



Universidad
de Alcalá

COMISIÓN DE ESTUDIOS OFICIALES
DE POSGRADO Y DOCTORADO

ACTA DE EVALUACIÓN DE LA TESIS DOCTORAL

Año académico 2016/17

DOCTORANDO: **GIRÓN CASARES, CARLOS**
D.N.I./PASAPORTE: ****555D

PROGRAMA DE DOCTORADO: **D332 DOCTORADO EN ELECTRÓNICA: SISTEMAS ELECTRÓNICOS AVANZADOS. SISTEMAS INTELIGEN**
DEPARTAMENTO DE: **ELECTRÓNICA**
TITULACIÓN DE DOCTOR EN: **DOCTOR/A POR LA UNIVERSIDAD DE ALCALÁ**

En el día de hoy 13/07/17, reunido el tribunal de evaluación nombrado por la Comisión de Estudios Oficiales de Posgrado y Doctorado de la Universidad y constituido por los miembros que suscriben la presente Acta, el aspirante defendió su Tesis Doctoral, elaborada bajo la dirección de FRANCISCO JAVIER RODRÍGUEZ SÁNCHEZ // EMILIO J. BUENO PEÑA.

Sobre el siguiente tema: *ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DE LAS REDES DE COMUNICACIÓN EN LAS REDES INTELIGENTES DE ENERGÍA*

Finalizada la defensa y discusión de la tesis, el tribunal acordó otorgar la CALIFICACIÓN GLOBAL² de (no apto, aprobado, notable y sobresaliente): Sobresaliente.

Alcalá de Henares, 13 de Julio de 2017

EL PRESIDENTE

EL SECRETARIO

EL VOCAL

Fdo.: [Firma]

Fdo.: Miguel Pradomovic

Fdo.: Roberto García Flores

Con fecha 24 de Julio de 2017 la Comisión Delegada de la Comisión de Estudios Oficiales de Posgrado, a la vista de los votos emitidos de manera anónima por el tribunal que ha juzgado la tesis, resuelve:

- Conceder la Mención de "Cum Laude"
 No conceder la Mención de "Cum Laude"

FIRMA DEL ALUMNO,

La Secretaria de la Comisión Delegada

Fdo.: CARLOS GIRON CASARES.

² La calificación podrá ser "no apto" "aprobado" "notable" y "sobresaliente". El tribunal podrá otorgar la mención de "cum laude" si la calificación global es de sobresaliente y se emite en tal sentido el voto secreto positivo por unanimidad.

INCIDENCIAS / OBSERVACIONES:



Faint, illegible text at the bottom of the page, possibly bleed-through from the reverse side. The text is too light to transcribe accurately but appears to contain several lines of a document.

En aplicación del art. 14.7 del RD. 99/2011 y el art. 14 del Reglamento de Elaboración, Autorización y Defensa de la Tesis Doctoral, la Comisión Delegada de la Comisión de Estudios Oficiales de Posgrado y Doctorado, en sesión pública de fecha 24 de julio, procedió al escrutinio de los votos emitidos por los miembros del tribunal de la tesis defendida por *GIRÓN CASARES, CARLOS*, el día 13 de julio de 2017, titulada *ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DE LAS REDES DE COMUNICACIÓN EN LAS REDES INTELIGENTES DE ENERGÍA*, para determinar, si a la misma, se le concede la mención "cum laude", arrojando como resultado el voto favorable de todos los miembros del tribunal.

Por lo tanto, la Comisión de Estudios Oficiales de Posgrado resuelve otorgar a dicha tesis la

MENCIÓN "CUM LAUDE"

Alcalá de Henares, 27 julio de 2017
EL PRESIDENTE DE LA COMISIÓN DE ESTUDIOS
OFICIALES DE POSGRADO Y DOCTORADO



Firmado digitalmente por VELASCO
PEREZ JUAN RAMON - DNI
03087239H
Fecha: 2017.07.28 11:15:41 -06'00'

Juan Ramón Velasco Pérez

Copia por e-mail a:

Doctorando: GIRÓN CASARES, CARLOS

Secretario del Tribunal: MILAN PRODANOVIC.

Directores de Tesis: FRANCISCO JAVIER RODRÍGUEZ SÁNCHEZ // EMILIO J. BUENO PEÑA



Universidad
de Alcalá

ESCUELA DE DOCTORADO
Servicio de Estudios Oficiales de
Posgrado

DILIGENCIA DE DEPÓSITO DE TESIS.

Comprobado que el expediente académico de D./D^a _____
reúne los requisitos exigidos para la presentación de la Tesis, de acuerdo a la normativa vigente, y habiendo
presentado la misma en formato: soporte electrónico impreso en papel, para el depósito de la
misma, en el Servicio de Estudios Oficiales de Posgrado, con el nº de páginas: _____ se procede, con
fecha de hoy a registrar el depósito de la tesis.

Alcalá de Henares a _____ de _____ de 20 _____



Fdo. El Funcionario



Programa de Doctorado en Electrónica: Sistemas
Electrónicos Avanzados. Sistemas Inteligentes.

ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DE LAS REDES DE COMUNICACIÓN EN LAS REDES INTELIGENTES DE ENERGÍA

Tesis doctoral presentada por

CARLOS GIRÓN CASARES

Directores:

Dr. Francisco Javier Rodríguez Sánchez

Dr. Emilio José Bueno Peña

Alcalá de Henares, Abril 2017

Dr. Sira Elena Palazuelos Cagigas, Directora del Departamento de Electrónica de la Universidad de Alcalá,

INFORMA: Que la Tesis Doctoral titulada “**Estudio De La Influencia De Las Redes De Comunicación En Las Redes Inteligentes De Energía**” presentada por D. Carlos Girón Casares, y dirigida por los doctores D. Francisco Javier Rodríguez Sánchez y D. Emilio José Bueno Peña, cumple con todos los requisitos científicos y metodológicos, para ser defendida ante un Tribunal, según lo indicado por la Comisión Académica del Programa de Doctorado.

Alcalá de Henares, 6 de Abril de 2017



Fdo. Sira Elena Palazuelos Cagigas



Dr. Francisco Javier Rodríguez Sánchez, Catedrático de la Universidad Alcalá, y
Dr. Emilio José Bueno Peña, Profesor Titular de la Universidad de Alcalá

INFORMAN: Que la Tesis Doctoral titulada “**Estudio De La Influencia De Las Redes De Comunicación En Las Redes Inteligentes De Energía**” presentada por D. Carlos Girón Casares, y realizada bajo la dirección de los doctores D. Francisco Javier Rodríguez Sánchez y D. Emilio José Bueno Peña, dentro del campo de la aplicación de las redes de energía y de comunicación, reúne los méritos de calidad y originalidad para optar al Grado de Doctor.

Alcalá de Henares, 17 de Marzo de 2017

Fdo. Francisco Javier Rodríguez Sánchez

Fdo. Emilio José Bueno Peña

Resumen

Las Redes Inteligentes de Energía (RRII) deben garantizar la calidad y la disponibilidad de energía, así como los nuevos servicios destinados a los usuarios finales y a las compañías eléctricas. El soporte básico de las RRII son los sistemas de comunicación, cercanos al tiempo real, entre los sistemas de generación, consumo y control de la red eléctrica.

Esta tesis aborda, en primera instancia, un estudio sobre las necesidades de comunicaciones en los diferentes ámbitos de las RRII y las características de ancho de banda y latencia necesarias para dar soporte a la gran variedad de casos de uso que se pueden contemplar.

La problemática del modelado de los diferentes canales y medios físicos habituales en las comunicaciones de las RRII es siguiente objetivo de esta tesis. Cada canal tiene unos parámetros característicos que es preciso cuantificar, para analizar su idoneidad para los diferentes ámbitos de comunicación y funciones dentro de la red inteligente. La latencia, el ancho de banda, la variabilidad de estos a lo largo del tiempo y la disponibilidad, deben cumplir unos requisitos mínimos en función del ámbito de red y el caso de uso al que se destine. Se muestra cómo los parámetros de cada canal pueden ser modelados en el caso de que la red de datos sea conocida. Además, dado que en la mayoría de los casos la red de datos es heterogénea y compuesta de diferentes medios, en este trabajo, amén de analizar el comportamiento de los canales de comunicación más utilizados en las RRII, se propone un método de análisis que permite derivar las características principales del canal de comunicaciones.

En última instancia, esta tesis recoge un análisis de la influencia de las comunicaciones en dos casos de uso de gran importancia en las RRII, proponiendo y diseñando un entorno de pruebas, una metodología de análisis propia y ofreciendo alternativas para solventar los problemas que las comunicaciones introducen. En el primero ellos se estudia la influencia de las comunicaciones en los índices de calidad de la red eléctrica de distribución. El segundo caso aborda la influencia de las comunicaciones en el control, dentro de una red de área extensa, de un compensador estático trabajando como sistema de soporte de red eléctrica.

Agradecimientos

Quiero agradecer a toda la gente que a lo largo de estos años ha aportado algo a esta Tesis que, por insignificante que parezca, ha sido de ayuda. En especial:

Al Dr. Francisco Javier Rodríguez Sánchez por dirigir esta tesis y por todas sus aportaciones, consejos y pragmatismo. Tanto laboral como personalmente, la comprensión y el apoyo han sido magníficos en los buenos y en los malos momentos.

Al Dr. Emilio José Bueno Peña, por todo lo que he aprendido, y lo que me queda por aprender. Por contar conmigo una y otra vez. Por estar siempre dispuesto y por su trabajo incesante. Y por el apoyo personal que me ha dado.

A mis compañeros en el grupo de investigación GEISER y en el Departamento de Electrónica a lo largo de los años, que han contribuido a esta Tesis en una u otra medida. En especial al Dr. Francisco Huerta, Dr. Mario Rizo, Dra. Ana Rodríguez y Dr. Ángel Cano, por todas esas horas compartidas, por poner a prueba gran parte de este trabajo y por sus no pocas aportaciones.

Al Dr. Eric Monmasson y la gente del grupo SATIE, por acogerme, por su hospitalidad y por sus consejos durante mi estancia en Paris.

A mis amigos, Alfonso, Iván, Vero, Diego, Kike, y como seguro que me dejo a alguien, a ti. Por vuestra incondicionalidad.

A Pedro Revenga y Julio Pastor, por su apoyo y amistad.

A Natalia Rodríguez Llois, mi psicóloga. Por hacerme ver la realidad y avanzar, y ayudarme con los momentos más duros.

A mis padres, hermanos, mi familia, toda ella, por aguantarme, apoyarme, presionarme, educarme, quererme, aceptarme y un largo etcétera.

Alberto, por liberar mi mente en tantos momentos, por estar ahí.

A mi mujer, Ana, necesitaría un libro entero, y no lo terminaría antes de jubilarme. Ni después. Te quiero.

A toda esa gente que ha contribuido a que sea quien soy y esté donde estoy.

Gracias.

Glosario

Acrónimo	Español	Ingles
ADA	Automatización De La Distribución Avanzada	Advanced Distribution Automation
AMI	Infraestructura De Medida Avanzada	Advanced Metering Infrastructure
BAN	Red De Área De Edificio	Building Area Network
BT	Baja Tensión	
CAIDI	Índice de Duración Media de Interrupción de los Usuarios	Customer Average Interruption Duration Index
CAN	Red De Controladores De Area	Controller Area Network
CC	centro de control	
CEER	Consejo de Reguladores de Energía Europeos	Council of European Energy Regulators
CEN	Comité Europeo Para La Estandarización	Comité Européen de Normalisation
CENELEC	Comité Europeo De Normalización Electrotécnica	Comité Européen de Normalisation Electrotechnique
CPP	programas de precio pico crítico	Critic Peak Price
CT	Centros de transformación	
DER	Recursos De Energia Distribuidos	Distributed Energy Resources
DG	Generación Distribuida	Distributed Generation
DPF	Detección de Paso de Falta	
DPGS	Sistemas De Generación Distribuidos De Energía	Distributed Power Generation System
DR	Respuesta A La Demanda	Demand Response
DSP	Procesador Digital De Señal	Digital Signal Processor
ETSI	Instituto Europeo De Estandarización De Telecomunicaciones	The European Telecommunications Standards Institute
FAN	Red De Area De Campo	Field Area Network
FPGA	Array De Puertas Programables Por Campo	Field-programable gate array
HAN	Red De Área Domestica	Home Area Network
IAN	Red De Área Industrial	Industrial Area Network
IED	Dispositivos Electrónicos Inteligentes	Intelligent Electronic Device
IGMP	protocolo de gestión de grupos de Internet	Internet Group Management Protocol
IVR	Recursos Interactivos por Voz	Interactive Voice Resources
KF	Filtro De Kalman	Kalman Filter
LQ		Linear Quadratic
LQG		Linear Quadratic Gaussian
MDT	Tiempo Medio de Recuperación	Mean Down Time

MT	Media Tensión	
MTBF	tiempo medio entre fallos	Mean Time Between Failure
MTTF	tiempo medio hasta un fallo	Mean Time To Failure
NAN	Red De Área De Vecindario	Neighborhood Area Networks
NCS	Sistemas de control en red	Networked Control Systems
NIEPI	Número de Interrupciones Equivalente en Potencia Instalada	
NIST	Instituto Estadounidense Nacional De Estandares Y Tecnología	National Institute of Standards and Technology
NPC	Punto Común Unido	Neutral Point Clamped
PCC	punto de acoplamiento comun	Point of Common Coupling
PF	punto frontera	
PHEV	vehículos eléctricos híbridos enchufables	Plugable-in Hybrid Electric Vehicle
PLC	Portadora De Red Eléctrica	Power Line Carrier
PMU	Unidad De Medida De Fasores	Phasor Measurement Units
PRICE	Proyecto de Redes Inteligentes en el Corredor del HEnares	
RI	Red Inteligente	
RRII	Redes Inteligentes	
RTP	Precios En Tiempo Real	Real Time Price
SCADA	Control De Supervisión Y Adquisición De Datos	Supervisory Control And Data Acquisition
SGAM	Modelo Arquitectónico De La Red Inteligente	Smart Grid Architecture Model
STATCOM	Compensador estático	STATic COMPensator
TIC	Tecnologías De Información Y Comunicación	
TOU	tiempo de uso	Time Of Use
UPS	Fuentes De Alimentación Ininterrumpida	Uninterrupted Power Supply
VE	Vehículos Eléctricos	
VPN	Red Privada Virtual	Virtual Private Network
VSC	Convertidor en fuente de tension	Voltage Source Converter
WACS	sistema de control de area extensa	Wide Area Control System
WAMS	sistema de medida de area extensa	Wide Area Measurement System
WAN	Red De Área Extensa	Wide Area Network

Índice

RESUMEN	I
AGRADECIMIENTOS	III
GLOSARIO	V
ÍNDICE	VII
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	11
1.1 REDES INTELIGENTES DE ENERGÍA	11
1.1.1 <i>Funcionalidades de las RRLL</i>	16
1.2 MARCO DE DESARROLLO DE LA TESIS	24
1.3 PUBLICACIONES RELACIONADAS	26
1.3.1 <i>Artículos publicados en revistas</i>	26
1.3.2 <i>Trabajos en revisión</i>	28
1.4 ESTRUCTURA DEL DOCUMENTO.....	29
CAPÍTULO 2. ESTADO DEL ARTE Y OBJETIVOS	31
2.1 APLICACIONES DE REDES INTELIGENTES Y SUS TECNOLOGÍAS DE COMUNICACIÓN ASOCIADAS.....	31
2.1.1 <i>Tecnologías de información y comunicación para redes inteligentes</i>	31
2.1.2 <i>Requerimientos de las redes de comunicaciones en RRLL</i>	37
2.2 CONCLUSIONES Y PLANTEAMIENTO DE OBJETIVOS.....	43
2.2.1 <i>Análisis de los canales de comunicación</i>	44
2.2.2 <i>Estudio de la influencia de las características de la comunicación y la automatización en el cálculo de los índices de calidad eléctrica</i>	44
2.2.3 <i>Estudio de la influencia de las comunicaciones en las redes de monitorización y control de ámbito extendido, mediante el control remoto de convertidores de electrónica de potencia conectados a la red eléctrica</i>	45
CAPÍTULO 3. PROPUESTA DE ENTORNO DE PRUEBAS PARA COMUNICACIONES EN REDES INTELIGENTES 47	
3.1 INTRODUCCIÓN.....	47
3.2 CARACTERIZACIÓN DE CANALES.....	48
3.2.1 <i>Experimento para la caracterización de canales 3G/GPRS</i>	48
3.2.2 <i>Experimento de medida para la caracterización de canales ADSL</i>	49
3.2.3 <i>Experimento de medida para la caracterización de canales Ethernet</i>	50

3.2.4	<i>Experimento de medida para la caracterización de canales desconocidos de altas prestaciones extremo a extremo</i>	50
3.3	PRUEBAS SOBRE STATCOM	51
3.3.1	<i>Descripción del entorno</i>	53
3.3.2	<i>Sistema de adquisición, procesamiento y comunicación de primer nivel</i>	56
3.3.3	<i>Entorno de control y comunicación de segundo y tercer nivel</i>	56
3.4	DESCRIPCIÓN DE LOS ALGORITMOS DE CONTROL DE ALTO NIVEL DE UN STATCOM	59
3.4.1	<i>Descripción del esquema general</i>	59
3.4.2	<i>Descripción de los lazos de control</i>	59
3.4.3	<i>Simulador de canal de comunicaciones con pérdidas y latencia variable</i>	64
3.5	CONCLUSIONES	67
CAPÍTULO 4. ANÁLISIS DE LAS COMUNICACIONES		69
4.1	INTRODUCCIÓN	69
4.2	MODELADO DE LOS PARÁMETROS DEL CANAL DE COMUNICACIONES	72
4.2.1	<i>Definición de parámetros</i>	72
4.2.2	<i>Cálculo de la latencia</i>	73
4.2.3	<i>Fiabilidad</i>	81
4.3	CANALES ANALIZADOS	82
4.3.1	<i>Metodología empleada</i>	82
4.3.2	<i>Medidas</i>	84
4.4	RESULTADOS	96
4.4.1	<i>Características extraídas</i>	96
4.4.2	<i>Contraste del modelado de la latencia</i>	97
4.5	CONCLUSIONES	98
CAPÍTULO 5. INFLUENCIA DE LAS COMUNICACIONES EN LOS ÍNDICES DE CONTINUIDAD DE LA RED DE DISTRIBUCIÓN		101
5.1	INTRODUCCIÓN	101
5.2	DEFINICIONES	105
5.2.1	<i>Factores básicos</i>	106
5.2.2	<i>TIEPI</i>	106
5.2.3	<i>NIEPI</i>	106
5.2.4	<i>SAIDI</i>	107
5.2.5	<i>SAIFI</i>	107
5.2.6	<i>CAIDI</i>	107
5.3	EFFECTO DE LAS COMUNICACIONES SOBRE LOS INDICADORES DE CALIDAD	108
5.3.1	<i>Red de distribución prototipo</i>	108
5.3.2	<i>Escenarios de estudio</i>	111

5.3.3	<i>Procedimiento para el despeje de falta según los diferentes escenarios</i>	113
5.3.4	<i>Tiempos de actuación</i>	118
5.3.5	<i>Propuesta de metodología para incluir la influencia de las comunicaciones en el TIEPI</i>	121
5.4	CONCLUSIONES.....	129
CAPÍTULO 6. INFLUENCIA DE LAS COMUNICACIONES EN REDES WACS: EL CASO DEL STATCOM		133
6.1	INTRODUCCIÓN.....	133
6.1.1	<i>Concepto de WAMS/WACS</i>	133
6.2	ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DE LAS COMUNICACIONES (LATENCIA Y DISPONIBILIDAD) EN LOS LAZOS DE CONTROL PARA SOPORTE DE RED	134
6.2.1	<i>Problemática asociada a las comunicaciones en WAMS (NCS)</i>	134
6.2.2	<i>Influencia de las comunicaciones en la estabilidad</i>	137
6.3	PROPUESTA DE SOLUCIONES.....	138
6.3.1	<i>Metodología para la comparación de las soluciones propuestas</i>	138
6.3.2	<i>Modelado del efecto de las comunicaciones</i>	139
6.3.3	<i>Detección de fallo en las comunicaciones</i>	140
6.3.4	<i>Saturación del controlador</i>	143
6.3.5	<i>Recuperación de tramas</i>	143
6.4	VALIDACIÓN DE LAS PROPUESTAS EN EL CASO DE USO STATCOM EN WACS.....	145
6.4.1	<i>Descripción del caso de uso</i>	145
6.4.2	<i>Simulación del caso de uso</i>	146
6.4.3	<i>Experimentación en entorno real</i>	170
6.5	CONCLUSIONES.....	186
CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS		189
7.1	CONCLUSIONES.....	189
7.2	TRABAJOS FUTUROS.....	190
APÉNDICE A. DESCRIPCIÓN DE UN STATCOM		193
A.1	INTRODUCCIÓN A LOS STATCOM.....	193
A.2	GENERALIDADES DEL SISTEMA DE CONTROL	195
A.3	CONTROLADORES DE CORRIENTE	200
A.3.1	<i>Modelo de la planta</i>	200
A.3.2	<i>Discretización del modelo</i>	204
A.3.3	<i>Discretización de los términos de desacoplamiento</i>	204
A.3.4	<i>Diseño del controlador</i>	205
A.4	CONTROLADOR DE POTENCIA ACTIVA	207
A.4.1	<i>Modelo del DC-bus</i>	207
A.4.2	<i>Diseño del controlador del DC-bus</i>	209

A.4.3	<i>Referencias del DC-bus</i>	210
A.5	PLL.....	214
A.5.1	<i>Modo de muestreo trabajando con filtro L</i>	217
A.5.2	<i>Conclusiones sobre el multimuestreo</i>	221
BIBLIOGRAFÍA	223

Capítulo 1.

Introducción

1.1 Redes Inteligentes de energía

La electricidad es la forma de energía más consumida en el mundo desarrollado. Con un ritmo de crecimiento permanente, posibilita y es una medida directa del bienestar social. Todas las facilidades que la electricidad brinda radican en una infraestructura que permite distribuir esta forma de energía a todos los consumidores. Aunque esta infraestructura – red eléctrica - ha estado en permanente evolución, en la actualidad se enfrenta a distintos retos.

La red eléctrica es un activo que se debe gestionar adecuadamente para cubrir las necesidades actuales y futuras. En la actualidad se vive una situación en la que se exige a las redes eléctricas que sean algo más que un instrumento pasivo para transportar energía desde los puntos de generación a los puntos de consumo. Se les pide que sean un elemento activo que permita la consecución de los objetivos energéticos de una nación, a la vez que favorezcan la actividad económica, al ser un indiscutible motor de competitividad nacional [International Energy Agency. 2015]. Además de ello, se exige a este sistema que garantice la sostenibilidad, seguridad y fiabilidad de suministro, como piezas claves para la distribución confiable de la electricidad.

Las RRII (Redes Inteligentes) son aquellas capaces de responder de forma activa a estas nuevas exigencias, permitiendo ajustarse y controlar el crecimiento y variaciones de la demanda eléctrica, asegurando bajas pérdidas, altos ratios de eficiencia y niveles de calidad de suministro. La red inteligente, además, debe de ser un elemento preservador del medio ambiente. Por último, este tipo de redes deben incorporar nuevas funcionalidades y tecnologías para dar respuesta a las necesidades que en la actualidad se presentan en la distribución y consumo de electricidad. El concepto de RRII se puede definir como aquel sistema eléctrico seguro, eficiente, confiable, económico y amigable con el medio ambiente, que atiende a los requerimientos – cantidad, disponibilidad y calidad – de energía eléctrica de una demanda activa y variable.

