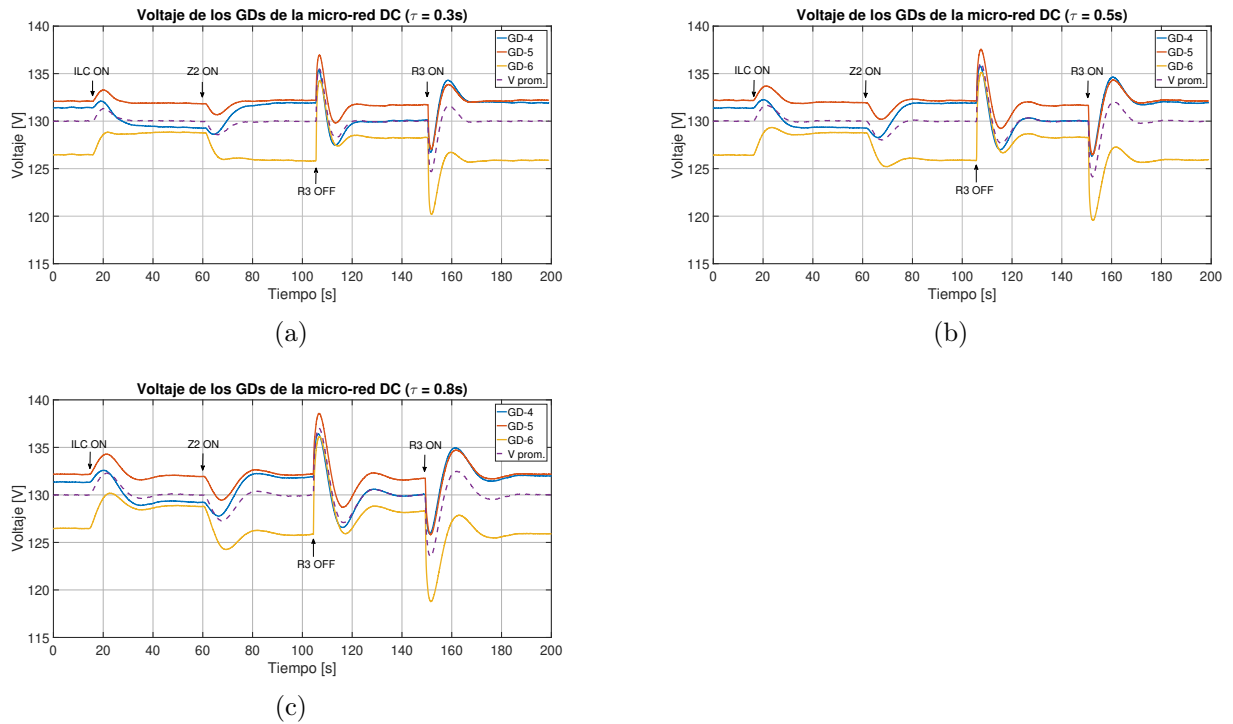


Figura 5.14: Voltaje de los GDs-dc para los siguientes retardos en la red de comunicación: (a) $\tau_{ij} = 0,3s$. (b) $\tau_{ij} = 0,5s$. (c) $\tau_{ij} = 0,8s$.

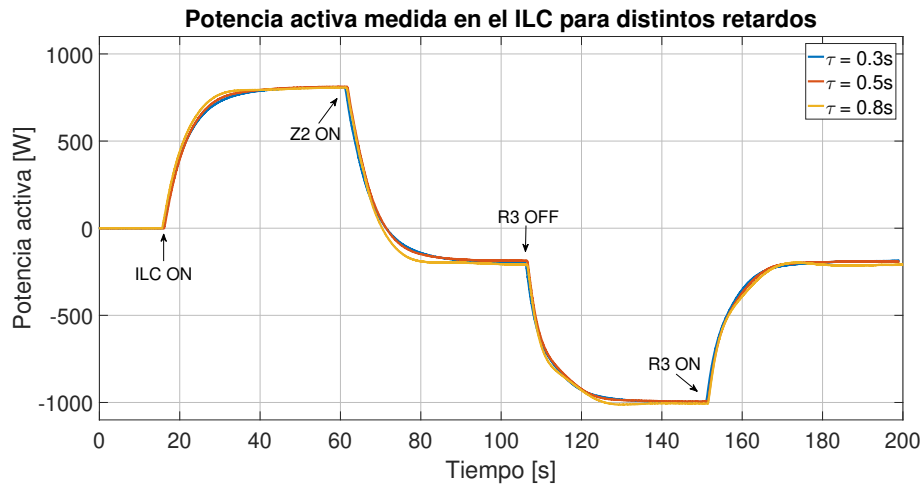


Figura 5.15: Potencia activa medida en el ILC para los siguientes retardos en la red de comunicación: $\tau_{ij} = 0,3s$; $\tau_{ij} = 0,5s$ y $\tau_{ij} = 0,8s$.