Bajo este enfoque, las RRII han surgido, a nivel mundial, como una respuesta a las necesidades energéticas de cada país, que permiten la evolución hacia nuevos escenarios. Siendo la RI un concepto común, sin embargo, tiene una transposición particular para cada uno de los países en los que se implementa, e incluso para las distintas zonas de un determinado país, debido a las diferentes

condiciones de contorno que en cada uno de ellos se encuentran, como puede ser la mezcla de fuentes de generación, la regulación, la localización de la generación y consumo, etc. Estos factores tienen una gran influencia en el desarrollo de las RRII.

El despliegue óptimo de las RRII presenta potenciales beneficios en términos de:

- Gestión activa de la demanda con el objeto de optimizar el consumo de clientes atendiendo a un rango de confort definido por el usuario y otras referencias adicionales.
- Aplanamiento de la curva de carga, permitiendo optimizar así la inversión en la red, que debe estar dimensionada para hacer frente a los picos de demanda.
- Ampliar los servicios ofertados y recibidos por todos los actores del pool energético: productores, transportistas, distribuidores, comercializadores, consumidores, etc.
- Detección temprana de problemas de red y auto cicatrización de la red, mejorando los tiempos medios de interrupción y la continuidad del suministro eléctrico.
- Mejorar la calidad de la energía consumida por los usuarios.
- Integración de la generación de fuentes de energía renovables y del crecimiento futuro de vehículos eléctricos (VE) y/o sistemas de almacenamiento.
- Mejora de la eficiencia y, por lo tanto, reducción de costes de explotación.
- Mejora de la gestión de los activos de red

Para asegurar estos beneficios, es necesario implementar un nuevo modelo de red eléctrica, sustentándola en los elementos mostrados en la Figura 1.1. La base de sustentación del nuevo modelo son las tecnologías que dan soporte a las nuevas funcionalidades. Estas tecnologías están basadas en la electrónica de potencia, la electrónica de control y las tecnologías de la información y comunicaciones. Sobre ellas se implementan los sistemas de adquisición y tratamiento de la información, necesarios para disponer de la monitorización del estado de la red así como permitir la integración y gestión de los distintos elementos activos de la red del futuro. Elementos activos que cada vez van a ser más numerosos: cargas gestionables en el lado del cliente, generación distribuida, sistemas de almacenamiento, vehículo eléctrico, sistemas de mejora de eficiencia (por ejemplo compensación de reactiva) y elementos de actuación sobre la topología de la red de distribución tales como interruptores automáticos y seccionadores tele-controlados. La gestión inteligente y automática de estos elementos activos requiere de nuevos algoritmos de control y sistemas de decisión que, haciendo uso de las tecnologías que sustentan la base del modelo, hagan posible una automatización de la red de distribución que permita alcanzar los objetivos de calidad, fiabilidad, eficiencia y sostenibilidad.

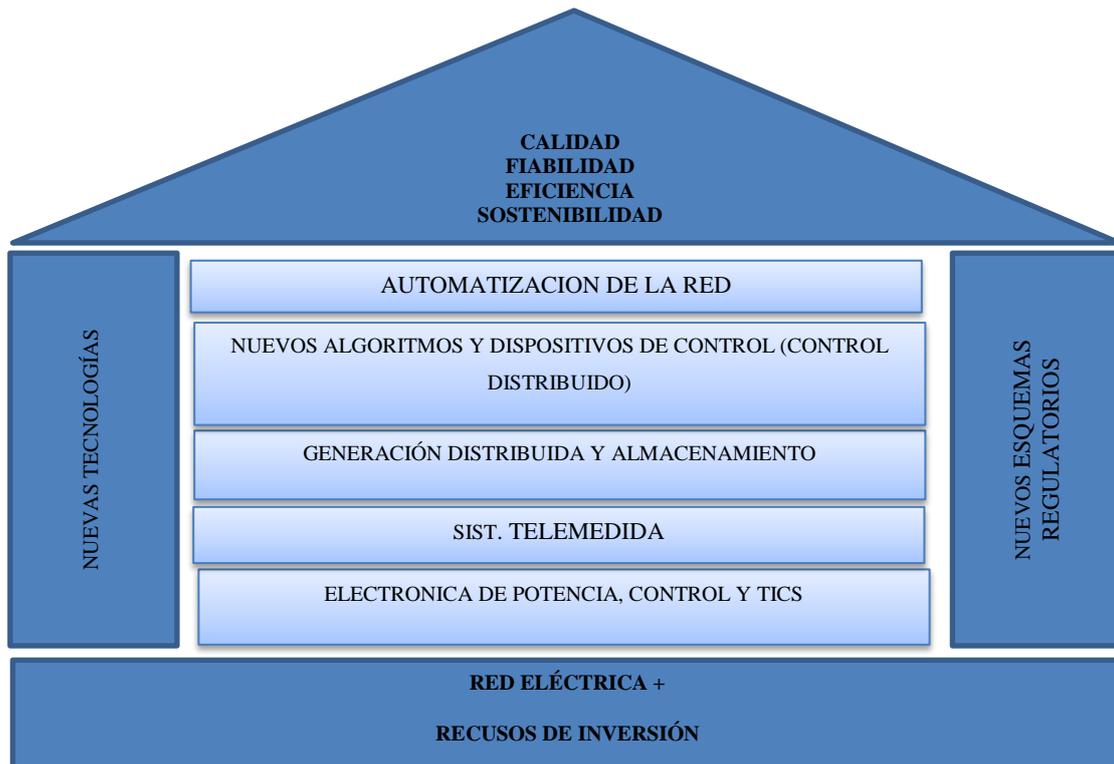


Figura 1.1. Nuevo modelo de red eléctrica.

No es posible construir una infraestructura de estas características sin una visión integrada del sistema completo, por lo que solo mediante un planteamiento integrado es posible la interrelación entre los diferentes componentes del sistema de una forma armonizada. Desde un punto de vista eléctrico, el concepto de RRII se apoya en tres tecnologías fundamentales: Infraestructura de Medida Avanzada, (AMI, *Advanced Metering Infrastructure*), Recursos de Energía Distribuidos (DER, *Distributed Energy Resources*) y Automatización de la distribución Avanzada (ADA, *Advanced Distribution Automation*), que definen la arquitectura básica de una RRII:

- **AMI: *Advanced Metering Infrastructure*.** La eficiente utilización de los recursos eléctricos radica, en primer lugar, en modificar los hábitos de los consumidores hacia la eficiencia y la sostenibilidad. Gracias a esto, se consigue homogeneizar la curva de consumo diaria, de manera que el consumo de energía se distribuye más uniformemente y se evite la creación de fuertes puntas de demanda, maximizando el aprovechamiento de las infraestructuras actuales y la utilización de las energías renovables. El sistema AMI permite la telemetría o medida remota y la caracterización de los hábitos de consumo y la detección de consumos anómalos. Asimismo, posibilita una comunicación online con el usuario que le permita la adopción de hábitos más eficientes y, en un grado de desarrollo más avanzado, una gestión activa de la demanda que implique la intervención directa de la distribuidora en cargas no prioritarias, con objeto de la mejora de la eficiencia energética y la estabilidad de la red. Además, permitirá la reducción de potencia consumida y el deslastre parcial de cargas, en un momento de necesidad en la red de distribución.

- DER: *Distributed Energy Resources*. La generación y el almacenamiento distribuidos aportan las siguientes ventajas:
 - ✓ Reducir al máximo las pérdidas técnicas debidas al transporte y a la distribución, gracias al acercamiento de los puntos de generación a los consumidores.
 - ✓ Reducir la criticidad de los grandes generadores individuales por medio del aumento del número de instalaciones y la diversificación de tecnologías, lo que maximiza la redundancia en la generación. El hecho de diversificar, ayuda a paliar el efecto de la intermitencia de las fuentes de generación renovables al combinar de forma equilibrada multitud de fuentes heterogéneas.
 - ✓ Administrar la producción de energía procedente de fuentes no gestionables, ya que el incremento de fuentes de generación renovables hace indispensable almacenar la energía generada en instantes en los que no es demandada para su posterior consumo. El previsible aumento del parque automovilístico de VE constituiría una extraordinaria capacidad de almacenamiento potencial.
 - ✓ Optimización de las inversiones futuras a realizar en las redes eléctricas, puesto que en vez de invertir en grandes centrales y líneas de transporte, se puede optar por un despliegue masivo de tecnologías en media y baja tensión.
- ADA: *Advanced Distribution Automation*. La creciente complejidad y criticidad de la red eléctrica requiere de métodos avanzados de control de las infraestructuras con el fin de optimizar su operación y eficiencia. Es necesario automatizar, además del telecontrol de la red, el mantenimiento y la capacidad de predicción. Ampliar los esquemas de protección e implementar mecanismos adaptativos de autoajuste de los dispositivos de la red en tiempo real son otras acciones que la automatización de la red hace posible.

Los sistemas AMI, DER y ADA no pueden considerarse separadamente en las RRII, puesto que comparten infraestructuras y están íntimamente relacionados entre sí. De esta forma, la innovación y las nuevas tecnologías llegan a todas las áreas del sistema eléctrico, desde las propias redes, pasando por la generación y entrada de lleno incluso en el nivel del usuario final de la energía: eficiencia energética en el hogar, vehículo eléctrico, etc (Figura 1.2).

Por lo tanto, la estrategia para el desarrollo de RRII puede resumirse en la armonización del mundo eléctrico y el de las comunicaciones y los sistemas de información.

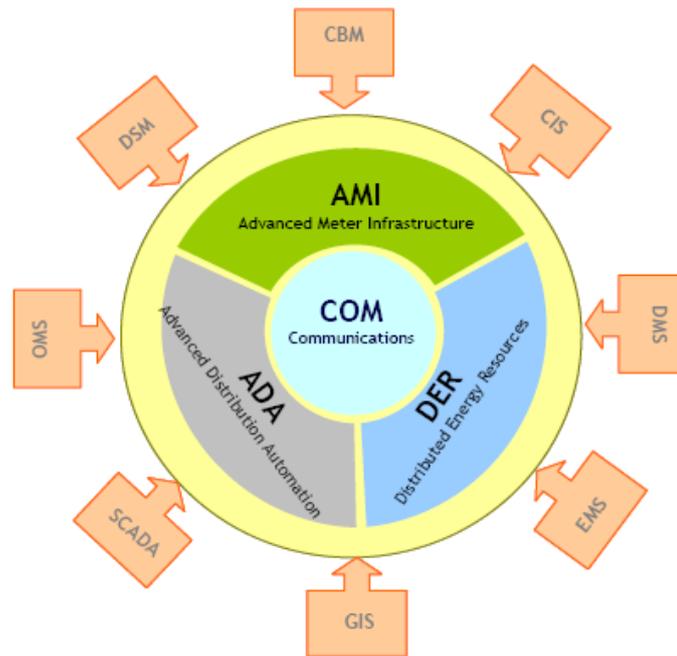


Figura 1.2. Arquitectura RRII

A modo de resumen, las principales características de una red inteligente son las siguientes:

- Automatizada, comunicada y monitorizada.
- Auto-cicatrizante y adaptativa: Fiable y robusta.
- Uso de contadores digitales, telemedida y telegestión.
- Interactiva con consumidores activos e informados.
- Permite las tarifas dinámicas.
- Operada de forma óptima para el mejor uso de recursos y equipos.
- Predictiva antes que reactiva.
- Gestionada de forma descentralizada y en tiempo real.

Las RRII deben contemplar la infraestructura necesaria para acoplar los nuevos elementos a la red actual. Asimismo, las adaptaciones técnicas necesarias para el completo desarrollo de una RRII, se han de planificar desde el punto de vista de nuevos esquemas regulatorios que permitan tanto la incorporación de los elementos al sistema como el desarrollo de todas sus posibilidades operativas y, por otro lado, unos esquemas tarifarios que permitan que cada actor soporte los gastos del sistema de una manera más justa, por lo que una involucración activa de las autoridades públicas y los responsables de las políticas de red es vital.

La llegada de las redes inteligentes se debe planificar de una forma adecuada, tanto desde el punto de vista técnico como económico. Estos deben de ser los pivotes en los que se fundamente su despliegue. Se ha demostrado, a través de diferentes proyectos e iniciativas ([City of Glendale AMI

Smart Grid Initiative], [International Energy Agency. 2015], [Proyecto PRICE]), que el desarrollo y despliegue adecuado de las redes inteligentes puede y debe de traer beneficios para todos los agentes involucrados, tanto a nivel técnico como económico, pero es necesario un análisis pormenorizado de cada escenario particular.

1.1.1 Funcionalidades de las RRII

A la hora de evaluar la influencia de las comunicaciones en las RRII se hace necesario tener en cuenta las principales funcionalidades de RRII. En este apartado se hace un estudio de las más importantes y se presentan sus necesidades respecto a las TICs. En los apartados 2.1.2.1 y 2.1.2.2 se analizan con más detalle las necesidades de las TICs en función del tipo de red de comunicaciones requerida.

1. Medición y monitorización avanzada (AMI). Bajo este concepto fundamental de las RRII se agrupan las siguientes funcionalidades/elementos:

- a. Los contadores inteligentes (*Smart Meters*) permiten a las empresas eléctricas recopilar datos de los consumos de electricidad y transferir las medidas a una base de datos central para facturación y análisis. Con la infraestructura de medición avanzada (AMI), una empresa puede comunicar bidireccionalmente, en tiempo real, los medidores con el centro de gestión central, mejorando así la precisión de la lectura de consumos, y reduciendo los costes operativos. Además, la capacidad de monitorizar el uso de la electricidad en tiempo real, puede permitir a los clientes una mejor gestión de su consumo de electricidad. Los requisitos de TIC para aplicaciones de lectura de contadores varían dependiendo de los tipos de servicio (lectura del contador a petición, lectura periódica del contador o transferencia agrupada de los datos de varios contadores), como se detalla en el subapartado 2.1.1.
- b. El servicio de conmutación de suministro permite a la empresa activar o desactivar remotamente el servicio eléctrico en las instalaciones del cliente. Esto puede ser particularmente útil para reducir el tiempo de servicio y los costes de establecimiento o terminación del suministro. Estas aplicaciones incluyen el envío de un comando de cambio de servicio (servicio de activación / servicio de cancelación) al contador. Para estas aplicaciones, un tamaño típico de trama es de 25 bytes, y el requisito de latencia de los datos es menos de 1 min.

La monitorización de área extendida pretende proporcionar datos en tiempo real de un grupo de dispositivos electrónicos inteligentes (IED) y PMUs (Phasor Measurement Units). Los IEDs transmiten instantáneas del estado del dispositivo y de los datos medidos, a los sistemas SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition)/EMS (Energy Management System) a través de una WAN. Los PMUs, por otro lado,

permiten capturas sincronizadas en el tiempo, del valor de diversas magnitudes de la red incluyendo ángulos de fase de tensión y corriente. La disponibilidad de las mediciones de área extendida permite mejorar la evaluación de la estabilidad con respecto a la estimación de estados, la estimación de parámetros del sistema y el análisis post-falta. Ejemplos de aplicaciones de monitorización de área extendida incluyen la monitorización de la frecuencia de oscilación de potencia y estabilidad de la tensión. La información obtenida mediante esta infraestructura resulta fundamental para los algoritmos de automatización incluidos en la Automatización de la Red, uno de los conceptos clave de las RRII.

Para las aplicaciones de monitorización de área extendida, el tamaño mínimo de las tramas que contiene mediciones hechas por un PMU es de 52 bytes. Esta información se puede obtener de la Norma IEEE para Sincrofasores, que define los formatos de medición y transmisión de datos en tiempo real en sistemas eléctricos de potencia [Martin, K. E., et al. 1998]. El tiempo de respuesta requerido para aplicaciones de monitorización de área extendida es también del orden de milisegundos a minutos, y el requisito de la fiabilidad del sistema de comunicación es muy alta.

2. Gestión de la Demanda y Participación Activa de la Demanda. La información accesible gracias a la infraestructura de medición avanzada y a las *TICs* permite la incorporación de funcionalidades de gestión de la demanda y la participación activa del cliente, siendo esta otra aportación fundamental de las RRII:

- a. La respuesta a la demanda (*DR*, *Demand Response*) permite a una compañía eléctrica comunicarse con los dispositivos en las instalaciones del cliente, bien a través de concentradores o directamente con determinados dispositivos, como los dispositivos de control de carga, termostatos inteligentes, electrodomésticos inteligentes, los PHEV (vehículos eléctricos híbridos enchufables), y pantallas en el hogar, para proporcionar la reducción de carga durante los periodos de máxima demanda en la red de distribución y optimizar la utilización de las infraestructuras de la red eléctrica. Esta participación del cliente en la gestión de la demanda se realiza a cambio de una serie de compensaciones en la tarifa eléctrica.

Aplicaciones típicas incluyen programas directos de control de carga para los sistemas centrales de aire acondicionado, bombas de calor, calentadores de agua eléctricos y / o bombas de la piscina, así como la fijación de precios en tiempo real y programas de tiempo de uso.

En las aplicaciones directas de control de carga, los dispositivos seleccionados se pueden poner a ON / OFF por un controlador de carga instalado en el domicilio del cliente, mediante los comandos enviados por la compañía eléctrica. Estos comandos pueden ser *unicast*, *multicast* o *broadcast* dependiendo de la cantidad de reducción de

carga requerida. Un tamaño de trama típico para aplicaciones de DR es de 100 bytes, y el requisito de latencia de los datos es menos de 1 min.

- b. La disponibilidad de información sobre precios de la energía permite al usuario decidir variar sus hábitos de consumo, trasladando determinados consumos a horas valle, si tiene el incentivo para ello por parte de la compañía, siendo esta otra medida de gestión activa de la demanda. Estas aplicaciones de negociación de precios implican la difusión de información sobre precios de energía, tanto a los contadores, como a otros dispositivos del cliente, por ejemplo, electrodomésticos inteligentes, PHEV, dispositivos de control de carga, etc. Los programas de precios pueden atender a varios criterios, como el tiempo de uso (TOU), programas de precio pico crítico (CPP) y precios en tiempo real (RTP).
- Programas TOU permiten a los clientes reducir las facturas de electricidad, siempre y cuando sean capaces de trasladar el consumo a las horas de menor coste. Los clientes que participan en este programa suelen aceptar diferentes tablas de precios para diferentes períodos de tiempo, como valle, pico y normal.
 - Los programas de RTP ofrecen información de los precios para uso final de clientes, por ejemplo, cada 5 minutos, 30 minutos o 1 hora. Los clientes pueden utilizar esta información para reducir las facturas de electricidad mediante la gestión de su consumo de energía.
 - Los programas de CPP se utilizan normalmente en momentos de alta demanda. La empresa eléctrica para reducir la demanda agregada, puede reducir el consumo de los clientes previamente inscritos en el programa, enviando mensajes CPP al gestor de cargas. En estos programas, los clientes pagan un precio más alto durante un par de horas y un precio mucho menor durante las horas restantes.

Un tamaño de trama típico para este tipo de aplicaciones de fijación de precios es de 100 bytes, y el requisito de latencia de datos es inferior a 1 min.

- c. Las aplicaciones de información al cliente y de mensajería permiten a los clientes el acceso a la información de su cuenta, datos históricos de consumo de electricidad y la información sobre caídas o cortes. Esta información se envía a un almacén adecuado de datos (ODW) y al portal web a través de Internet o una pasarela extranet, que está conectada a la red interna de la empresa eléctrica. Estas aplicaciones son proporcionadas por la propia empresa eléctrica o por un proveedor de servicios de terceros. El tamaño de trama más común es de 50 bytes para una solicitud de información sobre la cuenta del cliente; y de 200 bytes para la respuesta al cliente. El requisito de latencia de datos es inferior a 15 s.

- d. Las aplicaciones de administración de redes locales permiten que los clientes conecten o desconecten dispositivos de la red (por ejemplo, los contadores inteligentes, PHEV, electrodomésticos inteligentes y dispositivos de control de carga). Para ello se pueden usar recursos interactivos por voz (IVR) o un portal web, etc. Un tamaño típico de datos es de 25 bytes, y el requisito de latencia de datos es inferior a 20 s.
- e. El servicio eléctrico prepago permite a los clientes adquirir el servicio de electricidad por adelantado. El servicio está disponible para el cliente, siempre y cuando el contador tenga crédito.

En las aplicaciones tradicionales, un medidor de prepago mide el uso y descuenta crédito, en tiempo real, según la tarifa programada. El contador genera advertencias, por ejemplo, sonidos de alarma audible, cuando el crédito alcanza un umbral o cero. A continuación, el servicio se desconecta dentro de un tiempo predeterminado. Los clientes deben recargar crédito en los contadores para continuar con el servicio.

Con la RRII un medidor inteligente puede realizar funciones de contador de prepago con la capacidad de conectarse de forma remota o desconectar el servicio. La empresa distribuidora puede calcular el crédito disponible en la cuenta de prepago e iniciar las acciones necesarias, tales como el envío de mensajes de advertencia y comandos de desconexión o conexión. Un tamaño de trama típico para una aplicación de prepago de servicio eléctrico es de entre 50 y 150 bytes, y el requisito de latencia de datos es inferior a 30 s cuando la compañía eléctrica envía información, tal como el precio y crédito disponible, a un cliente.

- 3. Integración de generación distribuida y sistemas de almacenamiento (DER). Los recursos distribuidos (generación y almacenamiento) presentan numerosas ventajas desde el punto de vista de la red de distribución, como se ha introducido en apartados previos de este documento. Para que dichas ventajas sean posibles es necesario que su conexión se realice de un modo inteligente, controlado y monitorizado, por lo que la integración de los sistemas DER resulta uno de los pilares de las RRII.

- a. Las aplicaciones de micro-generación (generación en baja tensión) y almacenamiento, surgen como una solución tecnológica que permite una integración eficiente de fuentes renovables combinada con el almacenamiento de energía. Estas aplicaciones incluyen el uso de dispositivos de micro-generación (sistemas fotovoltaicos, por ejemplo) y almacenamiento instalados a lo largo de los circuitos de distribución, para la reducción del pico de carga, el soporte de tensión, mejora de la calidad de la energía, el control de la demanda, y la reducción de la criticidad de interrupciones de suministro de la red. Un tamaño típico de datos para estas aplicaciones es de 25 bytes para un comando de carga / descarga de un controlador de aplicaciones de distribución (DAC) a un cliente

de almacenamiento de distribución, y el requisito de latencia de datos es inferior a 5 s para aplicaciones de almacenamiento del cliente de distribución.

- b. Un caso particular de sistema DER es el vehículo eléctrico. Las aplicaciones de gestión de carga del vehículo eléctrico implican tanto el flujo de electricidad desde los vehículos a la red eléctrica (vehículo a la red, V2G) como el flujo de electricidad de la red eléctrica hacia los vehículos (de la red a vehículo, G2V). Estas aplicaciones permiten a las diversas tecnologías de vehículos eléctricos (basados en baterías, híbridos, plug-in híbrido con pila de combustible, y el plug-in de pila de combustible) convertirse en recursos móviles de almacenamiento distribuido. Las aplicaciones de gestión de carga pueden incluir el envío de mensajes desde la compañía eléctrica al vehículo para obtener información sobre el estado de la batería del vehículo, informar a los vehículos sobre los precios de la electricidad; asimismo un vehículo eléctrico puede enviar mensajes de vuelta a la compañía eléctrica en respuesta a los comandos recibidos. Una trama típica es de 100-255 bytes para aplicaciones de transporte eléctricos, y el requisito de latencia de datos es inferior a 15 s.
4. Automatización de la red de distribución. La automatización de la red (haciendo uso de la infraestructura de medida y las TICs) es necesaria, tanto para maximizar la integración de DER, como para mejorar la continuidad y calidad del suministro
 - a. La automatización de distribución (DA) permite al operador de la red de distribución supervisar y controlar la red de distribución, haciendo uso de la información en tiempo real de la operación de la red, así como la comunicación de datos y gestión de la información. Los sistemas DA ayudan a las empresa eléctricas a gestionar la mayor parte de sus activos de distribución al permitir el control de dispositivos de nivel de distribución, tales como controladores de batería de condensadores (CBC), detectores de faltas, reconectores, interruptores y reguladores de voltaje (VR), con el objetivo de encontrar el grado óptimo de explotación de la red en tiempo real, evitando sobrecargas, minimizando pérdidas y maximizando la eficiencia en la explotación. Las aplicaciones DA y sus requisitos pueden variar de una empresa a otra. En la mayoría de los casos incluyen el monitoreo y el mantenimiento del sistema de distribución, control de la potencia activa y reactiva, respuesta a la demanda del sistema de distribución (DSDR):
 - La supervisión y mantenimiento del sistema de distribución incluye un autodiagnóstico sobre el equipamiento, sondeo de su estado (abierto / cerrado, activo / inactivo) a intervalos regulares, y la recuperación de datos de los sensores para monitorear las condiciones del equipo. El equipamiento de supervisión puede

incluir detectores de faltas, reconectores, interruptores y reguladores de voltaje, etc.

- El Control de potencia activa/reactiva tiene como objetivo reducir las pérdidas de energía, el control de tensión a lo largo de las líneas de distribución, y compensación del consumo de potencia reactiva (mejora del factor de potencia). Para un sistema de distribución, la gestión de potencia activa/reactiva incluye tanto el seguimiento de los dispositivos de la línea de alimentación como su control.
- Las aplicaciones DSDR tienen como objetivo regular la tensión de la red de distribución para ayudar a manejar la carga del sistema durante los períodos de pico. Implica el control de los bancos de capacitores, interruptores automáticos de alimentación y reguladores de voltaje.

En función del grado de automatización que se desee para la RRII, la operación sobre los distintos elementos de la red puede ser telecontrolada o automatizada, en base a algoritmos de control implementados en dispositivos controladores de red, de acuerdo a distintas arquitecturas de control.

El sistema DA consta de comunicaciones inteligentes y dispositivos de automatización, con una red troncal de comunicaciones de baja latencia. En general, se basa en estándares y protocolos abiertos como comunicaciones basadas en IP e interfaces SCADA. Un tamaño de trama típico para aplicaciones de DA varía desde 25 bytes a 1000 bytes, y el requisito de latencia de datos es inferior a 4-5 s, mientras que el requisito de fiabilidad es alta, es decir, más de 99,5%.

- b. Uno de los objetivos que persigue la automatización de la red, como característica destacada de una red inteligente, es la mejora de la continuidad de suministro. En este sentido, es indudable que la respuesta de la red de distribución ante situaciones de falta es un factor clave. El concepto de auto-cicatrización (self-healing), buscado en una red inteligente, implica la automatización del proceso de reposición de la red de distribución tras la ocurrencia de faltas, con el objetivo de reducir el tiempo de las interrupciones y minimizar el número de maniobras necesarias para aislar el tramo en falta y reponer el servicio a los centros de transformación (CTs) afectados. El proceso general para la reposición del suministro tras una falta en media tensión es el siguiente:
 - i. Detección de la falta por el relé de protección instalado en la posición de cabecera de línea, en la subestación de alimentación, y disparo consiguiente del interruptor automático de dicha posición.
 - ii. Tras el disparo anterior, toda la línea pierde el suministro de manera transitoria, hasta que se produce la actuación del automatismo de reenganche asociado al interruptor de cabecera de línea (del orden de segundos).

- iii. Si la falta causante del disparo es transitoria, en el instante del cierre del interruptor ésta se habrá extinguido, el reenganche será exitoso y el suministro queda restaurado, finalizando en este punto el proceso.
- iv. Si la falta es permanente, el cierre será sobre falta y ocasionará un nuevo disparo del interruptor, no llegando por lo tanto a recuperarse el suministro (según criterios de las compañías eléctricas puede haber más intentos de reenganche consecutivos).
- v. Una vez el disparo del interruptor es definitivo (se ha llegado al máximo número de intentos de reenganche), quedando la línea sin tensión, es posible realizar la maniobra de los seccionadores de la línea. Se procede a la apertura de los seccionadores más cercanos al tramo en falta, de modo que el tramo de línea afectado por la falta queda aislado.
- vi. Para poder realizar con éxito este paso del proceso es imprescindible la localización de la falta, o al menos de la mínima sección de línea donde se encuentra, siendo este el punto clave del proceso de reposición de suministro.
- vii. Una vez está aislado el tramo de línea afectado, se procede al cierre del interruptor de cabecera y del seccionador del punto frontera, con lo que el suministro de la línea queda restaurado.

Como se deduce del proceso descrito, identificar cuáles son los seccionadores que deben abrirse para aislar el tramo en falta, como paso previo al cierre del interruptor de cabecera y punto frontera es fundamental para la reposición del servicio, y el tiempo necesario para ello determina en gran medida la duración de la interrupción de suministro. Asimismo, el nivel de automatización de los seccionadores y la posibilidad de maniobra remota también determina el grado de inteligencia de la red, afectando de forma decisiva a la duración de las interrupciones. Así pues, en función del método de localización de faltas y del nivel de automatización de la red, se plantean diferentes soluciones para la reposición de suministro. El concepto de auto-cicatrización hace referencia a la automatización total del proceso descrito, y es uno de los objetivos de la RRII.

- c. En lo que respecta a la detección de fallos en baja tensión, la detección de Cortes y Gestión de la Restauración del suministro (ORM) permite a una empresa eléctrica detectar una interrupción tan pronto como la energía se pierde, empleando dispositivos, como medidores inteligentes y unidades de detección de fallo. Típicamente, se añade un módulo de interfaz adicional a un medidor inteligente para activar la función de detección de apagón. Una empresa eléctrica, por lo general, coloca más de una unidad de detección de interrupción en todas las ramas de una red de distribución para evitar

falsas alarmas. La aplicación ORM permite a un medidor eléctrico enviar un mensaje al Sistema de Gestión de Interrupciones de la empresa eléctrica (OMS) cuando el medidor pierde la alimentación de la red y cuando el medidor detecta que la alimentación de la red ha sido restaurada. Para esta aplicación, una trama útil típica es 25 bytes, y el requisito de latencia de datos es inferior a 20 s.

- d. Si el área de control considerada excede la red de distribución, se plantean funciones de control de área extendida, que superan las funcionalidades del control local y responden más rápidamente que el control manual ejecutado en un centro de control. Proporciona una plataforma flexible para la rápida implementación de generadores de compensación de potencia reactiva que permitan la estabilidad transitoria y soporte de voltaje en sistemas de gran potencia [Taylor, C. W., et al. 2005]. Actúa como una capa adicional para prevenir posibles apagones y proporcionar un control de la inestabilidad en tiempo real. Las aplicaciones de control de área extendida implican el control de equipamiento como dispositivos HVDC y FACTS. Además, estas aplicaciones también incluyen el control de la amortiguación de las oscilaciones de los sistemas de transmisión eléctrica a gran escala [Juanjuan, W., et al. 2011], el control de estabilidad de la tensión para mantener la potencia activa y reactiva en líneas de transmisión y el control de estabilidad de frecuencia.

Si bien las aplicaciones de protección y control de área extendida ofrecen protección a zonas más amplias que los sistemas tradicionales, se necesitan requisitos de rendimiento y disponibilidad de red de comunicaciones más estrictos. Por ejemplo, el tiempo de respuesta requerido para aplicaciones de protección y control de área extendida debe estar en el rango de milisegundos a minutos ($< 0,1$ s a < 2 min), y la fiabilidad del sistema de comunicación debe ser muy alta ($> 99,9\%$). El tamaño de trama puede variar dependiendo de los protocolos de comunicación implementados. Los protocolos típicos utilizados para estas aplicaciones incluyen MIRRORED BITS, IEC 61850, GOOSE y comunicaciones EtherCAT (Ethernet for Control of Automation Technology) [Technical Introduction and Overview]. En el protocolo de comunicaciones MIRRORED BITS, el tamaño del mensaje es de 4 bytes de longitud debido a su diseño simple. El mensaje GOOSE requiere aproximadamente 157 bytes de datos. Por otro lado, se requiere un tamaño de mensaje de 64 bytes para las comunicaciones EtherCAT.

En la línea con esta dimensión del área de control, la protección de área extendida proporciona protección totalmente automática a los sistemas de energía contra caídas generalizadas, congestión en la transmisión y condiciones de estrés, o eventos inesperados. Las aplicaciones de protección de área extendida generalmente implican

la desconexión de carga y funcionamiento en modo isla adaptativo. Los sistemas de protección de área extendida son útiles para hacer frente a contingencias imprevistas en el sistema de transmisión que necesitan tiempo de reacción muy corto para evitar faltas o apagones generalizados.

- e. La flexibilidad que los equipos de control y protección necesitan para la implementación de alguna de las funcionalidades descritas requiere de actualizaciones de firmware y cambios de configuración. Específicamente, con ellas se corrigen errores o se mejoran las características del programa que se ejecuta en los dispositivos. Las compañías eléctricas suelen realizar actualizaciones para implementar los cambiantes requerimientos de aplicación y reforzar la seguridad del dispositivo. Dentro de los dispositivos actualizables se pueden incluir los puntos de agregación de datos (DAP), pasarelas NAN / FAN, y los dispositivos de DA, por ejemplo, reguladores, baterías de condensadores, sensores, interruptores, reconectores y relés. Un tamaño típico de trama de datos está entre 400 y 2000 kbytes, y el requisito de latencia de los datos puede ser de hasta 7 días para actualizar firmware; mientras que el tamaño típico de datos es 25 a 50 kbytes, y el requisito de latencia de los datos puede ser de hasta 3 días para actualizar las configuraciones de ciertas aplicaciones.

1.2 Marco de desarrollo de la tesis

Esta tesis se ha desarrollado en el marco de los proyectos de investigación siguientes:

1. Proyecto GAD [Proyecto GAD]

Éste proyecto ha sido financiado por el Centro para el Desarrollo Tecnológico Industrial (CDTI) del Ministerio de Ciencia e Innovación de España. El proyecto contempla una inversión de 23 millones de euros.

Su misión es investigar en los mecanismos disponibles para la optimización del consumo eléctrico en los hogares.

Implica el desarrollo de soluciones (HW y SW) desde los centros de control eléctricos hasta el hogar de los clientes, que implementen la gestión activa de la demanda, de una forma transparente para el usuario final y teniendo en cuenta su nivel de confort.

Los objetivos han sido:

- Investigación y Desarrollo de herramientas para la optimización del consumo eléctrico en los hogares, reduciendo el coste final de la factura y el impacto ambiental.

- Investigación y Desarrollo de dispositivos para ofrecer al consumidor información sobre el precio y el origen de la energía.
- Investigación en la optimización del uso las infraestructuras eléctricas, mejorando la calidad de suministro y facilitando mayor integración de energías renovables.

Durante 4 años de investigación del Proyecto GAD, se han extraído una serie de conclusiones que enmarcan los procesos de desarrollo llevados a cabo, así como las posibilidades futuras de implantación del sistema, junto con las ventajas, desventajas y beneficios esperados y recomendaciones básicas a tener en cuenta.

2. Proyecto PRICE [Proyecto PRICE]

El proyecto se está ejecutando en el marco del subprograma INNPACTO IPT 2011 (Plan Nacional 2008-2011 Programa de Cooperación Público-Privada) del Ministerio de Economía y Competitividad y cofinanciado por fondos Europeos FEDER.

El Proyecto Conjunto de Redes Inteligentes en el Corredor del Henares, (PRICE) es el primer proyecto de despliegue de medidas de gestión de la demanda en el que participan más de 1.000 hogares en el Corredor del Henares y que está sirviendo para testar cómo los ciudadanos pueden participar más activamente en el sistema eléctrico.

Tiene como objetivos la gestión activa de la demanda, la integración de la demanda procedente del vehículo eléctrico y su aproximación al consumidor final, mediante nuevos canales de información, favoreciendo un uso más eficiente y responsable de la energía. Para conseguirlo, durante la demostración, los hogares del Corredor del Henares están recibiendo información sobre su consumo y el sistema para poder tomar decisiones sobre su forma de consumir.

El proyecto de despliegue PRICE ha recibido la European Electricity Grid Initiative Core Label que reconoce el alineamiento del proyecto con los criterios y objetivos definidos en la European Electricity Grid Initiative.

Es un proyecto liderado por Iberdrola Distribución y Unión Fenosa Distribución con el objetivo de dar respuesta a los retos tecnológicos que presentan a nivel mundial los sistemas eléctricos. En PRICE participan además Red Eléctrica de España y un grupo de proveedores industriales y de tecnologías de la información, centros de investigación y universidades.

Este proyecto supone una solución innovadora que permitirá a Red Eléctrica:

- Impulsar el conocimiento y la investigación de potenciales medidas que aporten flexibilidad al sistema aprovechando el despliegue de contadores inteligentes.

- Analizar la actitud de los usuarios finales hacia señales informativas y de actuación, así como el impacto en su propio comportamiento y en el sistema.
- Probar las funcionalidades desarrolladas con el objetivo de integrar cargas móviles y dispersas en la red eléctrica y analizar patrones de carga de los vehículos eléctricos.

1.3 Publicaciones relacionadas

Los resultados, entornos de prueba y soluciones propuestas en esta Tesis han sido presentados en diferentes conferencias y han sido publicados en revista de alto impactos. Este apartado recoge los más relacionados por orden cronológico. Se muestra una pequeña descripción de sus contenidos y, en caso de que el trabajo haya sido incluido en esta Tesis, se indica la parte correspondiente.

1.3.1 Artículos publicados en revistas

1. [Bueno, E. J., et al. 2009] Emilio José Bueno, Álvaro Hernandez, Francisco Javier Rodríguez, Carlos Girón, Raúl Mateos, Santiago Cóbreces, "A DSP- and FPGA-based industrial control with high-speed communication interfaces for grid converters applied to distributed power generation systems," *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 56, no. 3, pp. 654-669 2009.

Índice de impacto 4.678, Indexada en el Q1 (primera revista de la categoría Automation and Control Systems) del JCR, citado en 118 publicaciones.

Este artículo presenta el diseño, implementación y test de un controlador multiprocesador industrial basado en un procesador digital de señal (DSP, *Digital Signal Processor*) y un array de puertas programables por campo (FPGA, *Field-programable gate array*) que trabajan de forma cooperativa. La arquitectura de comunicaciones que se ha añadido a la solución electrónica propuesta, consiste en una conexión USB implementada con un uso muy reducido de los recursos del DSP, y un interfaz CAN (*Controller Area Network*). Aunque el controlador propuesto puede ser fácilmente aplicable a un sistema de generación distribuida, este artículo se centra en su uso en un convertidor back-to-back NPC (*Neutral Point Clamped*) de tres niveles de 150 kVA para aplicaciones en turbinas eólicas. Este trabajo es fruto del entorno de pruebas diseñado en esta tesis.

2. [Rodríguez, F. J., et al. 2009] Francisco Javier Rodríguez, Carlos Girón, Emilio José Bueno, Álvaro Hernandez, Santiago Cóbreces, Pedro Martin, "Remote laboratory for experimentation with multilevel power converters," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 56, no. 7, pp. 2450-2463 2009.

Índice de impacto 4.678, Indexada en el Q1 (primera revista de la categoría Automation and Control Systems) del JCR, citado en 17 publicaciones.

Este artículo describe los módulos *hardware* y *software* de un laboratorio remoto para experimentación con un convertidor de potencia multinivel de 120 kVA. La clave de este laboratorio es el uso de un convertidor real que puede ser supervisado y controlado a través de internet de forma segura. Este laboratorio soporta una amplia variedad de experimentos, desde el control de red eléctrica hasta el control de máquinas eléctricas. Los usuarios pueden elegir entre diferentes estructuras de controladores, sus parámetros y el tipo de carga a conectar, y obtener en tiempo real las gráficas con los resultados de las medidas. Este trabajo muestra el entorno de pruebas empleado para conseguir los resultados del Capítulo 3 y del Capítulo 6.

3. [Huerta, F., et al. 2012] Francisco Huerta, Daniel Pizarro, Santiago Cóbreces, Francisco Javier Rodríguez, Carlos Girón, Ana Rodríguez., "LQG servo controller for the current control of grid-connected voltage-source converters," *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 59, no. 11, pp. 4272-4284 2012.

Índice de impacto 5.165, Indexada en el Q1 (primera revista de la categoría Automation and Control Systems) del JCR, citado en 38 publicaciones.

Este artículo presenta un esquema de control de corriente para un convertidor en fuente de tensión conectado a la red mediante un filtro LCL. El control de corriente propuesto se basa en la técnica de servo control lineal cuadrática (LQ, *Linear Quadratic*) Gaussiana (LQG), que combina un regulador LQ y un filtro de Kalman (KF, *Kalman Filter*). El uso de un KF en lugar de un estimador Luenberger mejora la calidad de la estimación de las variables de estado en entornos ruidosos, incrementando la inmunidad al ruido del lazo de control. Este artículo se centra en obtener algunos criterios e hitos prácticos para elegir los parámetros de diseño del KF y del LQ para conseguir error nulo en el seguimiento del estado de equilibrio, desacoplamiento de los canales e inmunidad al ruido. Además, analiza la aproximación del KF para el estado de equilibrio que permite un decremento significativo en la complejidad computacional del algoritmo y prácticamente sin impacto en la exactitud. Los resultados de simulación y experimentales prueban la correcta operación del control de corriente LQG propuesto y las posibles ventajas de utilizar un KF para estimar el vector de estados.

4. [Rizo, M., et al. 2015] Rizo, M., Liserre, M., Bueno, E. J., Rodriguez, F. J., Giron, C., "Voltage control architectures for the universal operation of DPGS," *Industrial Informatics, IEEE Transactions on*, vol. 11, no. 2, pp. 313-321 2015.

Índice de impacto 4.708, Indexada en el Q1 (segunda revista de la categoría Automation and Control Systems) del JCR, citado en 6 publicaciones.

El concepto futuro de operación universal abarca aquellos sistemas de generación distribuidos de energía (DPGS) capaces de desconectarse de la red principal para comenzar a operar en modo isla. Una vez resuelta la causa de la desconexión, el DPGS es capaz de volver a sincronizarse y conectarse con la red. En estas condiciones, el funcionamiento universal se puede implementar con éxito mediante un control de voltaje. El control de voltaje es principalmente adoptado en fuentes de alimentación ininterrumpida (UPS) y aplicaciones en modo isla. Sin embargo, falta un estudio que se centre exclusivamente en la operación universal. El objetivo de este trabajo es ayudar en la selección de la estructura de control más adecuada en función de: 1) la dinámica de energía, la calidad de la energía y la robustez de la estabilidad en modo conectado a la red; 2) regulación de voltaje y rendimiento bajo pasos de la carga local en modo isla; Y 3) comportamiento durante la reconexión con la red. Para ello, se han revisado cinco arquitecturas dentro de un marco matemático general y con resultados experimentales.

Estos trabajos han sido realizados utilizando el entorno de pruebas diseñado en esta Tesis.

1.3.2 Trabajos en revisión

“Assessing the contribution of Automation to the Electric Distribution Network Reliability”

Las empresas eléctricas están involucradas en procesos de automatización de redes, apoyadas en tecnologías de información y comunicación, para mejorar la eficiencia de la red, la confiabilidad, la seguridad y la calidad de servicio. Este trabajo pretende cuantificar las mejoras logradas en los índices de fiabilidad con la automatización de las subestaciones secundarias. Dado que este proceso de automatización radica en el uso de canales de comunicación no ideales, se tiene en cuenta su latencia y disponibilidad. Para completar el análisis a partir de una evaluación experimental, esta metodología se ha aplicado en una red de distribución real, dentro del marco de los proyectos PRICE-RED y DISCERN (eu-fp7). Dado que la fiabilidad tiene una notable influencia en los ingresos de las empresas de gestión de sistemas de distribución, estos resultados proporcionan una entrada útil para el desarrollo estratégico de las redes de distribución. Este artículo resume las aportaciones del Capítulo 4.

“Assessing Communications Impact on remote control of Static Compensators working in distribution networks”

La red eléctrica está cambiando significativamente en los últimos años. Hoy en día es necesario optimizar la calidad y la cantidad de potencia suministrada a la red y responder a la demanda actual de energía. La generación distribuida (DG) viene como una solución a la sobrecarga de la red de

distribución causada por una red jerárquica y con control centralizado. Pero esta forma distribuida de generar energía tiene algunos problemas como la monitorización y control de manera remota. Con el fin de mejorar las redes inteligentes, los sistemas de comunicación se convierten en un tema muy importante en el diseño de algoritmos de control de electrónica de potencia. En este trabajo, la latencia de los canales de comunicación típicos se modela utilizando un punto de vista analítico y utilizando datos experimentales. Este trabajo, recoge las aportaciones del Capítulo 4, prueba la influencia de la latencia para dos casos de uso: el tiempo promedio para recuperar una interrupción en Smart Grids (Capítulo 5) y el control remoto de un STATCOM (Capítulo 6).

1.4 Estructura del documento

En el Capítulo 2 se presenta una introducción al estado del arte de los temas tratados en esta Tesis y los objetivos de la misma.

En el Capítulo 3 se describe el entorno de pruebas, simulaciones y experimentos realizados en el ámbito de esta Tesis.

En el Capítulo 4 se hace un estudio de los principales parámetros de los canales de comunicación comúnmente utilizados en RRII.

En el Capítulo 5 se presenta el primer caso de uso, analizando la influencia de las comunicaciones en la automatización de la detección y corrección de faltas en la red eléctrica.

En el Capítulo 6 se presenta el segundo caso de uso propuesto, analizando la influencia de las comunicaciones en el control, dentro de una red de control de ámbito extenso, de un sistema de compensación de energía reactiva.

En el Capítulo 7 se presentan las conclusiones y se esbozan los trabajos futuros.

Finalmente, en el Apéndice A se incluye una descripción teórica sobre el funcionamiento de los compensadores de energía reactiva.

Capítulo 2.

Estado del Arte y objetivos

En este capítulo se realiza un estudio general del estado del arte de las aplicaciones de comunicaciones en redes inteligentes. Este estudio del estado del arte será ampliado en cada capítulo con los trabajos previos, directamente relacionados con el tema a tratar. En la parte final de este capítulo, se describen los objetivos de la Tesis.