5.3.3. Discusión

En este capítulo se presentaron los resultados obtenidos de forma experimental a partir de la estrategia DMPC secundario propuesta para micro-redes híbridas AC/DC. Cabe destacar, que para la regulación de tensión promedio y consenso de potencia reactiva en la micro-

red AC se utilizó un controlador DAPI, debido a que el límite de variables que se podían transmitir por la red de comunicación no fue suficiente para utilizar una estrategia DMPC. Con respecto al montaje experimental, éste está situado en el laboratorio de Control de Micro-redes y consta de una micro-red AC y otra DC, cada una con tres unidades de generación distribuida que son emuladas por módulos de electrónica de potencia de la empresa Triphase. Además, una unidad Triphase se utiliza como *interlinking converter* (ILC), con el fin de conectar eléctricamente ambas micro-redes y lograr el control y transferencia de potencia activa entre ellas. Los demás elementos de la micro-red híbrida, tales como las inductancias, resistencias, cargas y elementos de protección se ubican en dos gabinetes, uno para cada micro-red. Por último, la red de comunicación es por medio de fibra óptica y se realiza de manera bidireccional, en donde todas las unidades del lado AC están comunicadas entre sí al igual que las unidades del lado DC y, además, una unidad de cada lado está comunicada con el ILC.

Los resultados obtenidos a partir de la estrategia de control propuesta abarcan dos tipos de escenarios: impactos de carga y retardo en la red de comunicación. Los resultados muestran que en ambos escenarios se logra restaurar a su valor nominal la frecuencia de las unidades de la micro-red AC y la tensión promedio de las unidades del lado DC, así como se logra el consenso de potencia activa proporcional entre todas las unidades de la micro-red híbrida AC/DC. Esto último mediante la transferencia de potencia activa por medio del *interlinking converter* (ILC) de manera bidireccional. Cabe destacar, que los impactos de carga afectan en mayor medida a la micro-red (AC o DC) en el que se realizó, sin embargo, esto no afecta al desempeño del controlador. Además, el tiempo de estabilización de las variables asociadas a los objetivos de control es de aproximadamente 25s, lo cual es mayor en comparación a lo obtenido por simulación, sin embargo, se debe tener en consideración que solo hay una unidad de cada lado comunicada con el ILC, en comparación a las tres que hay por simulación, y que se efectuó otra sintonización de los pesos asociados a los términos de la función objetivo de los controladores, lo cuál también afecta a la dinámica de la estrategia de control. Además, se debe tener en consideración, que el controlador utiliza modelos fenomenológicos que son una aproximación del comportamiento del sistema real, pero que pueden no incluir algunas dinámicas asociadas propias de dicho sistema. Por otro lado, los resultados también muestran que la estrategia de control propuesta logra los objetivos de control frente a retardos en la red de comunicación de hasta 0.8s. Esto último, debido a su esquema de horizonte deslizante, el cual actualiza la acción de control en cada período de muestreo, compensando los efectos del retardo. Cabe destacar, que esto depende de los horizontes de predicción y control, período de muestreo y retardo estimado $\hat{\tau}_{ij}$.

Capítulo 6

Conclusiones

A continuación, se presentan las principales conclusiones obtenidas a partir del desarrollo de esta tesis de magíster.

- En este trabajo se diseñó y evaluó una estrategia de control predictivo distribuido a nivel secundario en una micro-red híbrida AC/DC, con el objetivo de restaurar la frecuencia y voltaje promedio de las unidades de la micro-red AC y voltaje de las unidades de la micro-red DC, mientras se cumple con el objetivo que los GDs-ac compartan potencia reactiva de forma proporcional a sus capacidades máximas y con el consenso de potencia activa proporcional entre todas las unidades de la micro-red híbrida, por medio del control y transferencia de potencia activa de manera bidireccional a través de un Interlinkin Converter (ILC).
- Para obtener la consigna de potencia activa dada al ILC y así cumplir con el objetivo de consenso de potencia activa normalizada entre los GDs-ac y los GDs-dc, se propuso un controlador predictivo centralizado. Este último fue validado tanto por simulación como de manera experimental.
- Los resultados obtenidos a partir del controlador predictivo distribuido secundario aplicado a la micro-red AC muestran que la frecuencia y tensión promedio de la micro-red logran restaurarse a su valor nominal, mientras se cumple el consenso de potencia activa y reactiva normalizada entre las unidades obteniendo, además, una buena respuesta transiente en dichas variables, la cual se puede mejorar sintonizando de forma más precisa los pesos asociados a la función de costo de cada controlador.
- Los resultados obtenidos a partir del controlador predictivo distribuido secundario aplicado a la micro-red DC muestran que el voltaje promedio de los GDs-dc logra restaurarse a su valor nominal, mientras se cumple el consenso de potencia normalizada entre las unidades. A pesar de esto, se recalca que existe un *trade-off* en el cumplimiento de ambos objetivos, el cual se sintoniza por medio de los pesos asociados a cada objetivo de control, en la función de costo del controlador de cada unidad. Por otro lado, se observa que la respuesta transiente del consenso de potencia y regulación de tensión DC presentan leves sobre oscilaciones con bajo tiempo de establecimiento.