2.1 Aplicaciones de redes inteligentes y sus tecnologías de comunicación asociadas

La red inteligente es una plataforma que consta de diferentes dominios, incluyendo la generación, transmisión, distribución, clientes, proveedores de servicios, operadores y mercados, para permitir una amplia diversidad de casos de uso o aplicaciones (Figura 2.1).

Como se ha explicado en el apartado 1.1 las redes inteligentes ofrecen un gran número de funcionalidades que se incrementa día a día dada la rápida evolución tecnológica en los sistemas de electrónica de potencia y de control, en los algoritmos de monitorización y control y en las TICs.

2.1.1 Tecnologías de información y comunicación para redes inteligentes

Las TICs son uno de los ejes fundamentales para asegurar el despliegue de las RRII, habilitando el flujo de información necesario para operar los nuevos elementos de red y la gran cantidad de información que estos generan.

Las propuestas de arquitectura de red de comunicaciones para las RRII, con las tecnologías y protocolos correspondientes, son numerosas. Por ejemplo, la propuesta para las comunicaciones del CEN-CENELEC-ETSI (CEN, *European Committee for Standardisation*, CENELEC, *Comité Européen de Normalisation Electrotechnique*, ETSI, *The European Telecommunications Standards Institute*) incluida en el Modelo de Arquitectura de Red Inteligente (SGAM, *Smart Grid Architecture Model*), recoge un esquema complejo de niveles, dominios, subredes e interrelaciones que puede verse en la Figura 2.2. Esta figura se muestra sólo a título ilustrativo. Pueden encontrarse más detalles en [CEN-CENELEC-ETSI Smart Grid Coordination Group. 2012].

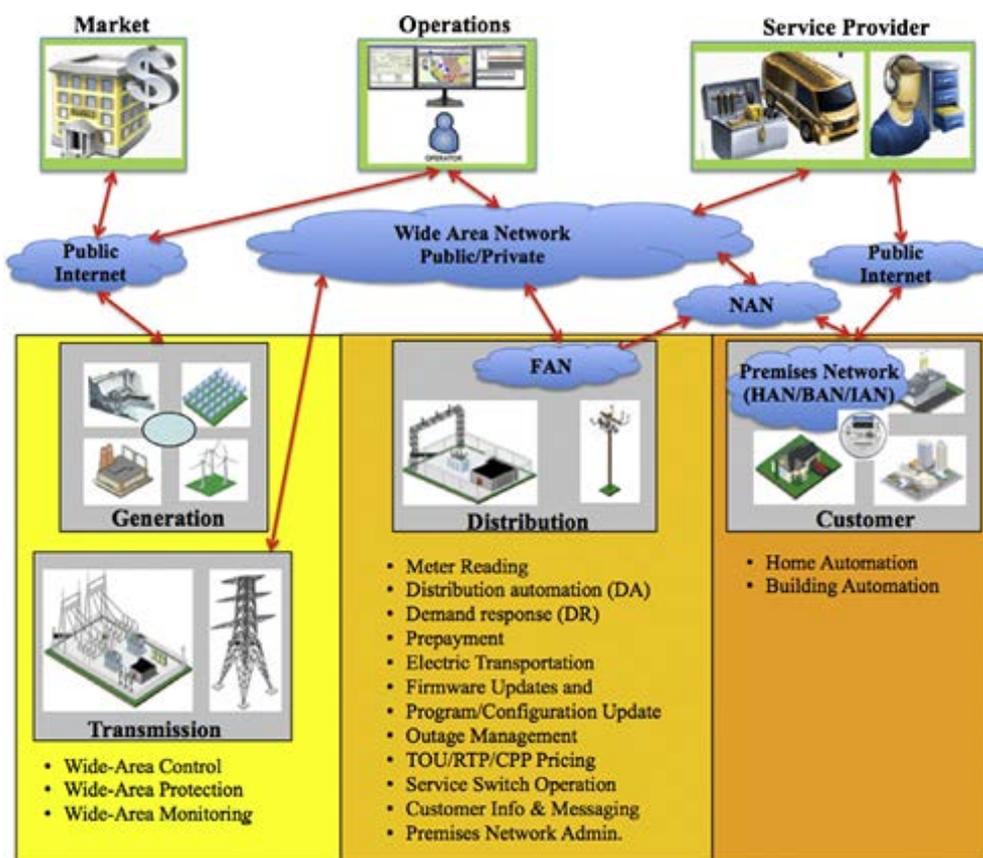


Figura 2.1. Dominios de las redes inteligentes, interacciones intra/inter-domino mediante redes de comunicación y aplicaciones de redes inteligentes en los dominios de la generación, transmisión, distribución y clientes [Kuzlu, M., et al. 2014].

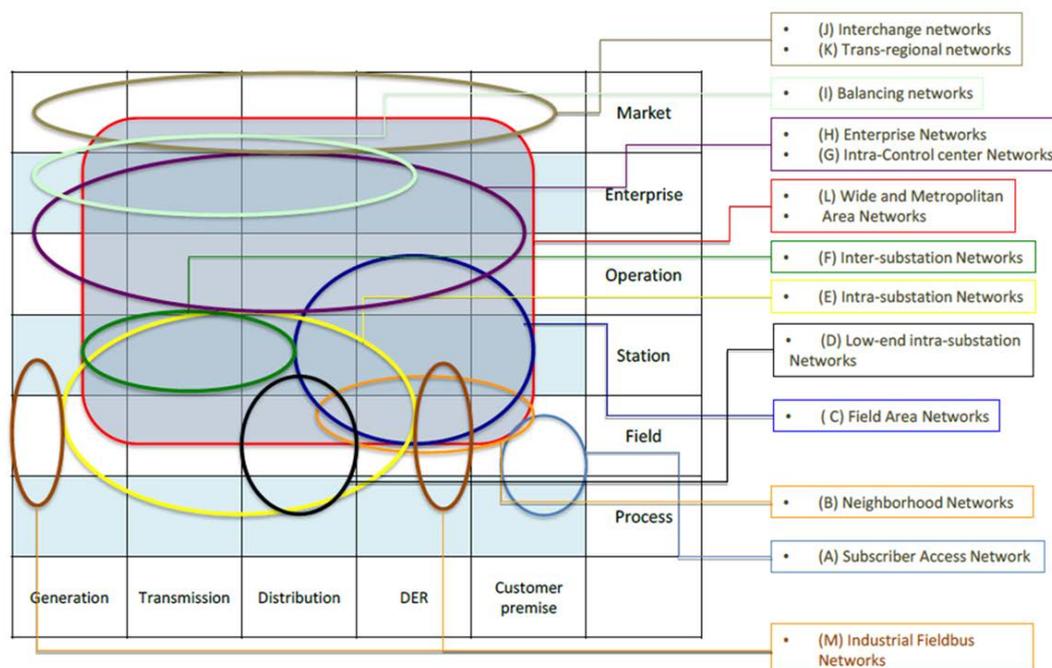


Figura 2.2. Las TICs en el modelo SGAM de CEN-CENELEC-ETSI

Otro punto de vista es el mostrado por el NIST (National Institute of Standards and Technology) [Greer, C., et al. 2014]. En él, la interacción entre las redes de comunicaciones y los distintos agentes de las RRII puede apreciarse en la Figura 2.3.

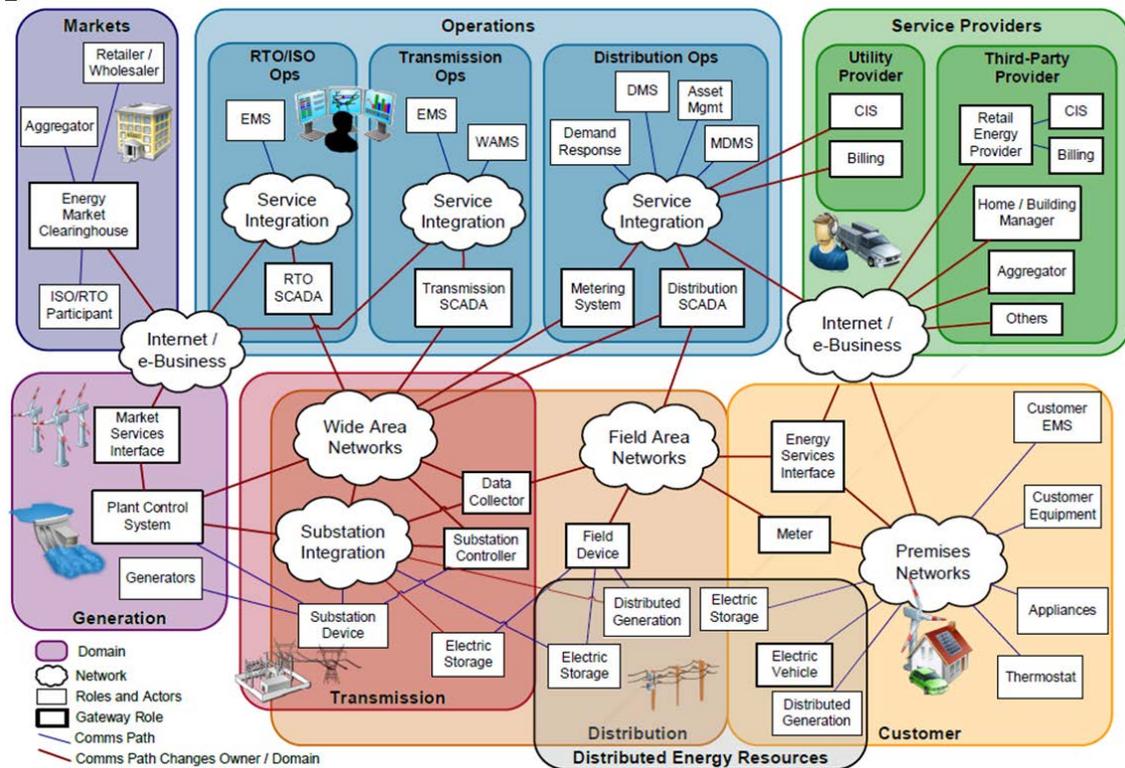


Figura 2.3. Mapeado entre las redes de comunicaciones y los dominios conceptuales en el modelo del NIST

Un enfoque más simplificado puede encontrarse en otros trabajos recopilatorios [Kuzlu, M., et al. 2014], en los que la RRII se entiende como una plataforma interactiva, que consta de varias capas, a saber, capa de energía, capa de control, capa de comunicación, capa de seguridad y capa de aplicación, como se muestra en la Figura 2.4.

Aplicaciones de contadores y redes inteligentes		Aplicaciones de cliente		Capa de Aplicación	
Autenticación, control de acceso, integridad de los datos, encriptación y privacidad				Capa de Seguridad	
Telefonía Móvil, WiMax, FO	PLC, DSL, Cable coaxial, Mallas RF	PLC, ZigBee, Wifi, Z-Wave		Capa de Comunicaciones	
WAN	NAN/FAN	HAN/BAN/IAN			
PMUs, Bancos Capacitivos	Seccionadores	Switches	Sensores, Transformadores	Medidores, Almacenamiento	Capa de control
Transmisión y Generación		Distribución		Clientes	Capa de energía

Figura 2.4. Arquitectura multicapa de las RRII

Esta arquitectura representa cómo puede implementarse una RI. En general, las RRII comprenden: (1) una capa de energía, que se refiere a la generación de energía, transmisión, distribución e infraestructura del cliente; (2) la capa de control de la energía, que dota a la red de control y gestión; (3) la capa de comunicación, que permite comunicación bidireccional en el entorno de la red; (4) la

capa de seguridad, que proporciona confidencialidad, integridad, autenticación y disponibilidad; y (5) la capa de aplicación, que proporciona varias aplicaciones de RRII a los clientes y a las operadoras basada en la información de las infraestructuras.

Por ejemplo, para habilitar una aplicación de Smart Metering, la red eléctrica debe tener: la capa de energía que es el sistema de distribución de la energía eléctrica a los clientes, la capa de control de energía, esto es, el contador inteligente que habilita la monitorización del consumo, la capa de comunicación que es necesaria para poder transmitir la información entre la compañía y el cliente y la capa de seguridad que es necesaria para proteger la privacidad de la información.

La capa de comunicación es uno de los elementos más críticos que habilitan las aplicaciones de las RRII. En el entorno de las RRII, la red de comunicaciones puede ser representada como una arquitectura multicapa jerárquica.

Clasificando por rango de cobertura y velocidad de transmisión, esta arquitectura comprende:

- Redes de área de cliente, por ejemplo, HAN (Home Area Network), BAN (Building Area Network), IAN (Industrial Area Network)
- NAN (Neighborhood Area Networks) , FAN (Field Area Network)
- WAN (Wide Area Network)

Los requerimientos de las velocidades de transmisión y los rangos de operación se muestran en la Figura 2.5.

Las aplicaciones HAN/BAN/IAN incluyen automatización del hogar y de edificios, que se refieren al envío y recepción de información desde aparatos eléctricos hasta un controlador, ubicado en el ámbito del cliente. Estas aplicaciones no requieren que los datos sean enviados con mucha frecuencia, y todas las aplicaciones suceden dentro de un edificio residencial, comercial o industrial.

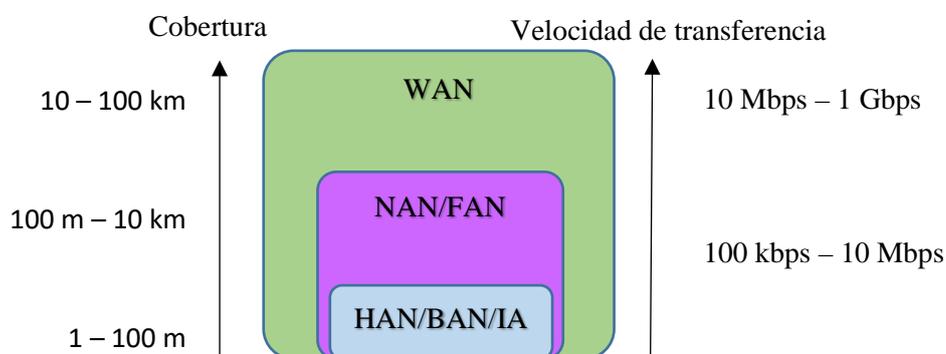


Figura 2.5. Requerimientos de velocidad de transmisión y cobertura para la jerarquía de las comunicaciones en redes inteligentes.

Por consiguiente, los requerimientos de comunicaciones para este tipo de redes son de bajo consumo de energía, bajo costo, simples y con comunicaciones seguras. Las tecnologías de comunicación que proporcionan velocidades de transmisión de hasta 100 kbps con corto alcance (hasta 100 m) son generalmente suficientes. Zigbee, Wifi, Z-Wave, PLC (Power Line Carrier), bluetooth y Ethernet son ampliamente utilizados en este tipo de redes.

En aplicaciones NAN/FAN, como por ejemplo los medidores inteligentes, respuesta a la demanda y automatización de la distribución, se requiere la transmisión de datos desde un gran número de clientes o dispositivos en campo hasta un concentrador de datos o subestación y viceversa. Por lo tanto, estas comunicaciones requieren tecnologías que soporten mayores velocidades de transmisión (100 kbps – 10 Mbps) y cobertura con mayor distancia (hasta 10 km).

Estas redes se pueden implementar sobre redes malladas Zigbee o Wifi, PLC así como tecnologías cableadas e inalámbricas de larga distancia, como WiMax, Cable coaxial, xDSL, o telefonía celular.

Para las aplicaciones WAN, como los controles de área extensa, monitorización y sistemas de protección, que requieren la transmisión de una gran cantidad de datos a mucha mayor frecuencia (fracciones de segundo) para conseguir un control estable del sistema de energía, se necesitan comunicaciones que soporten velocidades de transmisión mucho mayores (10 Mbps – 1Gbps) y aporten cobertura en grandes distancias (hasta 100 km). Las comunicaciones ópticas son ampliamente utilizadas en este segmento, entre subestaciones de transmisión/distribución y los centros de control de las compañías suministradoras debido a su gran ancho de banda y baja latencia. Los sistemas de telefonía celular y WiMax también son muy utilizados en este ámbito debido a su alta velocidad de transmisión y amplia cobertura. Por otro lado, las comunicaciones por satélite pueden utilizarse para aportar redundancia a la red de comunicación en sitios críticos, como línea de respaldo.

En la Tabla 2.1 se presenta una comparación entre varias tecnologías de comunicación que pueden dar soporte a las aplicaciones de RRII en términos de velocidad de transmisión y cobertura en distancia.

Como las tecnologías inalámbricas tienen menor coste de instalación, se despliegan más rápido y tienen mayor movilidad y flexibilidad que las cableadas. Por ello, las tecnologías inalámbricas son recomendables en la mayor parte de las aplicaciones de RRII.

Tabla 2.1.- Comparación de las tecnologías de comunicación para RRII

Tecnología	Protocolo	Velocidad transmisión máxima	Cobertura	Red		
				HAN/BA N/IAN	NAN/FAN	WAN
Fiber optic	PON	155 Mbps–2.5 Gbps	Up to 60 km			X
	WDM	40 Gbps	Up to 100 km			
	SONET/SDH	10 Gbps	Up to 100 km			
DSL	ADSL	1–8 Mbps	Up to 5 km		X	
	HDSL	2 Mbps	Up to 3.6 km			
	VDSL	15–100 Mbps	Up to 1.5 km			
Coaxial	DOCSIS	172 Mbps	Up to 28 km		X	
Cable						
PLC	HomePlug	14–200 Mbps	Up to 200 m	X		
	Narrowband	10–500 kbps	Up to 3 km		X	
Ethernet	802.3x	10 Mbps–10 Gbps	Up to 100 m	X	X	
Wireless communication technologies						
Z-Wave	Z-Wave	40 kbps	Up to 30 m	X		
Bluetooth	802.15.1	721 kbps	Up to 100 m	X		
ZigBee	ZigBee	250 kbps	Up to 100 m	X	X	
	ZigBee Pro	250 kbps	Up to 1600 m			
WiFi	802.11x	2–600 Mbps	Up to 100 m	X	X	
WiMAX	802.16	75 Mbps	Up to 50 km		X	X
Wireless Mesh	Varios (RFmesh, 802.11, 802.15, 802.16)	Depending on selected protocols	Depending on deployment	X	X	
Cellular	2G	14.4 kbps	Up to 50 km		X	X
	2.5G	144 kbps				
	3G	2 Mbps				
	3.5G	14 Mbps				
	4G	100 Mbps				
Satellite	Satellite Internet	1 Mbps	100–6000 km			X

2.1.2 Requerimientos de las redes de comunicaciones en RRII

2.1.2.1 Aplicaciones de RRII en red local

Este subapartado analiza los requisitos de *TICs* para aplicaciones de red local. La red local es, dentro de la arquitectura de red de comunicaciones, la más próxima al cliente. Incluye las comunicaciones entre los aparatos electrodomésticos, vehículos eléctricos y otros equipos eléctricos situados en las instalaciones del cliente.

HAN proporciona comunicaciones para los electrodomésticos y equipos que son capaces de enviar y recibir señales de un medidor inteligente, pantallas en el hogar (IHDS) y / o sistemas de gestión de energía en el hogar (HEM). Estas aplicaciones incluyen domótica, puntos de ajuste óptimos del termostato para zonas distintas zonas térmicas, la temperatura óptima del calentador de agua, etc., control y gestión de cargas y proporcionan los costes totales de electricidad.

BAN e IAN se utilizan por los clientes comerciales e industriales y se centran en la automatización de edificios, calefacción, ventilación y aire acondicionado (HVAC), y otras aplicaciones de gestión energética industrial.

La red local está conectada con otros actores de las redes inteligentes (por ejemplo, una empresa eléctrica o un proveedor de servicios energéticos), a través de un medidor inteligente o una pasarela de Internet. Esto permite a las empresas eléctricas realizar aplicaciones NAN/FAN en instalaciones residenciales, comerciales e industriales, por ejemplo, servicios de prepago, mensajería de información al usuario, fijación de precios en tiempo real, y control, gestión de cargas y respuesta de la demanda. La Tabla 2.2 resume los requisitos exigibles a la red de comunicaciones, en términos de tamaños de trama útil típica, requisitos de recopilación de datos, fiabilidad y latencia, junto con las tecnologías de comunicación viables que pueden soportar tales requisitos.

Tabla 2.2.- Requerimientos de la red de comunicaciones para aplicaciones HAN/BAN/IAN en redes inteligentes

Aplicación	Automatización Doméstica	Automatización de Edificios
Tamaño típico de los datos (Bytes)	10-100	>100
Requerimiento de Frecuencia de muestreo típica	Una muestra cada periodo configurable (1 min, 15 min, etc.)	Una muestra cada periodo configurable (1 min, 15 min, etc.)
Latencia	Segundos	Segundos
Fiabilidad (%)	>98	>98
Fibra óptica	X	X
DSL		
Cable Coaxial	X	X
PLC	X	X
Ethernet	X	X
Z-Wave	X	
Bluetooth	X	
ZigBee	X	X
WiFi	X	X
WiMAX		
Mallado inalámbrico		X
Telefonía móvil		

Una red NAN apoya el flujo de información entre la WAN y una red de área local. Permite la recogida de datos de los clientes en un barrio o manzana, para transmitirla a una empresa de servicios eléctricos. La red NAN también puede denominarse Red FAN cuando conecta

dispositivos de campo, como los dispositivos electrónicos inteligentes (IEDs). Las redes NAN / FAN permiten una amplia gama de aplicaciones de redes inteligentes, como medidas inteligentes, gestión de carga, automatización de la distribución, gestión de precios, gestión de cortes y restauración u otras aplicaciones basadas en el cliente.

Las redes NAN / FAN incluyen una red de medida, que forma parte de AMI, permitiendo servicios tales como lectura remota de contadores, control y detección de uso no autorizado, etc. Permite la transmisión de la información de uso de electricidad desde los contadores de energía hasta la empresa eléctrica o un sistema informático de terceros. Además, posibilita el control remoto de los dispositivos de campo, por ejemplo, en aplicaciones de automatización de la distribución. Las redes NAN / FAN se conectan a la red WAN a través de una red troncal que agrupa a varias redes NAN / FAN.

Son aplicaciones de redes inteligentes en el ámbito NAN / FAN la lectura de contadores, automatización de la distribución (DA), la respuesta de la demanda (DR), prepago, transporte eléctrico, actualizaciones de firmware y configuración de programas, gestión de cortes de suministro y su restauración, fijación de precios CDU / RTP / CPP, operación de la interrupción de suministro, información al cliente y mensajería, y administración de la red local.

Para estas aplicaciones, se requieren tecnologías de comunicaciones que soporten velocidad de transmisión más elevadas y tengan una cobertura mayor (de hasta 10 km), que las requeridas para las aplicaciones de red de área local. Los requisitos de área de cobertura y velocidad de datos para diferentes aplicaciones NAN pueden variar dependiendo de las aplicaciones. Por ejemplo, el tamaño de datos típico para una lectura de contador es 100-2400 bytes, mientras que es de 25-1000 bytes para aplicaciones de automatización de distribución.

A continuación, se analizan los requisitos de red de comunicaciones de algunas funcionalidades de RRII, en términos de tamaños típicos de datos, frecuencia de muestreo necesaria, así como los requisitos de confiabilidad y latencia (Tabla 2.3), junto con las tecnologías de comunicación viables que pueden soportar aplicaciones de RRII en NAN / FAN. En este caso, los requisitos de latencia se refieren al retraso aceptable de actualización de datos/estado desde un transmisor a un receptor para cada aplicación de redes inteligentes.