- Los resultados obtenidos a partir del controlador predictivo aplicado al ILC muestran que se logra el consenso de potencia activa normalizada entre todas las unidades de la micro-red híbrida AC/DC. Para esto, se procedió a comunicar al menos una unidad de la micro-red AC y al menos una unidad de la micro-red DC con el ILC, esto con el fin que el controlador no actúe en el caso que se presente una falla en la comunicación con el ILC o que éste se desconecte de la micro-red híbrida. Además, el controlador no solo se caracteriza por utilizar en la función objetivo un término asociado al consenso de potencia activa, sino que también considera otro término asociado a la variación de la acción de control, que en particular, al aplicar un integrador, viene siendo la consigna de potencia activa dada al ILC. Otra característica importante es que en las restricciones se pueden considerar límites máximo y mínimo tanto de la potencia transferida por el ILC como de la variación de la acción de control.
- La estrategia DMPC propuesta aplicada a una micro-red híbrida se validó experimentalmente por medio de dos escenarios: impacto/ desconexión de cargas, y retardo en la red de comunicación. Además, para complementar dichos resultados, se procedió a validar dicha estrategia por simulación por medio de tres escenarios: impactos de carga, capacidad *plug-and-play* y retardo en la red de comunicación.

Con respecto al primer escenario, los resultados muestran que, ante cualquier evento, la estrategia de control propuesta permite cumplir con los objetivos de control. Con respecto al segundo escenario, los resultados muestran que, a pesar de aumentar el retardo, la estrategia de control permite cumplir con los objetivos de control de asociados a la regulación de las variables de cada micro-red y consenso de potencia activa y reactiva normalizadas, esto incluso considerando un retardo de hasta 0.8s. La buena respuesta del controlador radica en que permite compensar el retardo mediante los horizontes de control y predicción deslizantes, el período de muestreo del secundario y la estimación del retardo $\hat{\tau}_{ij}$. Con respecto al tercer escenario, los resultados muestran que frente a la desconexión y posterior reconexión de unidades tanto del lado AC como del lado DC, la estrategia de control permite cumplir con los objetivos de control de las unidades que están conectadas a la micro-red híbrida.

- Por último, un aspecto que es importante destacar y que es más evidente en los resultados experimentales, es que la dinámica de cada micro-red híbrida queda condicionada a la sintonización de los pesos de los controladores, lo cual se efectúa heurísticamente, como también a la dinámica del ILC, ya que el consenso de potencia activa en las unidades de cada lado es más rápido que el consenso de potencia activa entre las unidades del lado AC y del lado DC. Esto último se puede mejorar enmallando aún más la red de comunicaciones entre las unidades de ambos lados y el ILC, así como una comunicación directa entre unidades AC y unidades DC, ya que el controlador local de cada unidad recibirá información de más unidades por lo que la respuesta dinámica será más rápida.

6.1. Trabajo futuro

Los trabajos futuros que se desprenden a partir de esta tesis son los siguientes:

- Validar tanto por simulación como experimentalmente la estrategia de control propuesta

utilizando más de un Interlinking Converter (ILC).

- Estudiar el despacho óptimo de las unidades de la micro-red híbrida, para lo cual se puede usar como base este trabajo a nivel secundario y extender su formulación a un nivel de control terciario.
- Diseñar métodos para la sintonización de los pesos considerados en las funciones objetivos del DMPC propuesto.
- Analizar la estabilidad de la micro-red híbrida AC/DC con la estrategia DMPC propuesta.

Bibliografía

- [1] A.Gupta, S.Doolla and K.Chatterjee, '*Hybrid AC–DC Microgrid: Systematic Evaluation of Control Strategies*', IEEE Transactions on Smart Grid, vol.9, no.4, July 2018.
- [2] Department of Energy office of Electricity Delivery and Energy Reliability, '*Summary Report: 2012 DOE Microgrid Workshop*', Office of Electricity Delivery and Energy Reliability Smart Grid R&D Program, Tech. Rep., 2012.
- [3] G.S.Rawat and Sathans, '*Survey on DC microgrid architecture, power quality issues and control strategies*', in 2018 2nd Int. Conf. Inven. Syst. Control, no. Icisc. IEEE, jan 2018, pp. 500–505.
- [4] D.E.Olivares, A.Mehrzi-Sani, A.H.Etemadi, C.A.Cañizares, R.Iravani, M.Kazerani, A.H.Hajimaragha, O.Gomis-Bellmunt, M.Saeedifard, R.Palma-Behnke, G.A.Jiménez-Estévez and N.D.Hatziargyriou, '*Trends in microgrid control*', IEEE Transactions on Smart Grid, vol.5, no.4, pp.1905-1919, 2014.
- [5] S.K.Sahoo, A.K.Sinha and N.K.Kishore, '*Control Techniques in AC, DC, and Hybrid AC-DC Microgrid: A Review*', IEEE Journal of Emerging and Selected Topic in Power Electronics, vol.6, no.2, June 2018.
- [6] D.Kumar, F.Zare and A.Ghosh, '*DC Microgrid Technology: System Architectures, AC Grid Interfaces, Grounding Schemes, Power Quality, Communication Networks, Applications, and Standardizations Aspects*', IEEE Special Section on Power Quality and Harmonics Issues of Future and Smart Grids, July 2017.
- [7] F.Nejabatkhah and Y.W.Li, '*Overview of Power Management Strategies of Hybrid AC/DC Microgrid*', IEEE Transactions on Power Electronics, vol.30, no.12, December 2015.
- [8] J.M.Guerrero, J.C.Vasquez, J.Matas, L.García de Vicuña and M.Castilla, '*Hierarchical Control of Droop-Controlled AC and DC Microgrids—A General Approach Toward Standardization*', IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol.58, no.1, January 2011.
- [9] Q.Shafiee, J.M.Guerrero and J.C.Vasquez, '*Distributed Secondary Control for Islanded Microgrids—A Novel Approach*', IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol.29, no.2, February 2014.

- [10] E. F. Camacho and C. Bordons, 'Introduction to Model Predictive Control,' in *Model Predictive control*, 2nd ed., ser. Advanced Textbooks in Control and Signal Processing. London: Springer London, 2007, no. december, ch. 7, pp. 177–216.
- [11] X.Wang, J.M.Guerrero, Z.Chen and F.Blaabjerg, '*Distributed Energy Resources in Grid Interactive AC Microgrids*', IEEE International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems, 2010.
- [12] J.Rocabert, A.Luna, F.Blaabjerg and P.Rodríguez, '*Control of Power Converters in AC Microgrids*', IEEE Transactions on Power Electronics, vol.27, no.11, November 2012.
- [13] IEEE Power and Energy Society, '*IEEE Standard for the Specification of Micro-grid Controllers*', pp. 1-42, 2017.
- [14] J.C.Vasquez, J.M.Guerrero, M.Savaghebi, J.Eloy-Garcia and R.Teodorescu, '*Modeling, Analysis, and Design of Stationary-Reference-Frame Droop-Controlled Parallel Three-Phase Voltage Source Inverters*', IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol.60, no.4, April 2013.
- [15] Y.Han, H.Li, P.Shen, E.A.A.Coelho and J.M.Guerrero, '*Review of Active and Reactive Power Sharing Strategies in Hierarchical Controlled Microgrids*', IEEE Trans. Power Electron., vol.32, no.3, pp. 2427-2451, Mar 2017.
- [16] J.M.Guerrero, J.C.Vasquez, J.Matas, M.Castilla and L.García de Vicuña, '*Control Strategy for Flexible Microgrid Based on Parallel Line-Interactive UPS Systems*', IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol.5, no.3, March 2009.
- [17] K. De Brabandere, B.Bolsens, J. Van den Keybus, A.Woyte, J.Driesen and R.Belmans, '*A Voltage and Frequency Droop Control Method for Parallel Inverters*', IEEE Transactions on Power Electronics, vol.22, no.4, July 2007.
- [18] J.M.Guerrero, L.García de Vicuña, J.Matas, M.Castilla and J.Miret, '*Output Impedance Design of Parallel-Connected UPS Inverters With Wireless Load-Sharing Control*', IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol.52, no.4, August 2005.
- [19] A.Bidram and A.Davoudi, '*Hierarchical Structure of Microgrids Control System*', IEEE Transactions on Smart Grid, vol.3, no.4, December 2012.
- [20] X.Feng, A.Shekhar, F.Yang, R.E.Hebner and P.Bauer, '*Comparison of hierarchical control and distributed control for microgrid*', Electric Power Components and Systems, vol.45, no.10, pp. 1043-1056, 2017.
- [21] Y.Han, K.Zhang, H.Li, E.A.A.Coelho and J.M.Guerrero, '*MAS-Based Distributed Coordinated Control and Optimization in Micro-red and Micro-red Clusters: A Comprehensive Overview*', IEEE Trans. Power Electron., vol.33, no.8, pp. 3520-3533, apr 2018.
- [22] M.Cintuglu, T.Youssef and O.Mohammed, '*Development and Application of a Real-Time Testbed for Multiagent System Interoperability: A Case Study on Hierarchical Microgrid Control*', IEEE Transactions on Smart Grid, vol.9, no.3, May 2018.