Tabla 2.3.- Requerimientos de los sistemas de red para aplicaciones NAN en las redes inteligentes.

Aplicación	Tamaño típico de datos (bytes)	Requerimiento de Frecuencia de muestreo típica	de Latencia	Fiabilidad (%)
1a Lectura de contadores - bajo demanda (desde los contadores hasta las distribuidoras)	100	Cuando sea necesario (7am – 10 pm)	<15 s	>98
1b Lectura de contadores - Programada (desde los contadores hasta los frontales AMI)	1600-2400	4 – 6 veces diarias por contador residencial 24 veces diarias por contador industrial/comercial	<4 h <2 h	>98
1c Lectura de contadores – transferencia masiva (desde los frontales AMI hasta las distribuidoras)	MB	X por día para un grupo de contadores	< 1h	>99.5
2a Precio- TOU (de la distribuidora a los contadores)	100	1 por dispositivo por evento difundido de dato de precio, 4 al año (24 x 7)	<1 min	>98
2b Precio- TOU (de la distribuidora a los contadores)	100	1 por dispositivo por evento difundido de dato de precio, 6 al año (24 x 7)	<1 min	>98
2c Precio- TOU (de la distribuidora a los contadores)	100	1 por dispositivo por evento difundido de dato de precio, 2 al año (24 x 7)	<1 min	>98
3 Servicio eléctrico prepago (distribuidora a clientes)	50-150	25 veces por contador prepago mensual (7am – 10pm)	<30 s	>98
4 Respuesta de la demanda – DLC (distribuidora a los dispositivos del cliente, p.e. electrodoméstico inteligente, PHEV, control de cargas)	100	1 por dispositivo y petición de difusión (24 x 7)	<1 min	>99.5
5 Operación del elemento de corte (de la distribuidora a los contadores)	25	1-2 diarios(8am-8pm) por cada 1000 contadores	<1 min	>98
6a Automatización de la distribución – Monitorización y mantenimiento del sistema de distribución (datos de los dispositivos de campo al DMS)	100-1000	entre 1 horario por dispositivo y 1 semanal por dispositivo (24 x 7) dependiendo del dispositivo	<5 s	>99.5
6b Automatización de la distribución – Control de tensión y potencia	150-250	entre 1 horario por dispositivo y 1 semanal por	<5 s	>99.5

Aplicación	Tamaño típico de datos (bytes)	Requerimiento de Frecuencia de muestreo típica	de Latencia	Fiabilidad (%)
(comandos desde DMS a los dispositivos de campo)		dispositivo (24 x 7)		
6c	Automatización de la distribución – respuesta de la demanda del sistema de distribución (comandos desde DMS a los dispositivos de campo)	150-250	dependiendo del dispositivo entre 1 por cada 5 min por dispositivo y 1 cada 12 h por dispositivo (1-6h de duración 4-8 veces al año) dependiendo del dispositivo	<4 s >99.5
6d	Automatización de la distribución – detección de fallos, limpieza, aislamiento y restauración (comandos desde DMS a los dispositivos de campo)	25	1 por dispositivo por aislamiento/reconfiguración (<5 s, con un fallo menor de 1.5 min.)	<5 s >99.5
7	Administración de cortes y restauración (ORM) (desde los contadores al OMS)	25	1 por contador por pérdida de energía/restauración (24x7)	<20 s >98
8	Distribución en el almacenamiento de los clientes (comandos de carga descarga desde el DAC a los elementos de almacenamiento)	25	2-6 por periodo manejado diario	<5 s >98
9a	Transporte (la distribuidora manda los precios para PHEV)	255	1 por PHEV por 2-4 días (7am – 10pm)	<15 s >98
9b	Transporte (la distribuidora interroga la carga del PHEV)	100	2-4 por PHEV diario (7am – 10pm)	<15 s >98
10a	Actualizaciones de Firmware (de la distribuidora a los dispositivos)	400k-2000k	1 por dispositivo por evento de difusión (24 x 7)	<2 min - 7 días >98
10b	Actualización de programa/ configuración (de la distribuidora a los dispositivos)	25k-50k	1 por dispositivo por evento de difusión (24 x 7)	<5 min- 3días >98
11	Información de clientes y mensajería de clientes solicitando información de la cuenta (entre operadora y clientes en ambos sentidos)	50/200	Bajo demanda (7am – 10 pm)	<15 s >99
12	Administración de las instalaciones de red (de la distribuidora a los dispositivos de los clientes)	25	Bajo demanda (24 x 7)	<20 s >98

2.1.2.2 Aplicaciones de RRII en área extendida (WAN)

La red de área extendida (WAN) soporta las aplicaciones de seguimiento en tiempo real, control y protección, que pueden ayudar a evitar cortes en cascada, a partir de información en tiempo real

relacionada con el estado de la red eléctrica. También ofrece enlaces de comunicaciones para redes troncales de redes inteligentes; y cubre las largas distancias desde NAN / FAN a un centro de control.

Las aplicaciones WAN, incluidas la supervisión de área extendida, el control de área extendida y la protección de área extendida, requieren una mayor resolución de datos y un menor tiempo de respuesta que los típicos sistemas de gestión energética basados en SCADA. Mientras los SCADA trabajan con intervalos de actualización de medidas de varios segundos o incluso minutos, las aplicaciones de monitorización, control y protección de área extendida necesitan sobre 60 muestras por segundo.

La Tabla 2.4 resume los requisitos principales de distintas aplicaciones en términos de sus tamaños de trama de datos típicos, velocidades de muestreo, así como los requisitos de confiabilidad y latencia, junto con las tecnologías de comunicación que pueden soportar estas aplicaciones.

Tabla 2.4.- Requerimientos de los sistemas de red para aplicaciones de protección de área extensa, control y monitorización.

Aplicación	Tamaño típico de datos (bytes)	Requerimiento de Frecuencia de muestreo típica	de Latencia	Fiabilidad (%)	Tecnología de comunicación
Protección de área extensa					
Modo isla adaptativo	4 -157	Una cada 0.1 s	<0.1 s	>99.9	Cableada: -Fibra Óptica
Predicción sobre fluctuaciones en la frecuencia de la carga		Una cada 0.1 s	<0.1 s	>99.9	
Control de área extensa					
Control de estabilidad de tensión	4-157	Una cada 0.5-5 s	<5 s	>99.9	
Control de FACTS y HVDC		Una cada 30 s – 2 min	<2 min	>99.9	Inalámbrica
Control de fallo en cascada		Una cada 0.5-5 s	<5 s	>99.9	-WiMAX -Telefonía
Control de estabilidad del transitorio precalculado		Una cada 30 s – 2 min	<2 min	>99.9	

Control de estabilidad del transitorio en lazo cerrado		Una cada 0.02-0.1 s	<0.1 s	>99.9
Control de la amortiguación de la oscilación de la potencia		Una cada 0.1 s	<0.1 s	>99.9
Monitorización de área extensa				
Monitorización de la oscilación de potencia local	>52	Una cada 0.1 s	<30 s	>99.9
Monitorización de la oscilación de potencia en área extensa		Una cada 0.1 s	<0.1 s	>99.9
Monitorización de la estabilidad de la tensión local		Una cada 0.5-5 s	<30 s	>99.9
Monitorización de la estabilidad de la tensión de área extensa		Una cada 0.5-5 s	<5 s	>99.9
Estimación del estado basada en PMU		Una cada 0.1 s	<0.1 s	>99.9
Estimación del estado dinámica		Una cada 0.02-0.1 s	<0.1 s	>99.9
Estimación del estado asistida por PMU		Una cada 30 s – 2 min	<2 min	>99.9

2.2 Conclusiones y planteamiento de Objetivos

Una vez analizadas las funcionalidades de las RRII y sus requisitos de comunicaciones, queda evidenciado que se hace necesario disponer de modelos precisos de la latencia, ancho de banda y disponibilidad de las distintas alternativas de comunicación, para asegurar la viabilidad del despliegue de soluciones de RRII. Por eso, el primer objetivo de esta tesis se centra en analizar el comportamiento de varios canales de comunicación habituales en las RRII. El segundo objetivo consiste en evaluar la repercusión de las limitaciones de estos canales de comunicación, mediante

el estudio de dos casos de uso muy importantes en el despliegue de RRII, a saber, 1) la evaluación de la combinación de automatización y comunicaciones en los índices de calidad eléctrica; y 2) la influencia de las comunicaciones en las redes de control de ámbito extendido, mediante el análisis, simulación y experimentación del control remoto de un convertidor de potencia actuando en modo STATCOM. Para alcanzar estos objetivos se hace necesario, además, proponer un entorno de pruebas adecuado que permita simular y probar estos casos de uso incluyendo los canales de comunicación.

2.2.1 Análisis de los canales de comunicación

Se ha visto hasta ahora la importancia de las comunicaciones en las redes eléctricas inteligentes. Para poder cuantificar los efectos que producirán en las diferentes aplicaciones de RRII es necesario modelar y observar el comportamiento de diferentes canales de comunicación actualmente en uso en dichas redes.

Este análisis ha de ofrecer información de cada canal y de su estabilidad a lo largo del tiempo, desde el punto de vista de un sistema de control. Por lo tanto es necesario conocer el comportamiento acotado a unos límites de tiempo.

Los objetivos de esta Tesis en esta línea son:

- Analizar los parámetros de disponibilidad, probabilidad de fallo y tiempo de recuperación de los principales tipos de comunicación utilizados.
- Establecer un modelo para estas comunicaciones adaptados al análisis en redes inteligentes y sistemas de control.
- Acotar los valores de los periodos de control atendiendo al modelo de comunicación y su comportamiento a lo largo del tiempo.

2.2.2 Estudio de la influencia de las características de la comunicación y la automatización en el cálculo de los índices de calidad eléctrica

Los índices de calidad eléctrica se evalúan a partir de diferentes parámetros y tiempos de servicio. Entre esos tiempos se encuentran las latencias con origen en las comunicaciones. En la práctica actual, es habitual considerar como constantes los tiempos asociados a las comunicaciones y suponer una total disponibilidad del canal. El objetivo es demostrar la variación que se produce en los índices de calidad al introducir el comportamiento real de los canales de comunicación.

También se introduce, a través de la disponibilidad calculada del canal, la variación del modelo, ya que, si el canal no está disponible en el momento de producirse el fallo, el comportamiento del sistema varía.

2.2.3 Estudio de la influencia de las comunicaciones en las redes de monitorización y control de ámbito extendido, mediante el control remoto de convertidores de electrónica de potencia conectados a la red eléctrica

Uno de los campos donde la expansión de las RRII presenta mayores retos, es en lo que se ha venido en denominar área de control y monitorización de ámbito extendido, donde la influencia de la latencia y la disponibilidad de las comunicaciones se convierten en un aspecto crítico. Por ello se ha escogido como segundo caso de uso el control de un convertidor de potencia actuando dentro de un área de este tipo.

En los casos de interoperación de convertidores de potencia, se ejecutan varios lazos de control en diferentes niveles. El objetivo de analizar la influencia de las comunicaciones en el control de convertidores de alto nivel, es ofrecer una cuantificación de los efectos de los retardos y pérdidas en el canal sobre los parámetros de la red eléctrica y la salida del convertidor.

Además, se propondrán diversas líneas de actuación para mitigar los efectos que se producen en el control en caso de pérdida de la comunicación, haciendo posible realizar un control en red de varios convertidores, acotando los posibles efectos adversos producidos por las deficiencias en los canales de comunicación.

Capítulo 3.

Propuesta de entorno de pruebas para comunicaciones en redes inteligentes

3.1 Introducción

Para poder analizar el comportamiento y la influencia de las comunicaciones en los sistemas de control y medida de área extensa aplicados a redes inteligentes, es necesario caracterizar los diferentes canales de comunicación. También es necesario disponer de una plataforma que permita recibir consignas y enviar medidas mediante estos canales de comunicación.

En esta tesis doctoral, el entorno de pruebas debe, por tanto, permitir la obtención de datos para el modelado de los canales de comunicación, por un lado, y, por otro, emular distintos casos de uso de las RRII, donde sea evidente la influencia de las comunicaciones. Uno de los casos de uso elegido ha sido, dentro de los sistemas de medida de área extensa (WAMS, *Wide Area Measurement System*) y sistemas de control de área extensa (WACS, *Wide Area Control System*), el control de convertidores de potencia destinado a compensar potencia reactiva, dado la importancia que este tipo de servicios está adquiriendo en las RRII.

Por tanto, para mostrar los efectos de las comunicaciones en lazos de control se realizarán una serie de simulaciones y pruebas con un compensador estático (STATCOM, *STATIC COMPensator*), descrito en el Apéndice A, dando soporte a la red eléctrica en niveles de tensión mediante la inyección de potencia reactiva. En el apéndice se describen los controladores utilizados.

Este sistema es capaz de consumir o generar potencia reactiva a voluntad, modificando así las magnitudes de la red eléctrica según las relaciones tensión – potencia reactiva. Este sistema también ha sido preparado como laboratorio de experimentación remota para pruebas de algoritmos de control.

De la misma manera, los canales de comunicación tienen unas características específicas de ancho de banda, latencia y disponibilidad. Estas características influirán en el modo de interpretar las medidas recibidas debido a los retardos en los que se traducen. También se han de tener en cuenta a la hora de ajustar los lazos de control en los que se utilicen, ya que puede introducir un número variable de retardos en el envío de muestras entre distintos puntos.

En consecuencia, en este capítulo se presentan los entornos de pruebas con los que se han realizado los experimentos relativos a las propuestas de esta tesis, incluyendo:

1. Sistemas de medida de latencia de los canales de comunicación.
2. Simulaciones de los lazos de control de alto nivel para un convertidor funcionando en modo STATCOM, dentro de un WACS. Estos controladores de alto nivel se encadenan con controladores de bajo nivel que, aunque están fuera del objetivo de esta Tesis, dado que determinan el comportamiento del sistema propuesto, son analizados en detalle en el Apéndice de esta Tesis.
3. Pruebas sobre STATCOM, compuesto de:
 - a. Convertidor de potencia
 - b. Interfaz con el convertidor y sistema de procesamiento
 - c. Aplicación de configuración, representación y conexión de datos

En lo que se sigue, se aborda la descripción detallada de cada uno de ellos.

3.2 Caracterización de canales

Para caracterizar las redes de comunicación y poder ajustar los modelos de disponibilidad es necesario realizar un estudio de los canales de comunicación empleados. De esta manera se puede obtener una idea de hasta qué punto se pueden utilizar los distintos canales para realizar un control de alto nivel, o para actuaciones puntuales.

En esta tesis se van a estudiar cuatro tecnologías para comunicaciones en Redes Inteligentes, a saber, comunicaciones móviles GPRS y 3G, ADSL y Ethernet. Los dos canales basados en telefonía móvil se utilizan en puntos geográficamente inaccesibles para redes cableadas en centros de transformación de la red eléctrica. Los canales cableados se utilizan en centros de transformación y dispositivos localizados en zonas urbanas. De este modo se cubre la mayor parte del espectro de canales utilizados para las comunicaciones en la red eléctrica. Para cada canal se modelan su disponibilidad, probabilidad de fallo y tiempo de restauración. Se empleará un modelado estadístico a partir de las medidas de latencia realizadas para cada tecnología. Estas medidas se han realizado con el protocolo de gestión de grupos de Internet (IGMP, *Internet Group Management Protocol*), que permite medir el tiempo que un paquete tarda en llegar de un dispositivo a otro y volver.

También se ha realizado un experimento utilizando la aplicación descrita en el apartado 3.3.3 para analizar la comunicación extremo a extremo entre los laboratorios SATIE de la Universidad de Cergy, Francia, y el laboratorio GEISER, en la Universidad de Alcalá.

3.2.1 Experimento para la caracterización de canales 3G/GPRS

En el caso de redes móviles, se ha analizado por un lado la red de comunicaciones entre equipo terminal y operador, caracterizando el canal desde una única ubicación, y por otro lado, en base a

la ubicación de los diferentes centros de transformación (CT) desplegados en campo en la red distribución de una compañía eléctrica nacional.

Para caracterizar los canales móviles, se ha reproducido el entorno real de operación de una empresa del sector eléctrico, empleado para ello una serie de *routers* adaptados a las redes de comunicación VPN internas de la empresa. Para tomar las medidas de latencia se ha empleado la utilidad de diagnóstico de redes Ping, que, según su autor [«The Story of the PING Program»], basa su teoría de cálculo en el funcionamiento de los sonar en submarinos. Las muestras se han tomado con intervalos consecutivos de 2 segundos, durante periodos de entre 6 y 12 horas.

Las medidas de las comunicaciones de la red desplegada han sido proporcionadas por el operador en el marco del Proyecto de Redes Inteligentes en el Corredor del Henares (PRICE) descrito en el apartado 1.2, aportando 48 horas consecutivas de muestras tomadas cada 5 segundos.

Tras el análisis de ambas redes se puede determinar que el nivel de cobertura y por tanto la ubicación de la antena, siempre que el equipo no pierda el registro en la red móvil, no afecta significativamente a la latencia obtenida, pero si a la tasa de fallos.

Este estudio se basa en dos análisis diferentes. Por un lado, se analizará de forma estadística el comportamiento de los canales, proporcionando información acerca de la disponibilidad del canal y de las probabilidades de fallo. Por otro lado, se analiza el comportamiento a lo largo del tiempo, abriendo una ventana mayor que muestra la estabilidad de cada canal con respecto a su latencia media.

De este modo se obtiene una idea detallada del comportamiento de cada canal en términos de fiabilidad y velocidad para distintos casos de uso.

Este experimento se puede hacer de forma generalizada implementando una red completa e incluyendo equipos finales para medir el tiempo extremo a extremo entre ambos dispositivos.,

3.2.2 Experimento de medida para la caracterización de canales ADSL

Para los CT que se encuentren en áreas urbanas, es muy posible utilizar líneas de comunicación ADSL dada su alta disponibilidad actualmente. Utilizando estas líneas, las empresas de distribución pueden conectarse mediante las operadoras de comunicaciones a sus redes privadas.

Las medidas en este tipo de canales se han realizado mediante la recolección de información de latencia igual que en el caso anterior, medida cada 5 segundos durante 48 horas. Para ello, se ha medido la latencia entre un equipo en un CT, conectado mediante una línea ADSL a la red del operador a través de una conexión de Red Privada Virtual (VPN, *Virtual Private Network*).

Estas medidas han sido proporcionadas por el operador en el marco del Proyecto de Redes Inteligentes en el Corredor del Henares (PRICE) descrito en el apartado 1.2, igual que en el caso anterior.

3.2.3 Experimento de medida para la caracterización de canales Ethernet

En este caso, las medidas se han tomado dentro de la Universidad de Alcalá, entre dos laboratorios que comparten una red Ethernet, pero con la suficiente complejidad como para poder observar una mínima variación.

En la conexión entre los dos equipos utilizados para realizar la medida se encuentran cuatro switches gestionados de altas prestaciones, un router para la conexión de los dos segmentos de red, y aproximadamente 50 m de cable de categoría 6.

3.2.4 Experimento de medida para la caracterización de canales desconocidos de altas prestaciones extremo a extremo

Utilizando la aplicación desarrollada descrita en el apartado 3.3.3 se han realizado varios experimentos para medir las latencias y el ancho de banda utilizado para la gestión, control y monitorización del sistema de control del convertidor.

Estos experimentos han sido llevados a cabo tanto en modo monitorización como en modo control, manteniendo siempre el convertidor en funcionamiento en el laboratorio del grupo de investigación GEISER en la Universidad de Alcalá. Las conexiones remotas se ha realizado desde la propia Universidad utilizando la red Ethernet disponible, con un ancho de banda de 100 Mbps, y desde el laboratorio del grupo de investigación SATIE, en la Universidad de Cergy, Francia, a través de la conexión a internet disponible.

La aplicación utilizada se ha programado con dos modos de funcionamiento. En el modo de monitorización se puede observar el estado del convertidor de la misma manera que se hace en modo local. Se observan las mismas variables y con el mismo periodo de control, aunque la actuación queda reducida a unas pocas órdenes, como el arranque y la parada del sistema, o algún cambio menor de referencia dado el elevado ancho de banda utilizado para la monitorización.

Por el contrario, en el modo de control, se reduce el número de variables transmitidas y su periodo de muestreo, pero se utilizan ambos sentidos de la comunicación con las mismas prestaciones.

Aunque en cada uno de los modos se han medido tanto la latencia como el ancho de banda, se ha prestado especial interés a la medida de la latencia en el modo de control, ya que esta medida influirá de forma significativa en el desarrollo de lazos de control de nivel superior aplicados en algunos

casos de uso de las Redes Inteligentes. La medida del ancho de banda en este modo no es tan restrictiva debido a que el flujo de datos no es demasiado elevado (alrededor de 50 kbytes/s) en comparación con el ancho de banda del canal.

En el caso del modo de monitorización, sin embargo, no es tan acusado el efecto de la latencia como el del ancho de banda necesario, ya que se envían 64 variables de 4 bytes por periodo de control, cada 200 μ s, lo que produce un flujo de datos de 1,2 Mbytes/s en el caso de envío completo del estado del convertidor, tal y como se explica en [Rodríguez, F. J., et al. 2009]. Ya que este modo pretende mostrar el estado interno del convertidor, el efecto de la latencia se debe tener en cuenta en casos extremos en los que se sitúe de media por encima de los 200 ms (tres órdenes de magnitud). Hay que tener en cuenta que en este modo, no existe un sistema de control, y los comandos que se pueden enviar quedan reducidos al arranque y parada del sistema.

3.3 Pruebas sobre STATCOM

Los algoritmos de control descritos en el apéndice A, requieren para su ejecución de medidas tomadas en tiempo real, considerando como tal aquel que asegura un correcto funcionamiento del sistema. En estas circunstancias, es necesario desarrollar electrónica con altas capacidades de cálculo y elevada capacidad de comunicación tanto interna como externamente.

Entre las opciones de procesadores digitales con diseños de alta eficiencia, cabe destacar por su popularidad dos de ellos: DSP's y FGPA's. La principal ventaja de los DSP's es su flexibilidad software y su capacidad de ejecutar complejos algoritmos de control con distintas operaciones aritméticas. Aunque, por otro lado, su principal limitación es la ejecución secuencial del código.

En los últimos años, la tendencia a utilizar Hardware concurrente para propósitos de control está incrementando y el uso de las FPGA's está siendo cada vez más popular debido a que proporcionan mayor rendimiento en la computación masiva y repetitiva [Fratta, A., et al. 2004]. Además, la portabilidad de código está resuelta mediante el uso de lenguajes de alto nivel como VHDL o VERILOG.

Los controladores en tiempo real basados en soluciones DSP-FPGA integradas son muy adecuados debido a que combinan características de ambos sistemas. Gracias a la alta capacidad de cálculo, el bajo coste y su flexibilidad, esta solución de control ha sido propuesta para su uso en el control de generadores de inducción de doble devanado [Iwanski, G., Koczara, W. 2004], convertidores multi celda [Gateau, G., et al. 2004] y otros sistemas [Cecati, C., et al. 2004], [Dinavahi, V., et al. 2004], [Lienhardt, A., et al. 2007], [Yu, J., et al. 2007]. El resultado se traduce en una mejora en el rendimiento del convertidor y en una notable reducción del tiempo de desarrollo del software.