- [23] M.G.Jahromi, G.Mirzaeva, S.D.Mitchell and D.J.Gay, '*DC power vs AC power for mobile mining equipment*', Conferencer Paper, October 2014.
- [24] Y.Xia, W.Weil, M.Yu, X.Wang and Y.Peng, '*Power Management for a Hybrid AC/DC Microgrid With Multiple Subgrids*', IEEE Transactions on Power Electronics, vol.33, no.4, April 2018.
- [25] M.Hosseinzadeh and F.R.Salmasi, '*Robust Optimal Power Management System for a Hybrid AC/DC Micro-grid*', IEEE Transactions on Sustainable Energy, vol.6, no.3, July 2015.
- [26] M.Manbachi and M.Ordonez, '*AMI-Based Energy Management for Islanded AC/DC Microgrids Utilizing Energy Conservation and Optimization*', IEEE Transactions on Smart Grid, vol.10, no.1, January 2019.
- [27] P.C.Loh, D.Li, Y.K.Chai and F.Blaabjerg, '*Autonomous Operation of Hybrid Microgrid With AC and DC Subgrids*', IEEE Transactions on Power Electronics, vol.28, no.5, May 2013.
- [28] M.J.Rana and M.A.Abido, '*Energy Management in DC microgrid with energy storage and model predictive controlled AC-DC converter*', IET Generation, Transmission and Distribution, vol.11, July 2017.
- [29] A.Bidram, A.Davoudi, F.L.Lewis and J.M.Guerrero, '*Distributed Cooperative Secondary Control of Microgrids Using Feedback Linearization*', IEEE Transactions on Power Systems, vol.28, no.3, August 2013.
- [30] F.Guo, C.Wen, J.Mao and Y.D.Song, '*Distributed Secondary Voltage and Frequency Restoration Control of Droop-Controlled Inverter-Based Microgrids*', IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol.62, no.7, July 2015.
- [31] Q.Shafiee, J.C.Vásquez and J.M.Guerrero, '*Distributed Secondary Control for Islanded Microgrids - A Networked Control Systems Approach*', IECON 2012 - 38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society, October 2012.
- [32] J.Simpson-Porco, Q.Shafiee, F.Dorfler, J.C.Vásquez, J.M.Guerrero and F.Bullo, '*Secondary Frequency and Voltage Control of Islanded Microgrids via Distributed Averaging*', IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol.62, no.11, November 2015.
- [33] B.Weil, Y.Gui, S.Trujillo, J.M.Guerrero and J.C.Vásquez, '*Distributed average integral secondary control for modular ups systems-based microgrids*', IEEE Transactions on Power Electronics, vol.34, no.7, July 2019.
- [34] X.Lu, J.M.Guerrero, K.Sun and J.C.Vásquez, '*An Improved Droop Control Method for DC Microgrids Based on Low Bandwidth Communication With DC Bus Voltage Restoration and Enhanced Current Sharing Accuracy*', IEEE Transactions on Power Electronics, vol.29, no.4, April 2014.
- [35] P.Wang, X.Lu, X.Yang, W.Wang and D.Xu, '*An Improved Distributed Secondary Control*

- Method for DC Microgrids With Enhanced Dynamic Current Sharing Performance*, IEEE Transactions on Power Electronics, vol.31, no.9, September 2016.
- [36] S.Anand, B.G.Fernandes and J.M.Guerrero, *'Distributed Control to Ensure Proportional Load Sharing and Improve Voltage Regulation in Low-Voltage DC Microgrids'*, IEEE Transactions on Power Electronics, vol.28, no.4, April 2013.
- [37] V.Nasirian, A.Davoudi, F.Lewis and J.M.Guerrero, *'Distributed Adaptive Droop Control for DC Distribution Systems'*, IEEE Transactions on Energy Conversion, vol.29, no.4, December 2014.
- [38] V.Nasirian, S.Moayedi, A.Davoudi and F.Lewis, *'Distributed Cooperative Control of DC Microgrids'*, IEEE Transactions on Power Electronics, vol.30, no.4, April 2015.
- [39] E.Espina, R.Cárdenas, F.Donosó, M.Urrutia and M.Espinoza, *'A Novel Distributed Secondary Control Strategy Applied to Hybrid AC/DC Microgrids'*, 21st European Conference on Power Electronics and Applications, EPE 2019 ECCE Europe, 2019.
- [40] P.C.Loh, D.Li, Y.K.Chai and F.Blaabjerg, *'Autonomous Control of Interlinking Converter With Energy Storage in Hybrid AC-DC Microgrid'*, IEEE Transactions on Industry Applications, vol.49, no.3, May/June 2013.
- [41] H.J.Yoo, T.T.Nguyen and H.M.Kim, *'Consensus-based Distributed Coordination Control of Hybrid AC/DC Microgrids'*, IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2019.
- [42] S.Peyghami, H.Mokhtari and F.Blaabjerg, *'Autonomous Operation of a Hybrid AC/DC Microgrid With Multiple Interlinking Converters'*, IEEE Transactions on Smart Grid, vol.9, no.6, November 2018.
- [43] P.C.Loh, D.Li, Y.K.Chai and F.Blaabjerg, *'Hybrid AC-DC Microgrids With Energy Storages and Progressive Energy Flow Tuning'*, IEEE Transactions on Power Electronics, vol.28, no.4, April 2013.
- [44] P.Wang, Chi Jin, D.Zhu, Yi Tang, P.C.Loh and F.H.Choo, *'Distributed Control for Autonomous Operation of a Three-Port AC/DC/DS Hybrid Microgrid'*, IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol.62, no.2, February 2015.
- [45] P.Christofides, R.Scattolini, D. Muñoz de la Peña and J.Liu, *'Distributed model predictive control: A tutorial review and future research directions'*, Computers and Chemical Engineering, vol. 51, pp. 21–41, April 2013.
- [46] C.Ahumada, R.Cárdenas, D.Sáez and J.M.Guerrero, *'Secondary Control Strategies for Frequency Restoration in Islanded Microgrids With Consideration of Communication Delays'*, IEEE Transactions on Smart Grids, vol.7, no.3, May 2016.
- [47] G.Lou, Y.Xu, M.Cheng and W.Liu, *'Distributed MPC-Based Secondary Voltage Control Scheme for Autonomous Droop-Controlled Microgrids'*, IEEE Transactions on Sustainable Energy, vol.8, no.2, April 2017.

- [48] G.Lou, W.Gu, W.Sheng, X.Song and F.Gao, '*Distributed Model Predictive Secondary Voltage Control of Islanded Microgrids With Feedback Linearization*', IEEE Access, vol. 6, pp. 50 169–50 178, 2018.
- [49] K.Liu, T.Liu, Z.Tang and D.J.Hill, '*Distributed mpc-based frequency control in networked microgrids with voltage constraints*', IEEE Transactions on Smart Grid, pp.1-1, 2019.
- [50] J.S.Gómez, D.Sáez, J.W.Simpson-Porco and R.Cárdenas, '*Distributed Predictive Control for Frequency and Voltage Regulation in Microgrids*', IEEE Transactions on Smart Grid, vol.11, no.2, March 2020.
- [51] J.S.Gómez, '*Distributed predictive control for frequency and voltage regulation in microgrids*', Ph.D. dissertation, University of Chile - Electrical Engineering Department, 2020. [Online]. Available: <http://repositorio.uchile.cl/handle/2250/173842>
- [52] O.Abdel-Rahim, H.Funato and H.Junnosuke, '*Droop method based on model predictive control for DC microgrid*', 2016 19th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS).
- [53] T.V.Vu, S.Paran, F.Diaz, T. El Meyzani and C.S.Edrington, '*Model predictive control for power control in islanded DC microgrids*', IECON 2015 - 41st Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society.
- [54] M.Yu, Y.Wang and Y.Yi, '*Hierarchical Control of DC Microgrid Based on Model Predictive Controller*', IECON 2016 - 42nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society.
- [55] F.Garcia-Torres, C.Bordons and M.A.Ridao, '*Optimal Economic Schedule for a Network of Microgrids With Hybrid Energy Storage System Using Distributed Model Predictive Control*', IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol.66, no.3, March 2019.
- [56] R.Wai, Q.Zhang and Y.Wang, '*A novel voltage stabilization and power sharing control method based on virtual complex impedance for an off-grid microgrid*', IEEE Transactions on Power Electronics, vol.34, no.2, pp.1863-1880, Feb 2019.
- [57] W.Ren, R.W.Beard and E.M.Atkins, '*Information consensus in multivehicle cooperative control*', IEEE Control Systems Magazine, vol.27, no.2, pp.71-82, 2007.
- [58] P.Kundur, '*Power System Stability and Control*', McGraw-Hill, 01 1994, vol.7.
- [59] A.E.Leon and J.A.Solsona, '*Design of reduced-order nonlinear observers for energy conversion applications*', IET Control Theory Applications, vol.4, no.5, pp.724-734, May 2010.
- [60] F.Bullo, '*Lectures on Network Systems*', in Lect. Netw. Syst. Version 0.96, 2018, ch.4, pp.47-61, with contributions by J.Cortes, F.Dorfler, and S.Martinez.
- [61] Y.B.Zhao, X.M.Sun, J.Zhang and P.Shi, '*Networked Control Systems: The Communication Basics and Control Methodologies*', Math. Probl. Eng., vol. 2015, pp. 1-9, 2015.