En lo que afecta a los DSP's, existen varias diferencias entre los DSP's de coma fija y de coma flotante. El hecho de que tengan una mayor flexibilidad matemática, más precisión y la reducción en el tiempo de desarrollo hacen que esta opción sea muy interesante en sistemas que precisan de aritmética sobre el conjunto de los números reales. Por esta razón se ha elegido un DSP de coma flotante para esta aplicación.

La principal desventaja de estos DSP's es que los periféricos integrados no siempre se adaptan a las necesidades de un sistema como este. Esa es la razón por la que se ha elegido un dispositivo FPGA para la implementación de estos periféricos.

Una característica fundamental que las unidades de generación distribuida modernas han de tener es la capacidad de transferir, monitorizar y almacenar una gran cantidad de variables internas. Esta estructura permite la comunicación y la compartición de información entre distintas unidades con un operador central remoto. Esta información puede enviarse on-line a un host local o remoto para que pueda tomar decisiones en cuanto a las consignas de diferentes unidades de generación. Para incluir estas capacidades se ha dotado al sistema propuesto de conectividad USB y CAN-Bus.

La arquitectura propuesta tiene numerosas aplicaciones. En este trabajo es utilizada para realizar el control de un convertidor NPC 'Back-to-back' de 150 kVA mostrado en la Figura 3.1. Esta aplicación deriva del sistema descrito en [Bueno, E. J., et al. 2008], pero en este caso, solo se utilizará uno de los convertidores funcionando como compensador estático.

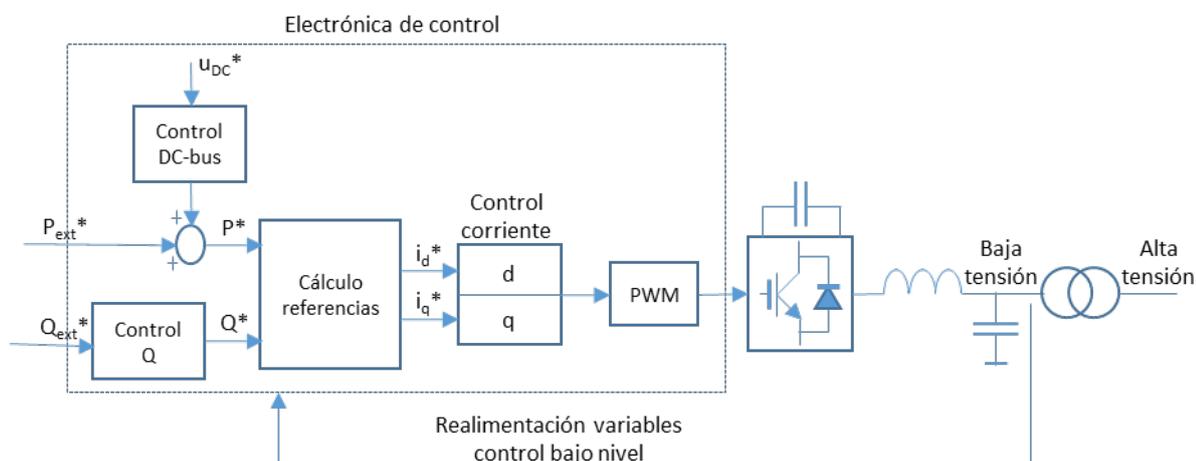


Figura 3.1. Diagrama de bloques del sistema completo.

El sistema completo puede dividirse en: Sistema de electrónica de potencia, el sistema electrónico de control, y los interfaces de comunicación, explicados en detalle en el siguiente apartado. Como se indica en la Figura 3.1, el sistema de control electrónico está compuesto por el sistema de control de potencia, basado en un DSP de coma flotante y una FPGA.

3.3.1 Descripción del entorno

3.3.1.1 Convertidor de Potencia.

Este convertidor es la base del funcionamiento del STATCOM. Se encarga de modular una fuente de tensión en la amplitud, fase y frecuencia deseada. A través del control del convertidor, esta fuente se construye de manera que genera o consume la potencia reactiva requerida.

3.3.1.1.1 Características técnicas del convertidor

El sistema de electrónica de potencia es un convertidor ‘Back-to-back’ de tres niveles NPC. Este convertidor está formado por dos inversores trifásicos NPC. Se compone de dos convertidores en fuente de tensión (VSC, Voltage Source Converter). El VSC1 está conectado a la red eléctrica a través de un filtro LCL, mientras que el VSC2 se conecta a una máquina AC. La potencia nominal del convertidor es de 100 kVA, limitado por instalación a 50 kVA y se trata de una estructura completamente bidireccional, es decir, puede entregar energía a la red y por otro lado tomar energía de la red para excitar una máquina AC [Bueno, E. J., et al. 2008]. Para las pruebas de la tesis, solo se utilizará el VSC conectado a la red.

La Figura 3.2 representa un diagrama de bloques más detallado del convertidor. Además de los convertidores VSC1 y VSC2, el sistema está formado por:

- los contactores auxiliar y principal más las resistencias de carga suave de los condensadores del DC-bus;
- el filtro de conexión a la red eléctrica, que es un filtro LCL, cuya función es reducir el contenido armónico de las corrientes que se entregan a la red eléctrica; y un rectificador auxiliar.

Las aplicaciones del rectificador auxiliar pueden ser las siguientes:

- En el caso de usar el sistema únicamente para excitar el motor AC, se puede desconectar el VSC1 y el rectificador auxiliar se emplea para alimentar el DC-bus. Así el sistema pasa a ser unidireccional.
- Otra opción es desconectar el rectificador del DC-bus (puntos P y N) y emplearlo como carga no lineal conectada al punto de acoplamiento común (PCC, *Point of Common Coupling*). De esta forma, el VSC1 trabaja como convertidor controlado y se puede emplear para realizar ensayos como filtro activo.

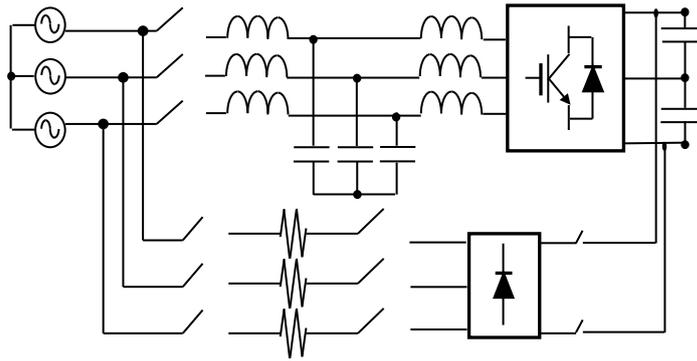


Figura 3.2. Diagrama de bloques con todos los elementos que forman el "Sistema de Electrónica de Potencia" del "CONDOR Converter".

En esta Tesis se utilizará una modificación de este esquema, en el que solo se utiliza el VSC1 y funciona como STATCOM.

La Figura 3.3 muestra una fotografía del "Sistema de Electrónica de Potencia" donde se han indicado las partes más importantes. En el lado izquierdo están todos los elementos relacionados con la conexión a red, contactores auxiliar y principal, rectificador auxiliar y el filtro LCL; mientras que en el lado derecho se encuentran los dos VSCs provistos de un mecanismo de ventilación forzada, junto con los 'drivers' de los IGBTs. Las características son las siguientes:

- Potencia del convertidor: 100 kVA.
- Tensión nominal: 400 V_{AC}.
- Tensión del carril del DC-bus: $u_{DCmax} \approx 1200$ V.
 - Valor de los componentes del filtro LCL:
 - $L_1 = 0.5$ mH / 175 A_{rms}.
 - $L_2 = 0.25$ mH / 150 A_{rms}.
 - $C_o = 100$ μF / 400 V_{AC}.
- $C_{DC1} = C_{DC2} = 2000$ μF / 750 V_{DC}.
- IGBTs:
 - FD300R12KE3 (<http://www.eupec.com>)
 - DF300R12KE3 (<http://www.eupec.com>)

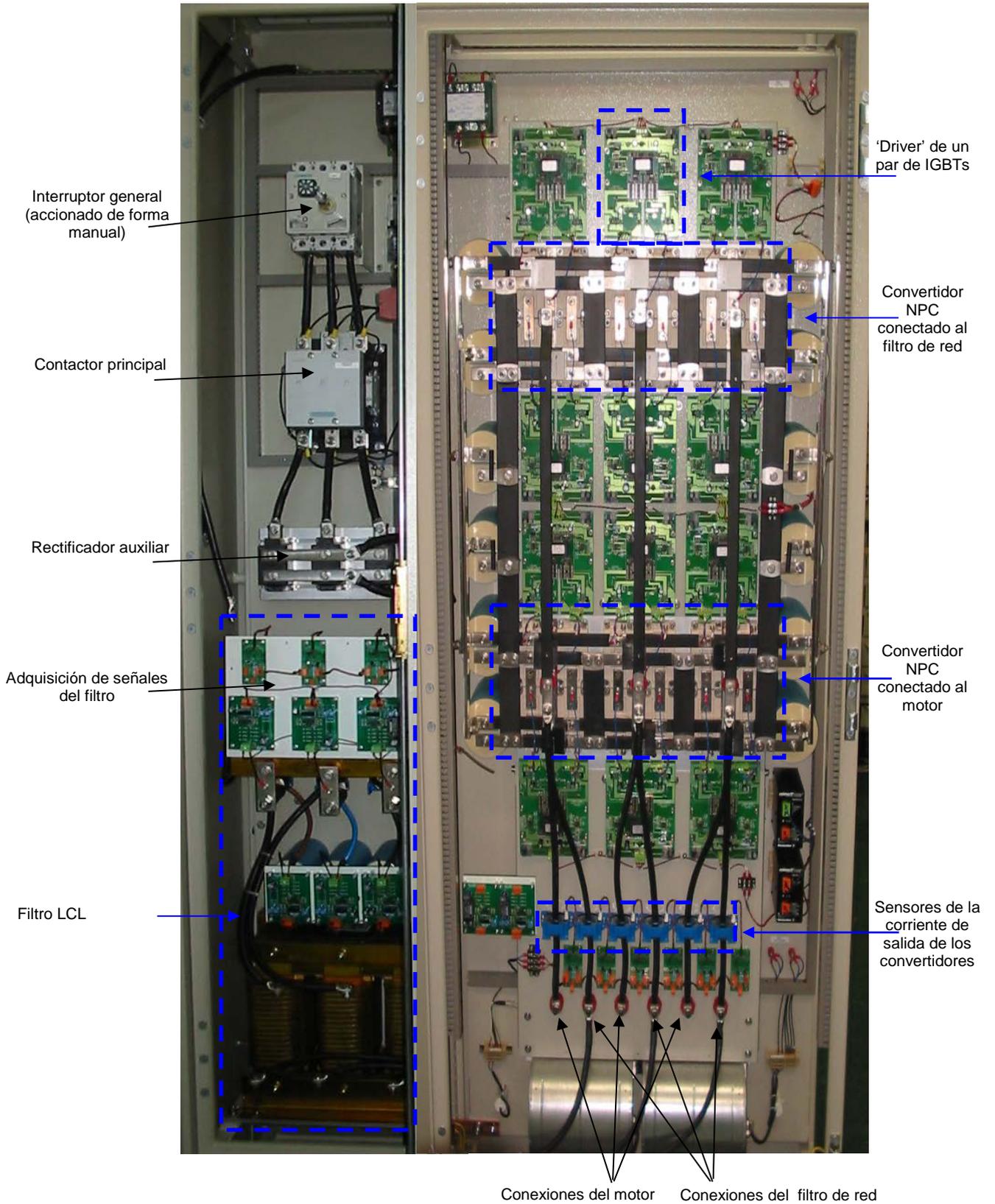


Figura 3.3. Fotografía del convertidor

3.3.2 Sistema de adquisición, procesamiento y comunicación de primer nivel

Se propone utilizar una solución basada en una arquitectura DSP-FPGA, utilizando un DSP de coma flotante que posibilita la implementación de algoritmos complejos, ya que el procesamiento en coma flotante proporciona más precisión en los cálculos y mayor velocidad para realizarlos.

Una característica muy importante en estos sistemas es la posibilidad de almacenar, monitorizar y transferir grandes cantidades de información, ya que existe un gran número de variables internas y de medidas que son interesantes para analizar el funcionamiento del sistema.

Existen diversas formas de realizar la comunicación de una arquitectura de este tipo con el exterior. Debido a las necesidades de comunicación que presenta el sistema, para poder transferir las variables, se puede optar por utilizar un bus de alta velocidad como USB o 'Firewire', o bien por dotarlo con conectividad por medio de Ethernet. En este caso se ha optado por utilizar un bus USB 2.0 que proporciona velocidad suficiente con una latencia reducida, y, siendo un sistema no determinístico, la incertidumbre introducida por la comunicación, es muy inferior a los periodos de muestreo de control.

Esta arquitectura ha sido descrita en varias publicaciones internacionales relacionadas con esta tesis [Bueno, E. J., et al. 2009], [Girón, C. 2007] .

3.3.3 Entorno de control y comunicación de segundo y tercer nivel

El entorno de control de segundo nivel se ejecuta en un ordenador, dentro de una aplicación que ofrece un interfaz de usuario, un gateway para comunicaciones y un simulador de controlador de tercer nivel, tal y como se puede ver en la Figura 3.4.

Esta aplicación ha sido diseñada como interfaz para el control remoto del convertidor [Rodríguez, F. J., et al. 2009]. En la Figura 3.5 se puede observar una imagen con la aplicación ejecutándose mientras se realiza un experimento. En ella se pueden identificar varias zonas: control del experimento, configuración de los parámetros de control internos al controlador de primer nivel, identificación de errores, valor de registros internos, registro y representación gráfica. De modo que con esta aplicación se pueden realizar experimentos, registrarlos, modificarlos y observar el comportamiento en tiempo real.

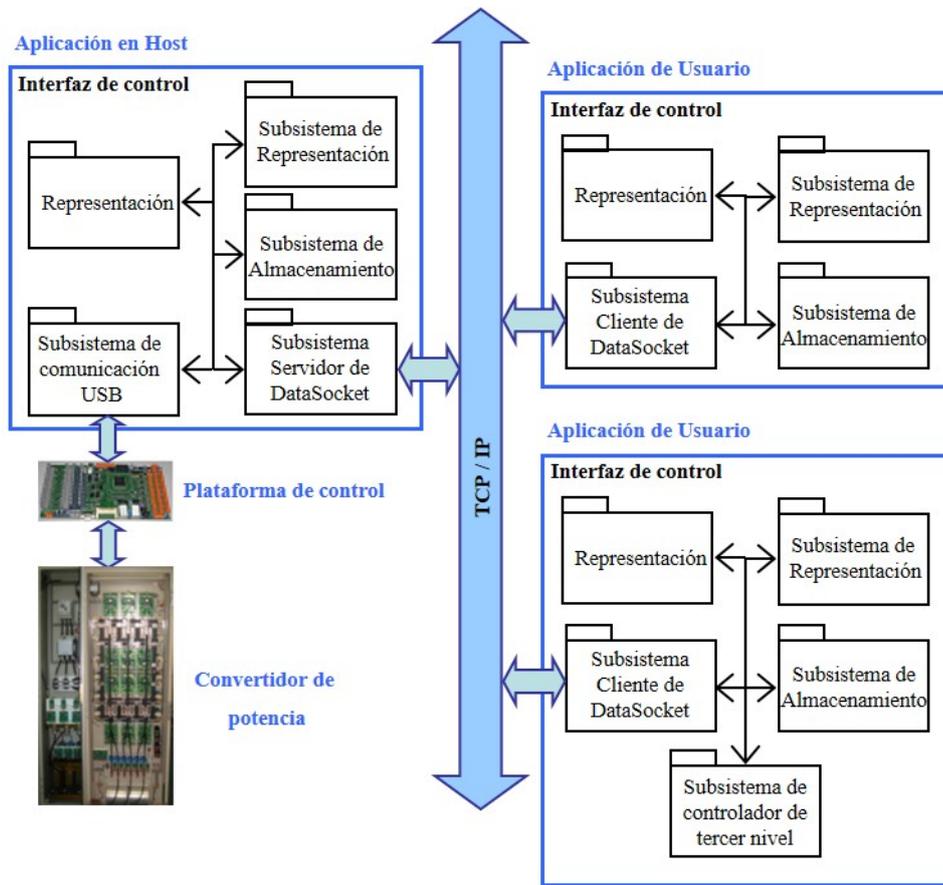


Figura 3.4.- Esquema de la aplicación de control del convertidor

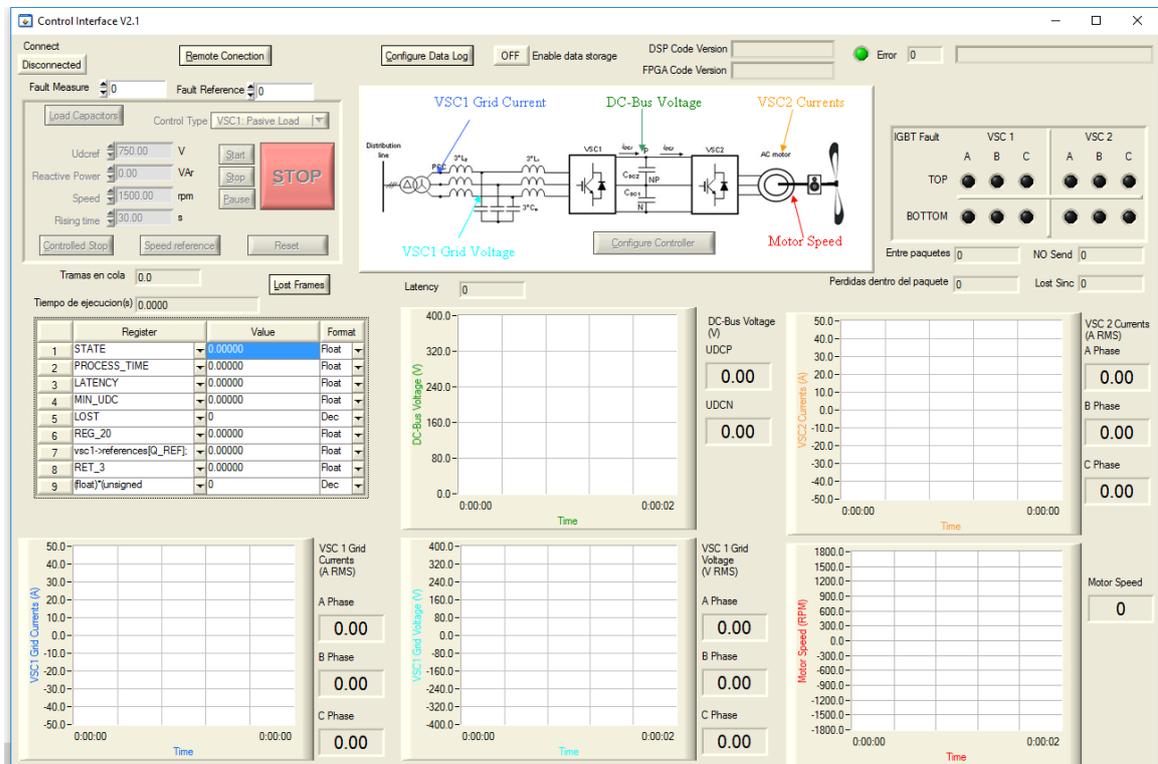


Figura 3.5.- Interfaz de usuario del control del convertidor

El sistema de comunicaciones propuesto es capaz de realizar la conexión con el sistema de control descrito en el apartado 3.3.2 tanto de forma local como remota. Si se detecta el dispositivo USB

que identifica la placa de control trabajará en modo local, y en caso contrario intentará conectar con un equipo remoto que actúe como servidor.

En la Figura 3.6 se puede ver un diagrama de bloques con el esquema de comunicaciones utilizado en el experimento definido en el apartado 3.4.2 .

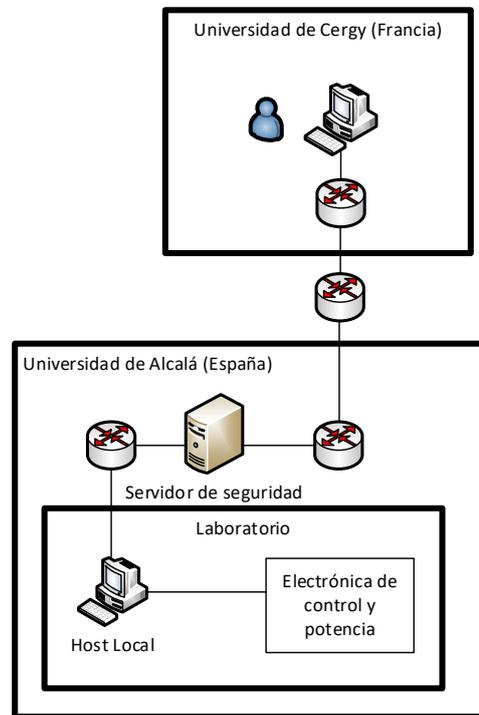


Figura 3.6.- Esquema de comunicaciones

Aparte de realizar las labores de Gateway y de interfaz de usuario, tiene integrado un controlador con un simulador de canal de comunicación, que permite emular retardos y pérdidas en la entrada de realimentación del controlador y en la salida de actuación hacia la planta. Este controlador permite ensayar el comportamiento del convertidor en casos extremos simulando las pérdidas en los canales en los momentos indicados, ya que los canales tienen una componente estocástica que impide conocer a priori el instante en el que se producirán las pérdidas de comunicaciones.

El controlador implementado es el descrito para las simulaciones en el apartado 3.4.2.

Este entorno ha sido utilizado también para realizar las medidas de canales de comunicación en modo cliente servidor en el apartado 3.2.4.

3.4 Descripción de los algoritmos de control de alto nivel de un STATCOM

3.4.1 Descripción del esquema general

El convertidor descrito en el apartado anterior se empleará para analizar la influencia de las comunicaciones en un caso de uso típico de WACS. Para ello es necesario realizar el control remoto del convertidor actuando como STATCOM. La arquitectura de control de un convertidor de electrónica de potencia en general está constituida por un conjunto de controladores conectados en cascada, definiéndose dos niveles:

1. Uno de bajo nivel con periodos de muestreo menores de 200 μ s, que deben asegurar la correcta operación del convertidor incluso ante perturbaciones. Por tanto estos controladores en líneas generales deben ser locales; y
2. Uno de alto nivel destinado a realizar el soporte de red con periodos de muestreo del orden de los ms. Este nivel es en el que se opera en las aplicaciones de RRII en WACS y sobre él se analizará la influencia de los canales de comunicaciones, emulando las posibles acciones que realizan los operadores de redes eléctricas, incluyendo no solo el envío de consignas si no también la operativa de los lazos de control.

Los algoritmos de control de bajo nivel y de sincronización con la red, y el modelo del STATCOM están descritos en el Apéndice A, y a continuación en este apartado se explican los algoritmos de alto nivel de soporte de tensión de un convertidor conectado a la red eléctrica, para posteriormente analizar qué consideraciones hay que tener en cuenta cuando en dichos controles se incluye un canal de comunicaciones.

Por motivos ajenos al desarrollo de esta tesis, ha sido imposible dotar al sistema de un elemento de almacenamiento de energía. Sin este elemento no se puede inyectar potencia activa en la red, y, por lo tanto, no es posible hacer control de frecuencia. De todos modos, esto no es relevante para el objetivo de analizar la estabilidad del lazo de control con comunicaciones y las propuestas para añadir robustez a este lazo.