[62] Triphase. [Online]. Available: <https://triphase.com/products/>

[63] Microgrids Control Laboratory, University of Chile. [Online]. Available: <http://microgrids.ing.uchile.cl/>

Capítulo 7

Anexo

7.1. Observador no lineal de estado reducido

En esta sección se presenta el diseño de un observador no lineal de estado reducido, basado en el trabajo hecho en [59], el cual es utilizado en la subsección 3.2.2 para estimar el voltaje ($\hat{V}_{ac,i}^L$) a la salida de la inductancia de acople (L_i). Luego a dicho voltaje se le aplica un PLL, con el fin de estimar la frecuencia ($\hat{\omega}_i^L$) y ángulo de fase ($\hat{\theta}_i^L$). La principal ventaja de este observador es su dinámica lineal para el error de estimación. Por lo tanto, las ganancias del observador pueden ajustarse mediante el ajuste del polo, mejorando el rendimiento en el transitorio del observador y la tasa de convergencia del error de estimación.

Considérese una clase de sistema no lineal dado por

$$\dot{x} = F(x_a, u)x + g(x_a, u) \quad (7.1)$$

donde $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^{n \times 1}$ es el vector de estado y $\mathbf{u} \in \mathbb{R}^{m \times 1}$ es el vector de entradas, con $\mathbf{F} \in \mathbb{R}^{n \times n}$ y $\mathbf{g} \in \mathbb{R}^{n \times 1}$. El vector de estado es particionado como $\mathbf{x} = [\mathbf{x}_a \mathbf{x}_b]^T$, donde $\mathbf{x}_a \in \mathbb{R}^{n_a \times 1}$ contiene las variables medibles y $\mathbf{x}_b \in \mathbb{R}^{n_b \times 1}$ contiene las variables no medibles. La ecuación 7.1 puede ser reescrita como:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_a \\ \dot{x}_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} N(x_a, u) & M(x_a, u) \\ R(x_a, u) & S(x_a, u) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_a \\ x_b \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} g_a(x_a, u) \\ g_b(x_a, u) \end{bmatrix}$$

Se define $\mathbf{T} : \mathbb{R}^{n_a} \rightarrow \mathbb{R}^p$ como una transformación dependiente de las variables medidas.

$$w = T(x_a) \quad (7.2)$$

donde $\mathbf{w} \in \mathbb{R}^{p \times 1}$. Luego, diferenciando 7.2 con respecto al tiempo resulta en lo siguiente:

$$\dot{w} = \frac{\partial T}{\partial x_a}(Nx_a + Mx_b + g_a) \quad (7.3)$$

De 7.3 es posible escribir

$$y = Cx_b \quad (7.4)$$

donde se aplican las siguientes definiciones

$$y \triangleq \dot{w} - \frac{\partial T}{\partial x_a}(Nx_a + g_a) \quad (7.5)$$

$$C \triangleq \frac{\partial T}{\partial x_a}M \quad (7.6)$$

\dot{x}_b describe la dinámica de las variables no medibles, mientras que la ecuación 7.5 sirve como una ecuación de salida del nuevo subsistema. Por lo tanto, un observador de Luenberger puede ser usado para estimar las variables no medibles \mathbf{x}_b . De esta forma

$$\dot{\hat{x}}_b = S\hat{x}_b + Rx_a + g_b + G(y - C\hat{x}_b) \quad (7.7)$$

donde $\mathbf{G} \in \mathbb{R}^{n_b \times p}$ es la matriz de ganancia del observador. El término de corrección permite fijar una tasa de convergencia y rechazar/corregir dinámicas paramétricas.

Sustituyendo 7.5 y 7.6 en 7.7 resulta

$$\dot{\hat{x}}_b = A_r\hat{x}_b + B_r + G\dot{w} \quad (7.8)$$

donde \mathbf{A}_r y \mathbf{B}_r son representados en 7.9 y 7.10, respectivamente.

$$A_r \triangleq S - G \frac{\partial T}{\partial x_a}M \quad (7.9)$$

$$B_r \triangleq Rx_a + g_b - G \frac{\partial T}{\partial x_a}(Nx_a + g_a) \quad (7.10)$$

Para evitar la amplificación del ruido debido a la diferenciación de la variable medida, se aplica una transformación en 7.11

$$\xi \triangleq \hat{x}_b - Gw \quad (7.11)$$

donde $\xi \in \mathbb{R}^{n_b \times 1}$ y su derivada temporal es presentada en 7.12

$$\dot{\xi} \triangleq \dot{\hat{x}}_b - G\dot{w} \quad (7.12)$$

La estructura final del observador es presentada en 7.13 reescribiendo 7.8 y considerando 7.12.

$$\dot{\xi} = A_r(\xi + Gw) + B_r \quad (7.13)$$

$$\hat{x}_b = \xi + Gw \quad (7.14)$$

7.1.1. Aplicación

El observador mostrado anteriormente es utilizado para estimar el voltaje ($\hat{V}_{ac,i}^L$) después de la inductancia de acople (L_i) tal como se muestra en la figura 7.1.