3.4.2 Descripción de los lazos de control

En un STATCOM el control de potencia reactiva puede estar formado por tres bloques:

- Control de Q
- Control de V
- Control de PF (factor de potencia).

Cada uno de los controles, representa una funcionalidad de operación del STATCOM. Los tres modifican la potencia reactiva en el punto de conexión del convertidor a la red eléctrica, denominado PCC, por tanto, la tensión en dicho punto y a la vez el factor de potencia, por lo que solo uno de ellos es seleccionable en cada caso.

Aunque los controladores y el sistema ofrecen la posibilidad de realizar soporte de tensión y frecuencia, solo se van a realizar pruebas con soporte de tensión por no disponer físicamente de ningún elemento de almacenamiento de energía.

3.4.2.1 Control de Q

El diagrama de bloques del controlador de potencia reactiva es el que se muestra en la Figura 3.7. Con este controlador, si la entrada de referencia Q^* se fija a 0, el convertidor es el que entrega la potencia reactiva consumida por el banco de condensadores del filtro de red y todos los elementos magnetizantes que hay entre el convertidor y el punto de conexión del convertidor a la red eléctrica (PCC), y por tanto el desplazamiento del factor de potencia (DPF) en el PCC sea 1. Si no se emplea este controlador, el DPF en el PCC será inferior a 1.

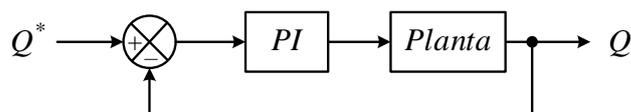


Figura 3.7 Controlador de potencia reactiva.

En cuanto a la señal de realimentación, Q , en función de las transformaciones de las tensiones y corrientes trifásicas en el punto de acoplamiento y su posterior transformación a componentes dq [Krause, P. C., et al. 2013], se obtiene a partir de la siguiente expresión:

$$Q_{PCC} = -e_{dPCC} \cdot i_q + e_{qPCC} \cdot i_d \quad (3.1)$$

Esta señal se pasa por un filtro de primer orden, antes de aplicarla al controlador. La salida del controlador es Q_{PCC} , y para obtener la consigna de corriente en el eje d , se pasa por un calculador de referencias y a su vez limitador de las consignas de corriente.

La ganancia de la planta se podría considerar que es 1, por tanto la función del controlador PI, es suavizar la respuesta ante variaciones de consigna o de carga, además de asegurar un error en régimen permanente nulo. Para ajustar este controlador de forma independiente al lazo de control de corriente interno, se fija un tiempo de establecimiento 10 veces más lento que el tiempo de establecimiento del controlador de corriente. En este caso se ha fijado un $t_s = 50$ ms.

3.4.2.2 Control de V

La Figura 3.8 representa el esquema unifilar de un STATCOM conectado a un punto de la red eléctrica, cuyo equivalente Thevenin se representa por una fuente de tensión ideal y una inductancia equivalente formada por L_g y R_g .

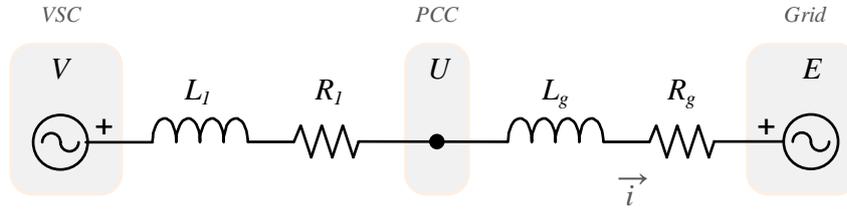


Figura 3.8 Esquema unifilar del STATCOM conectado a la red eléctrica.

A partir de la figura anterior, es posible desarrollar el modelo en pequeña señal en ejes dq de la dinámica de la tensión en el PCC, que se expresa de la siguiente forma:

$$\vec{u}(t) = R_g \vec{i}(t) + L_g \frac{d\vec{i}(t)}{dt} + j\omega_1 \vec{i}(t) + \vec{e}(t) \quad (3.2)$$

Descomponiendo esta expresión en la parte real e imaginaria, suponiendo que el producto $R_g \vec{i}(t) \approx 0$ y que $L_g \frac{d\vec{i}(t)}{dt} \approx 0$, dado que la dinámica del control de tensión en el PCC es muy lenta, se obtiene:

$$\begin{aligned} u_d(t) &= \omega_1 L_g i_q(t) + e_d(t) = 0 \\ u_q(t) &= \omega_1 L_g i_d(t) + e_d(t) \end{aligned} \quad (3.3)$$

$u_d = 0$ porque el sistema de detección de la fase de la tensión de red, en este caso un PLL conectado en el PCC, se sintoniza de forma que la proyección de la tensión del PCC sobre el eje d sea 0. Teniendo en cuenta todas estas consideraciones, se puede representar el modelo de tensión en el PCC como se representa en la Figura 3.9. Dada la simplicidad de este modelo, el control de tensión en el PCC siempre se aborda trabajando en los ejes de referencia dq (ver apartados 11.4 y 11.5 de [Yazdani, A., Iravani, R. 2010]).

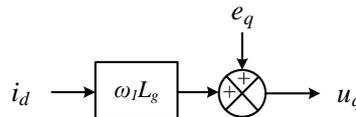


Figura 3.9. Modelo en ejes dq del control del PCC.

La posibilidad de modificar la tensión en el PCC solo es posible si la red tiene una impedancia de red no nula. Los márgenes de variación de la tensión serán mayores, cuanto mayor sea la impedancia

de la red. Si esta impedancia es pequeña, para conseguir variaciones de tensión en el PCC, será imprescindible inyectar o consumir enormes corrientes en la red eléctrica. En general, cuando se estudia el control de convertidores conectados a la red eléctrica, se indican los efectos negativos de esta impedancia, pues ralentizan la dinámica de los lazos internos del control, lo que puede afectar a la dinámica global del convertidor. Y además, en el caso de acoplar el STATCOM al PCC con filtro L, si la impedancia de línea es comparable a la impedancia del filtro de red, es necesario sobremuestrear la tensión del PCC según será analizado en el apartado A.5.

La regulación de tensión en el PCC mediante un STATCOM se basa en la Figura 3.10. Las diferentes líneas de carga representan la característica tensión corriente reactiva de la red. Entonces, si el STATCOM es configurado para regular la tensión en el PCC, sería capaz de fijar en VT la tensión de referencia, independientemente de la línea de carga de la red.

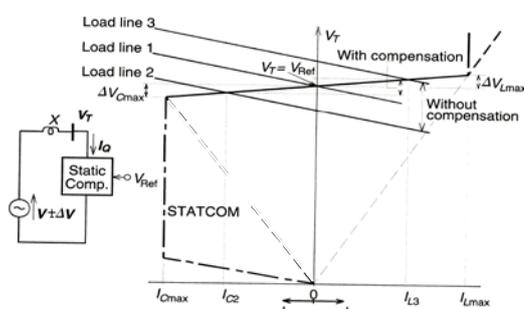


Figura 3.10. Regulación de tensión en el PCC con un STATCOM [Hingorani, N., Gyugyi, L. 2000]

Como regulador se propone el que se muestra en la Figura 3.11, que está dotado de un controlador PI, una ganancia *antiwindup*, y una ganancia *droop* que se resta al error entre la referencia y la medida. El ajuste de las constantes proporcional, integral y *antiwindup* se realiza siguiendo la metodología propuesta en el anexo A. En cuanto el *droop*, tiene la siguiente funcionalidad (pág. 183 de [Yazdani, A., Irvani, R. 2010]):

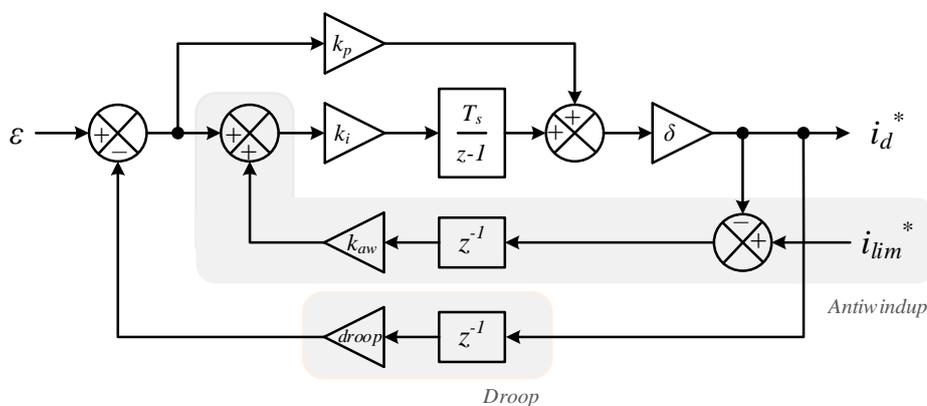


Figura 3.11. Controlador de la tensión en el PCC.

1. El rango de operación lineal del compensador con rangos máximos capacitivos e inductivos se extienden si se añade una regulación tipo “droop”. Esto significa que la tensión en el PCC será menor que la nominal cuando se está en la zona de regulación capacitiva, mientras que será mayor que la nominal cuando se está en zona de regulación inductiva. Esto es porque el “droop” provoca que el controlador de tensión en el PCC no tenga un error nulo en régimen permanente.
2. Una regulación perfecta (es decir con un “droop” = 0) podría resultar en una pobre regulación y con tendencia a oscilar, si el sistema tiene una baja impedancia dentro del rango de frecuencias de trabajo.
3. El “droop” tiende a compartir entre los diferentes compensadores conectados en paralelo al PCC el control de tensión en el PCC. Si el “droop” es definido a 0, se producirían elevadas corrientes de recirculación entre convertidores, ya que podría ocurrir que hubiese compensadores intentando imponer en la red tensiones con pequeñas variaciones.

En sistemas comerciales, la definición del “droop” suele ser aproximadamente de 0.03 pu. Con este valor se verifican las características indicadas anteriormente, pero por otro lado, la tensión se mantiene cerca de los valores de referencia. Además, se definen características de “droop” con zonas muertas alrededor de la tensión de referencia, como se muestra en la Figura 3.12

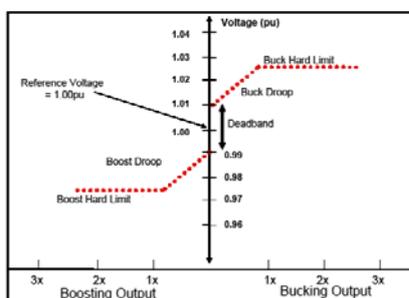


Figura 3.12. Típica definición de “droop” en un STATCOM comerciales.

Por último indicar que toda la teoría presentada en este apartado hace referencia a control de tensión en el PCC del sistema trifásico completo, con consignas equilibradas. Se puede desarrollar esta misma teoría para sistemas desequilibrados desarrollando los modelos de pequeña señal de la dinámica de tensión en el PCC para las secuencias positiva y negativa, lo cual daría como resultado un control de tensión en el PCC independiente por fase.

3.4.2.3 Control de PF

El control del factor de potencia (PF) consiste en emplear el controlador de potencia reactiva, pero pasarle como referencia de potencia reactiva la siguiente:

$$q^* = \frac{P}{PF^*} \sqrt{1 - PF^*} \quad (3.4)$$

siendo PF^* la referencia del factor de potencia, q^* la referencia que se aplica al controlador de potencia reactiva y P la potencia real medida en el PCC. Aunque el factor de potencia es una variable que no tiene signo, en este caso se le añadirá un signo a la consigna, de forma que + indicará comportamiento capacitivo, y – indicará comportamiento inductivo.

3.4.3 Simulador de canal de comunicaciones con pérdidas y latencia variable

Para introducir la influencia del canal de comunicaciones, se propone el esquema de la Figura 3.13 que comprende los niveles de control primario y secundario. En la Figura 3.14 se muestra el controlador secundario incluyendo los bloques que simulan los fallos y retardos producidos por las comunicaciones. Se ha simplificado el efecto de las comunicaciones simulándolo como un retardo variable tanto en el canal de la actuación, correspondiente a la salida del controlador, como en el canal de realimentación, correspondiente a la recepción de las medidas en el PCC, de forma que se pueda observar el efecto que produciría un problema de comunicaciones en un momento determinado. Esta simplificación se toma dado que en caso de que el retardo de las comunicaciones sea menor de un periodo, y siempre que la muestra llegue antes del instante de aplicación, este retardo no afectará al funcionamiento del sistema.

El controlador secundario de la Figura 3.14 es un control PI que incluye un antiwindup a la salida. Los bloques Delay In y Delay Out son iguales al mostrado en la Figura 3.15. Este bloque aplica la secuencia de retardos deseada, en un retardo que se va incrementando en cada periodo, de modo que mantiene a la salida la muestra de la entrada en el instante en el que el contador empieza a incrementarse, coincidiendo con el flanco de subida de la secuencia programada. En el instante en el que la secuencia pasa a valer 0, el contador se resetea y el retardo pasa a ser de 0 muestras. El resultado es una simulación de pérdida manteniendo la última muestra recibida.

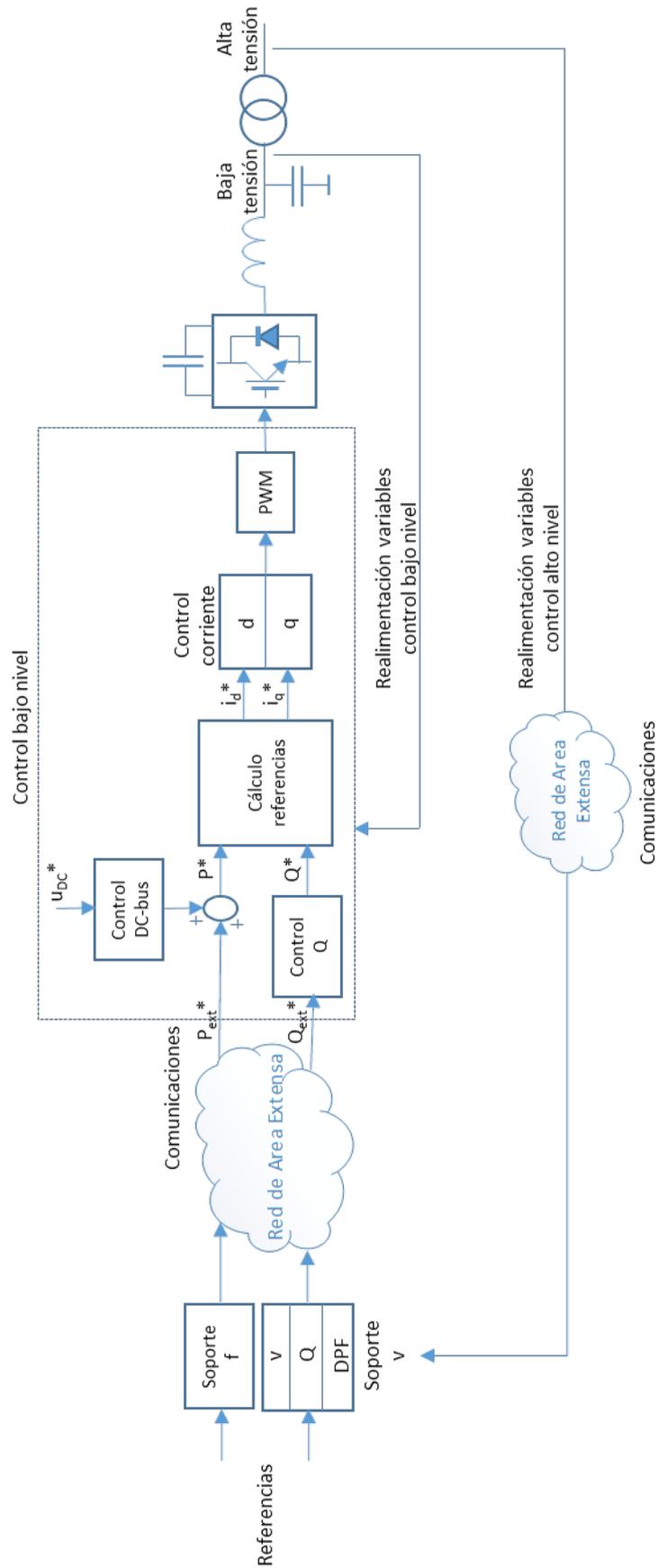


Figura 3.13 Esquema de control primario

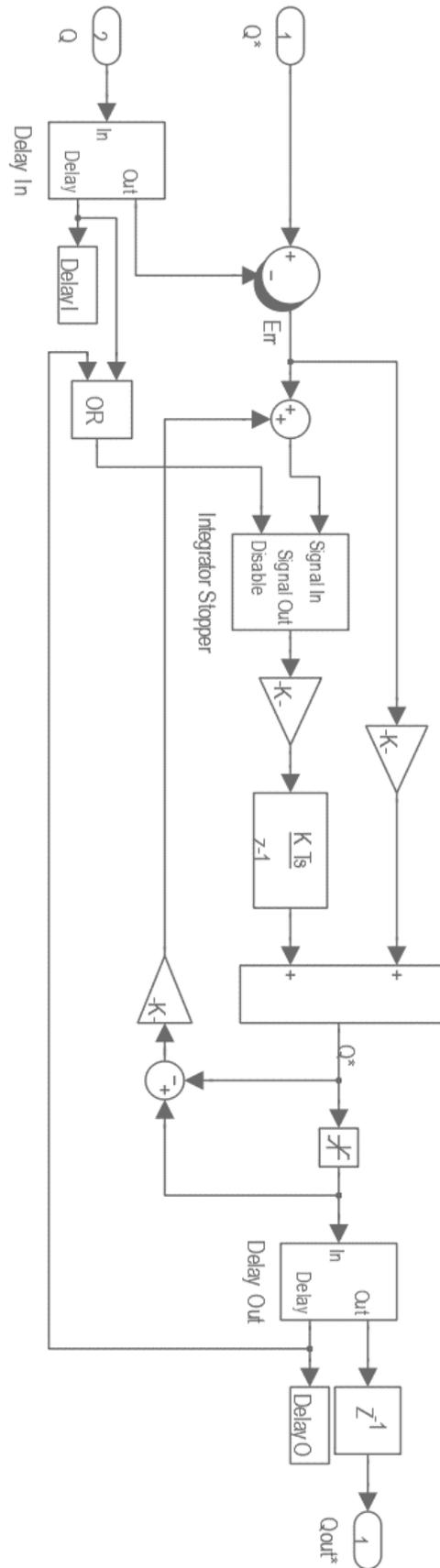


Figura 3.14. Esquema de control secundario

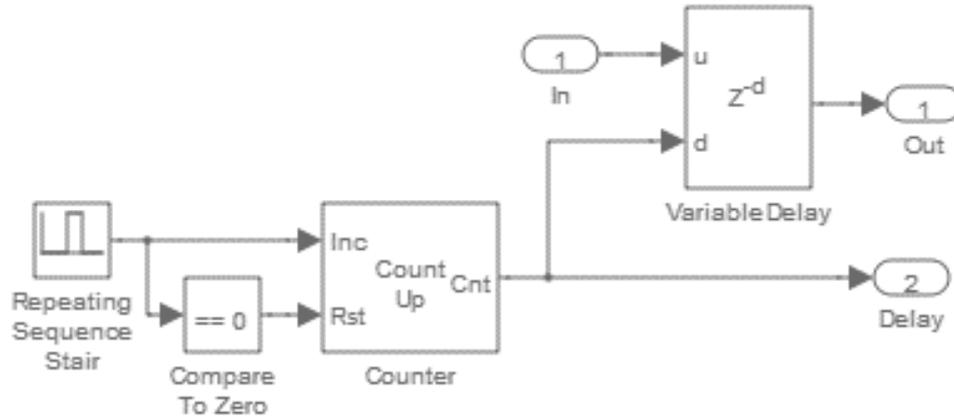


Figura 3.15. Bloque de simulación de retardo

3.5 Conclusiones

En este capítulo se han realizado las propuestas de los experimentos para la caracterización de los canales de comunicación más utilizados en las redes de distribución. También se ha propuesto el análisis de los canales a utilizar en aplicaciones de control en red.

Se ha propuesto un entorno de pruebas para la experimentación con lazos de control utilizando comunicaciones. Este entorno ha sido implementado y está operativo en el laboratorio del Grupo GEISER de la Universidad de Alcalá. Con este entorno se han realizado las pruebas en el convertidor descritas en esta Tesis. Este entorno ha sido el objeto de las publicaciones [Rodríguez, F. J., et al. 2009] y [Bueno, E. J., et al. 2009].

Utilizando los modelos que simulan el comportamiento de este sistema, se ha propuesto también una serie de simulaciones que incluyen un sistema de detección de pérdidas del canal de comunicaciones para el estudio previo de los efectos de las comunicaciones en un entorno real.

Capítulo 4.

Análisis de las comunicaciones

4.1 Introducción

Existen diferentes tipos de sistemas en los que es necesario el uso de comunicaciones para poder aplicar un lazo de control con éxito. Como ejemplo puede valer cualquier lazo de control, en el que elementos del sistema se encuentren distribuidos en una área geográfica extensa. Sistemas de control en red (*Networked Control Systems*, NCS) es la terminología con la que se denominan este tipo de controladores, que abarcan diferentes ámbitos tecnológicos, como los controles de aviones y fábricas automatizadas, entre otros

En el ámbito de las RRII, se pueden distinguir dos tipos de sistemas, en función de los elementos que se consideren como remotos. Si son remotos los sensores, y la recopilación de datos y el control se realizan desde un único punto, se habla de WAMS. La evolución acelerada de las comunicaciones en los últimos años ha favorecido el uso de equipos de medida remotos, introduciendo la variable de las comunicaciones en sistemas que antes no la tenían en cuenta.

En el campo de la electrónica de potencia y de las redes de distribución, este tipo de sistemas es de gran utilidad cuando, para poder realizar un control local, son necesarias medidas tomadas en un punto remoto en la red eléctrica. Es el caso de los STATCOM destinados a estabilizar la tensión en el punto de acoplamiento común de, por ejemplo, un parque eólico.

Si los elementos distribuidos son los encargados de realizar el control, se habla de WACS. De esta manera no solo se comparte información adquirida remotamente, sino que los lazos de control pueden actuar de forma descentralizada. Es el caso de los operadores de red, que no solo disponen de la información en los centros de transformación, sino que pueden modificar las consignas de los equipos de forma remota, e incluso implementar controladores distribuidos por áreas.