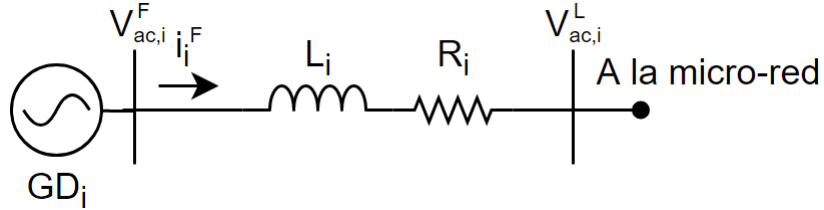


Figura 7.1: Circuito eléctrico de salida de cada unidad de la micro-red AC.

El observador es utilizado en un sistema de referencia $\alpha - \beta$, en donde se define $\hat{V}_{\alpha ac,i}^L = V_m \sin(\theta_i)$ y $\hat{V}_{\beta ac,i}^L = V_m \cos(\theta_i)$. Estas expresiones son derivadas resultando en los siguientes estados estimados:

$$\dot{\hat{V}}_{\alpha ac,i}^L = V_m \omega_0 \cos(\theta_i) = \omega_0 \hat{V}_{\beta ac,i}^L \quad (7.15)$$

$$\dot{\hat{V}}_{\beta ac,i}^L = -V_m \omega_0 \sin(\theta_i) = -\omega_0 \hat{V}_{\alpha ac,i}^L \quad (7.16)$$

Al aplicar la segunda ley de Kirchhoff en la figura 7.1 se obtienen las siguientes expresiones que representan los estados medidos:

$$L_i \dot{i}_\alpha^F = -R i_\alpha^F + V_\alpha^F - V_\alpha^L \quad (7.17)$$

$$L_i \dot{i}_\beta^F = -R i_\beta^F + V_\beta^F - V_\beta^L \quad (7.18)$$

Luego, si se expresan las ecuaciones 7.17 y 7.18 en la forma requerida del observador, se puede ver explícitamente los estados medidos y los estados estimados x_a y x_b respectivamente.

$$\underbrace{\begin{bmatrix} \dot{i}_\alpha^F \\ \dot{i}_\beta^F \end{bmatrix}}_{\dot{x}_a} = \underbrace{\begin{bmatrix} -\frac{R_i}{L_i} & 0 \\ 0 & -\frac{R_i}{L_i} \end{bmatrix}}_N \underbrace{\begin{bmatrix} i_\alpha^F \\ i_\beta^F \end{bmatrix}}_{x_a} + \underbrace{\begin{bmatrix} -\frac{1}{L_i} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{L_i} \end{bmatrix}}_M \underbrace{\begin{bmatrix} V_\alpha^L \\ V_\beta^L \end{bmatrix}}_{x_b} + \underbrace{\begin{bmatrix} \frac{V_\alpha^F}{L_i} \\ \frac{V_\beta^F}{L_i} \end{bmatrix}}_{g_a}$$

$$\underbrace{\begin{bmatrix} \dot{V}_\alpha^F \\ \dot{V}_\beta^F \end{bmatrix}}_{\dot{x}_b} = \underbrace{\begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}}_R \underbrace{\begin{bmatrix} i_\alpha^F \\ i_\beta^F \end{bmatrix}}_{x_a} + \underbrace{\begin{bmatrix} 0 & \omega_0 \\ -\omega_0 & 0 \end{bmatrix}}_S \underbrace{\begin{bmatrix} V_\alpha^L \\ V_\beta^L \end{bmatrix}}_{x_b} + \underbrace{\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}}_{g_b}$$

Luego se procede a obtener la matriz \mathbf{A}_r que representa la dinámica del error de estimación. Para esto, la ecuación 7.9 es adaptada a la posición deseada de los polos tal como se muestra en la siguiente ecuación. Por otro lado, la ganancia del observador ($g_{v_{ac}^L}$) fue elegida localizando los polos tal que el observador sea capaz de seguir la fase de los voltajes estimados. Por último, esta ganancia ($g_{v_{ac}^L}$) fue localizada en -20000.

$$A_r = \begin{bmatrix} 0 & \omega_0 \\ -\omega_0 & 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} g_{v_{ac}^L} & 0 \\ 0 & g_{v_{ac}^L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial \omega_1}{\partial i_\alpha^F} & \frac{\partial \omega_1}{\partial i_\beta^F} \\ \frac{\partial \omega_2}{\partial i_\alpha^F} & \frac{\partial \omega_2}{\partial i_\beta^F} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -\frac{1}{L_i} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{L_i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -g_{v_{ac}^L} & 0 \\ 0 & -g_{v_{ac}^L} \end{bmatrix}$$

donde \mathbf{w} es una transformación para obtener una dinámica lineal del error. Ésta transformación es obtenida resolviendo el sistema de ecuaciones en derivadas parciales como el que se presenta a continuación.

$$w = T(x_a) = \begin{bmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -L_i(i_\alpha^F + \frac{\omega_0 i_\beta}{g_{v_{ac}^L}}) \\ -L_i(i_\beta^F - \frac{\omega_0 i_\alpha}{g_{v_{ac}^L}}) \end{bmatrix}$$