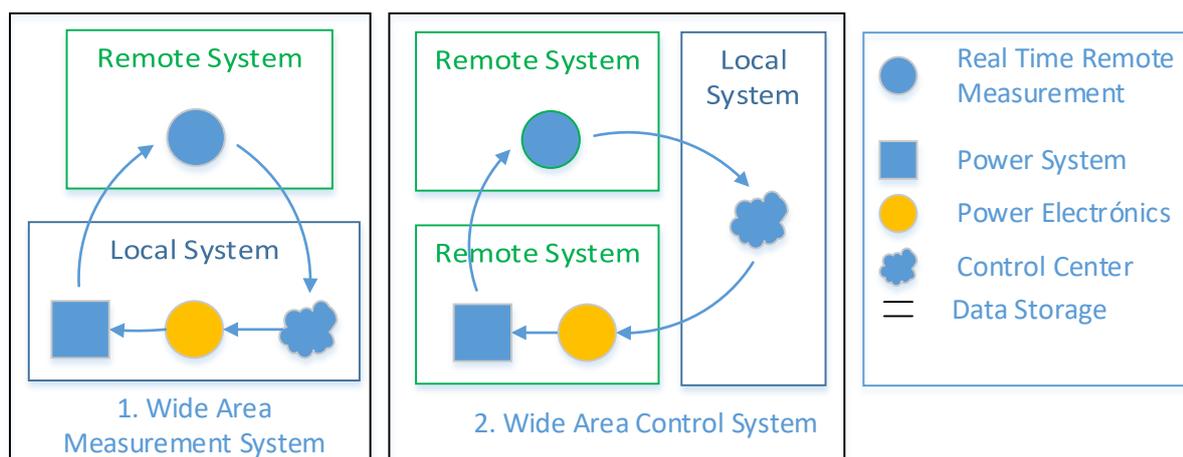


Figura 4.1. Diferencias entre WAMS y WACS

En este último caso, dado que, en muchas ocasiones, los operadores de red y las distribuidoras no disponen de los medios necesarios en propiedad para soportar las comunicaciones entre los distintos centros de transformación, utilizan redes públicas de telefonía móvil y líneas ADSL. Estos medios de comunicación, al ser de uso compartido, introducen incertidumbres en los tiempos de latencia y transmisión, y en la carga del canal en cada momento.

Desde el punto de vista de los sistemas de regulación, se puede modelar un sistema de comunicaciones como un retardo variable en el lazo de control. Y para definir cómo de variable es el comportamiento del canal es necesario conocer el comportamiento del propio canal.

En [Nguyen, C. P., Flueck, A. J. 2011] se analiza el impacto de las comunicaciones en entornos de *Redes Inteligentes* con operativa basada en multiagentes. La latencia se modela como una variable aleatoria con una función densidad de probabilidad medida.

En [Chaudhuri, N. R., et al. 2010] se utiliza información medida en la transmisión de cada paquete para determinar la latencia introducida en cada momento por la red de comunicación. Este enfoque es viable, dado que el esquema de control se basa en adelantar la información de la diferencia entre los fasores medidos en distintos puntos, por lo que la propia latencia se trata como una medida que aplica una corrección al lazo de control.

Finalmente, el ancho de banda disponible limita la cantidad de información que se puede transmitir a través de la red para cumplir con los objetivos de control.

En esta tesis se propone analizar el comportamiento de distintos canales de comunicación para buscar características que influyan en la latencia, con el objetivo de crear un modelo más preciso del comportamiento de distintos canales. Este análisis pretender ir más allá de una aproximación teórica a una función de distribución de probabilidad normal y constante a lo largo del tiempo. Para

ello se proponen diferentes funciones a partir del análisis de los datos adquiridos mediante experimentación, y estableciendo los parámetros de disponibilidad del canal.

Usando la información adquirida mediante los experimentos realizados, se han modelado los diferentes canales de comunicación bajo estudio. El uso de canales de comunicación en lazos de control introduce una incertidumbre debida a la naturaleza no determinística de algunos de los elementos de los canales de comunicación. Cada uno de estos modelos proporciona información sobre los retardos introducidos por las comunicaciones, la fiabilidad y la disponibilidad, entre otros. Con esta información se podrá analizar la estabilidad y ajustar adecuadamente el sistema de control en red.

Por tanto, es necesario establecer medidas que aporten información sobre la fiabilidad y disponibilidad del canal. Además del análisis de la información adquirida y del desarrollo del modelo estadístico de los canales, es necesario tener en cuenta, para cada canal, si existe algún método para restaurar la conexión en caso de pérdida y el tiempo necesario para ello. O si por el contrario, la detección de un fallo en el canal de comunicaciones ha de ser tomado como irreparable. Esta información condicionará el análisis de cada canal.

Como ya se ha comentado, el uso de sistemas de comunicación determinísticos en lazos de control implica la necesidad de incluir un retardo computacional en el propio lazo de control. Si además, el sistema de comunicación no es determinístico, la incertidumbre introducida hace que no sea posible garantizar a priori la estabilidad del lazo de control del sistema.

Por tanto, se hace necesario establecer protocolos de seguridad y estudiar el comportamiento del sistema ante diferentes pérdidas de control, ya que existe la posibilidad de que el sistema central y los equipos a controlar pierdan la comunicación durante periodos variables de tiempo o incluso de forma indefinida, sin existir para diagnosticarlo más indicios ni métodos que la propia falta de comunicación.

Existen diferentes técnicas que proporcionan herramientas para el análisis y diseño de sistemas de control incluyendo comunicaciones. En [Mazo, M., Tabuada, P. 2009] se introduce el uso de leyes de control para sensores y actuadores mediante la realimentación por eventos en lugar de realimentación periódica. Esto implica un periodo de muestreo variable. El objetivo principal se centra en mantener un reducido consumo energético en redes de sensores, al reducir el número de mensajes que se intercambian, comparado con las técnicas periódicas.

Con esta técnica se analiza si existe nueva información para lanzar un nuevo evento. Al producirse este evento se ha de recalcular la salida con la nueva información. También se calcula el máximo tiempo que se puede estar sin recibir una muestra para evitar que llegue a ser inestable.

En el trabajo mostrado en [Stahlhut, J. W., et al. 2008] se realiza un análisis de la latencia como proceso estocástico, definiendo los distintos factores que la afectan. La descomposición de los factores que afectan a la latencia en la comunicación da lugar a dos tipos de retardos. Por un lado se analiza el retardo determinístico que introduce la capa física debido a la naturaleza del medio físico con transmisión serie. Por otro lado, se estudian los retardos computacionales y de enrutamiento definidos como procesos estocásticos basados en la teoría de colas. Este artículo, finalmente, analiza el impacto de la latencia en la red WECC (Western Electricity Coordinating Council).

La propuesta presentada en esta tesis, sigue un enfoque similar. La principal diferencia con este trabajo estriba en el hecho de que en él se utiliza una red de datos dedicada, por lo que los retardos de enrutamiento y de procesamiento tienen un valor medio y una desviación muy inferior a los que resultan en redes de datos públicas. Y, por otro lado, se suponen constantes a lo largo del tiempo los parámetros de la distribución estadística usada.

La propuesta de esta tesis introduce la variación de los parámetros estadísticos de la distribución a lo largo del tiempo. También se realiza un análisis de la distribución obtenida empíricamente para diferentes canales. Como resultado, se obtienen las cotas máximas en el retardo y la fiabilidad que ofrece cada tipo de canal.

4.2 Modelado de los parámetros del canal de comunicaciones

4.2.1 Definición de parámetros

Los canales de comunicación tienen una serie de características intrínsecas a su arquitectura que influyen de distintas formas en los sistemas de control y las aplicaciones en redes inteligentes.

Principalmente se debe tener en cuenta el retardo introducido. A la hora de utilizar un canal de comunicación en un sistema para realizar labores de regulación, el tiempo que tardará la información en propagarse desde el sistema de procesamiento hasta el sistema a controlar influirá en la estabilidad, pudiendo hacer que llegue a ser inestable en caso de ser demasiado elevada. Asimismo, en aplicaciones para redes inteligentes, este retardo puede suponer un incremento en el tiempo que se demora la autocatización de la red, problemas en la negociación de precios automática, fallos en la red cuando se aplica gestión de la demanda por desconexiones retardadas, etc.

Dado que la latencia en un canal no es constante a lo largo del tiempo, se puede analizar la variación que sufre la latencia asociada al canal en función de distintas variables ambientales, como puede ser el perfil de uso de las redes móviles en una determinada zona geográfica. Para cuantificar este

efecto, se pueden analizar la desviación típica y la disponibilidad del canal, extrayendo esta última de los valores medidos de la latencia.

El ancho de banda del canal también será decisivo a la hora de plantear el uso de comunicaciones en el ámbito de los NCS. Es necesario poder enviar toda la información necesaria para realizar el control dentro de los plazos de tiempo que limitan la estabilidad del sistema. En el caso de las redes inteligentes, un ancho de banda reducido puede causar que el tiempo necesario para transferir la información sea excesivo y el retraso sea inaceptable, como puede llegar a suceder al utilizar conexiones PLC de baja tensión para realizar la lectura de contadores con periodos cuarto-horarios.

[Mazo, M., Tabuada, P. 2009] presenta una técnica para modificar el periodo de control, adaptándose a los tiempos proporcionados por los canales de comunicaciones y garantizando la estabilidad del sistema acotando los tiempos mediante funciones de Liapunov. Estas técnicas se utilizan en sistemas en los que se requiere reducir al mínimo el consumo de energía, pero garantizando la estabilidad del sistema. Se trata de calcular el periodo en función de la velocidad a la que cambian las perturbaciones

El principal inconveniente que presenta esta técnica para el caso de aplicación de esta tesis, reside en la naturaleza del problema, ya que es imposible predecir la probabilidad de perturbaciones de la red eléctrica ni acotar la magnitud de estas.

Pero sí que será utilizado para acotar el periodo máximo que garantice la estabilidad del sistema.

Los parámetros a considerar para el modelado de los canales de comunicación bajo estudio serán:

- Latencia
- Variación de la latencia a lo largo del tiempo
- Ancho de banda
- Disponibilidad del canal

4.2.2 Cálculo de la latencia

En las redes de comunicación existen una serie de efectos que producen retardos temporales en la propagación y transmisión de los paquetes de información. La suma de todos estos retardos temporales se denomina latencia.

La latencia en una red de comunicaciones se puede calcular como la suma de distintas componentes. Se han de tener en cuenta los tiempos de:

- Enrutamiento: Tiempo que tarda un *router* en procesar un paquete.
- *Switching*: es el tiempo que tarda un *switch* en procesar cada paquete
- Propagación: es el tiempo requerido para transmitir la señal a través del medio físico.

Los tiempos de *switching* y enrutamiento se pueden descomponer a su vez en distintas componentes:

- Serialización: es el tiempo que se tarda en poner un bit tras otro en el medio.
- Procesamiento: aportación de la electrónica del dispositivo a la latencia.
- Tiempo de encolado: tiempo de espera del paquete para ser procesado. Este tiempo dependerá de la carga de la red en cada momento.

Hay que tener en cuenta que en muchos casos un *router* tiene asociado uno o varios *switches* para concentrar los distintos dispositivos. Por otro lado, las magnitudes de cada uno de los tiempos hacen que ciertas componentes sean despreciables. Este es el caso de una red móvil, en el que los tiempos de propagación son dos o incluso tres órdenes de magnitud superiores.

Dada la complejidad de las redes de comunicación, se hace imposible conocer totalmente la composición extremo a extremo de las redes analizadas. Por ello se va a analizar la latencia de la red Ethernet desde el punto teórico de forma exhaustiva, mientras que para el resto de los canales se hará mediante una aproximación empírica a la latencia de los elementos que más aportan en conjunto al total. .

Existen otras componentes que habría que añadir a las anteriores, como por ejemplo el tiempo de espera entre paquetes (del orden de μ s). Estos tiempos son constantes e irrelevantes en el cómputo general, dada la diferencia de órdenes de magnitud con el resto de los tiempos medidos.

4.2.2.1 Tiempo de propagación

El tiempo de propagación de una señal se define como la relación entre la longitud del medio y la velocidad de propagación en el mismo.

$$T_p = \frac{l}{v} \quad (4.1)$$

Siendo l la longitud del medio de comunicación y v la velocidad de propagación en el medio.

La velocidad de propagación se define como la velocidad a la que una onda se desplaza por el medio. Para cada medio se define una constante, expresada como porcentaje de la velocidad de la luz, que depende de la permeabilidad dieléctrica del material, tal y como se extrae de las leyes de Maxwell. De este modo, el tiempo de propagación se expresa como:

$$T_p = \frac{l}{kc} \quad (4.2)$$

Siendo l la longitud del medio de comunicación, c la velocidad de la luz y k la constante relativa al medio.

En comunicaciones móviles, además, las ondas pueden recorrer más de un camino. En este caso existen otros fenómenos que pueden hacer que este tiempo aumente, tal y como se muestra en [Aoyama, T., et al. 2005]. Las diferentes rutas que pueden seguir las ondas, la posibilidad de atravesar diversos medios y las interferencias con otros emisores son algunos de los eventos que pueden aumentar la latencia con respecto a un medio guiado.

4.2.2.2 Tiempo de serialización

Para enviar la información a través de un canal es necesario poner un bit detrás de otro debido a que los canales utilizados solo pueden enviar un bit de forma simultánea. De este modo, hay que tener en cuenta el ancho de banda máximo disponible, ya que afectará al ancho de cada pulso, o lo que es lo mismo, de cada bit.

Este tiempo es importante ya que se ha de tener en cuenta para cada procesado intermedio que requiera la información en su ruta hasta el destino. Cada vez que la información pase por un sistema de procesamiento, ya sea un *switch*, *router*, o cualquier otro sistema que deba analizar la totalidad o parte del contenido, se deberá tener en cuenta este tiempo.

Este tiempo también es conocido como tiempo de almacenamiento y envío en los equipos de gestión de redes de datos. Se refiere al principio básico de los *switches* Ethernet, en los que es necesario almacenar toda la trama recibida, y por lo tanto esperar a que llegue entera antes de procesarla, y enviar después el paquete por el puerto adecuado.

Esta latencia es proporcional al tamaño del paquete e inversamente proporcional a la velocidad de transmisión.

$$T_s = \frac{P_s}{D_r} \quad (4.3)$$

Siendo T_s el tamaño del paquete en bits y D_r la velocidad de transmisión en bits por segundo.

4.2.2.3 Tiempo de encolado

Los dispositivos de interconexión de redes se enfrentan a menudo a los problemas asociados a su uso por parte de varios dispositivos de forma simultánea. Para que un equipo pueda atender varias solicitudes simultáneas se utilizan colas de datos. Estas colas de datos permiten almacenar las solicitudes recibidas mientras el sistema de procesamiento está ocupado con otra solicitud, para su posterior procesamiento. De este modo, se garantiza total o parcialmente la capacidad de atender las solicitudes.

Esta técnica conlleva un tiempo de procesamiento, dependiente de la carga de la red, que se define como tiempo de encolado.

Dado que el número de elementos en la cola es un valor aleatorio, es necesario estimar la esperanza del número de elementos en cola para poder dar una aproximación del retardo introducido. Existen multitud de trabajos que analizan y proponen diferentes métodos de aproximación a los retardos producidos por este efecto [Feng-Li Lian, et al. 2001], [K. Hopkinson, et al. 2006], [Z. Papir. 2006]. El método de análisis basado en la teoría de colas utilizando cadenas de Markov ofrece una forma rápida de aproximar los retardos sufridos en un dispositivo de red.

Esta teoría analiza el comportamiento de las colas en función del tipo de distribución estadística que siguen la llegada y la salida de paquetes, y el número de elementos procesadores en el sistema.

Para el caso de redes de datos, las tasas de entrada y salida siguen una distribución de Poisson, representado en notación de Kendall como M/M/1 (tasa de entrada Poissoniana, Tasa de salida Poissoniana, 1 servidor). Se define como $\frac{1}{\lambda}$ al tiempo medio entre llegadas y $\frac{1}{\mu}$ al tiempo medio de servicio, por lo que λ y μ serán las tasas de llegada y salida respectivamente.

El tiempo medio de servicio está formado por el tiempo de procesamiento del paquete y el tiempo de serialización del dispositivo:

$$\frac{1}{\mu} = T_s + T_{pr} \quad (4.4)$$

Siendo T_s el tiempo de serialización y T_{pr} el tiempo de procesamiento interno.

Aunque el tiempo que tarda un dispositivo en procesar un paquete dentro de la cola no es proporcional al tamaño del paquete, el tiempo de serialización de los paquetes sí lo es, lo que hace que, dado que la longitud de los paquetes no es constante, la tasa de salida se considere una variable aleatoria que sigue una distribución de Poisson con media μ .

El tiempo medio entre llegadas no se puede determinar con exactitud sin un conocimiento exhaustivo de la red a tratar. Dependerá del estado de la red. Como aproximación, se tiene en cuenta la carga de la red máxima permisible para acotar este valor. Lo que sí se puede establecer es que, dada la naturaleza del tráfico de red, el origen de los paquetes y su generación corresponden con una variable aleatoria con distribución de Poisson.

El hecho de que las distribuciones de entrada y salida sean poissonianas implica que el sistema tiene las propiedades de falta de memoria y estacionalidad. El sistema se comporta, a lo largo del tiempo, de forma estable y es independiente de las condiciones iniciales.

El tiempo que el sistema estará ocupado viene definido por:

$$\rho = \frac{\lambda}{\mu} \quad (4.5)$$

ρ representa la carga del sistema, y teniendo en cuenta que las redes deben trabajar de forma equilibrada, este valor se puede extender a la carga de la red.

Estas colas siguen una disciplina de servicio FCFS (*First Come First Served*), de modo que para que el sistema no se colapse se ha de cumplir que el tiempo que el sistema está procesando paquetes (ρ) sea inferior al 100%. Por lo tanto:

$$\rho = \frac{\lambda}{\mu} < 1 \tag{4.6}$$

El diagrama de flujo de este modelo representa la cantidad de elementos en la cola, y la tasa de las transiciones entre ellos.



Figura 4.2 Diagrama de flujo para el modelo M/M/1

De este diagrama de flujo se puede extraer que la probabilidad de estar en un estado n será:

$$0 = \lambda p_{n-1} - (\lambda + \mu)p_n + \mu p_{n+1}, n = 1, 2, \dots \tag{4.7}$$

Y para el estado 0 se cumple que:

$$0 = -\lambda p_0 + \mu p_1 \tag{4.8}$$

Estas ecuaciones se extraen del diagrama de flujo en situación de equilibrio, igualando las probabilidades de salir del estado con las probabilidades de entrar en el estado.

Es evidente que las probabilidades p_n cumplen:

$$\sum_{n=0}^{\infty} p_n = 1 \tag{4.9}$$

A partir de la ecuación (4.5) se deduce que ρ es la probabilidad de estar en cualquier estado con tramas pendientes, es decir, el complementario de p_0 . Por lo tanto, según las ecuaciones (4.5), (4.7), (4.8) y (4.9) se deduce que:

$$p_n = (1 - \rho)\rho^n \tag{4.10}$$

Utilizando este tipo de sistemas se pueden extraer, en función de sus parámetros, diferentes medidas, como puede ser el número medio de paquetes en la cola o el tiempo de espera en cola.

A partir de la ecuación (4.10) para calcular las probabilidades de cada estado en situación de equilibrio, se obtiene que la esperanza de elementos en la cola está definida por:

$$E[L] = \sum_{n=0}^{\infty} np_n \quad (4.11)$$

El resultado de la suma de esta progresión geométrica resulta ser:

$$E[L] = \frac{\rho}{1-\rho} \quad (4.12)$$

Y a partir de esta y relacionando la longitud de la cola, la tasa de llegadas y el tiempo en servicio mediante la aplicación de la ley de Little [Little, J. D. C. 1961]:

$$E[L] = \lambda E[S] \quad (4.13)$$

la esperanza del tiempo utilizado del sistema es:

$$E[S] = \frac{\frac{1}{\mu}}{1-\rho} \quad (4.14)$$

La latencia que aportará al sistema este elemento es el indicado en esta ecuación, que incluye la espera en la cola más el procesamiento del paquete y se basa en la tasa de salida del dispositivo μ y de la carga de la red ρ .

Se puede observar que a medida que el valor de ρ se aproxima a 1, tanto la esperanza de la cola como del tiempo de servicio tienden a infinito. Esto explica el bloqueo que sufren las redes al aumentar el número de elementos en el sistema.

A partir de la ecuación (4.14), se obtiene el tiempo medio de espera, restando el tiempo medio de salida a la esperanza de tiempo en servicio del sistema:

$$E[W] = E[S] - \frac{1}{\mu} = \frac{\lambda}{\mu(\mu - \lambda)} = \frac{\rho}{\mu(1 - \rho)} \quad (4.15)$$

4.2.2.4 Tiempo de *switching* y *routing*

Los dispositivos de interconexión de redes se enfrentan a menudo a los problemas asociados a su uso por parte de varios dispositivos de forma simultánea. Para que un equipo pueda atender varias solicitudes simultáneas se utilizan colas de datos. Estas colas de datos permiten almacenar las solicitudes recibidas mientras el sistema de procesamiento está ocupado con otra solicitud, para su posterior procesamiento.

El tiempo que añade este fenómeno a la latencia total será la suma de los tiempos que añade cada uno de los dispositivos intermedios.

$$T_d = \sum_{i=1}^N T_d(i) \quad (4.16)$$

Donde T_d es el retardo total, N el número de dispositivos en la ruta del paquete, y $T_d(i)$ el retardo del dispositivo i .

El retardo que introduce cada dispositivo será dependiente del número de elementos que haya en la cola a la llegada de un paquete y del tiempo que tarde el dispositivo en procesar cada elemento de la cola, que incluye el procesamiento del dispositivo y la serialización para poner el paquete en el medio, tal y como se muestra en la ecuación (4.4).

Siguiendo la ecuación (4.14) se obtiene que la esperanza del tiempo empleado en atravesar cada *switch* es:

$$E[T_d(i)] = \frac{E[T_s] + T_{pr}}{1 - \rho} \quad (4.17)$$

La diferencia entre *switches* y *routers* estriba en el tiempo de procesamiento interno, ya que un *router* tiene que hacer más tareas que un *switch* a la hora de procesar un paquete. De las ecuaciones (4.3), (4.16) y (4.17), y suponiendo que la carga en la red es uniforme:

$$T_d = \frac{1}{(1 - \rho)} \left(N \left(\frac{E[P_s]}{D_r} \right) + N_{sw} T_{prsw} + N_r T_{prr} \right) \quad (4.18)$$

$$N = N_s + N_r \quad (4.19)$$

Siendo N_{sw} y N_r el número de *switches* y *routers* respectivamente, y T_{prsw} y T_{prr} el tiempo de procesamiento en cada *switch* y *router* respectivamente.

En las redes de ordenadores y dispositivos se utiliza el algoritmo de Nagle [Nagle, J. 1984] para incrementar el ancho de banda utilizado a costa de un incremento en la esperanza de la latencia. Este algoritmo agrupa paquetes de modo que la carga útil de cada paquete esté utilizada al máximo. Esto hace que la esperanza del tamaño de paquete, $E[P_s]$, sea próximo a 1500, que es el tamaño de paquete máximo para una trama estándar TCP.

Teniendo esto en cuenta, el tiempo de serialización para los paquetes que están en la cola procedentes de elementos ajenos al sistema y el tiempo de serialización para los paquetes generados por el sistema serán distintos ya que sus tamaños serán distintos. En el caso de los paquetes del sistema se ha de estimar la esperanza del tamaño del paquete, mientras que en el sistema el tamaño de paquete es constante.

De este modo, la ecuación (4.17) se puede plantear atendiendo a la esperanza del tiempo de espera en la cola (4.15) y al tiempo de procesamiento, diferenciando los tiempos de procesamiento en cada caso:

$$E[T_d(i)] = E[W] + \frac{1}{\mu_s} = \frac{\rho}{\mu_n(1-\rho)} + \frac{1}{\mu_s} = \frac{\rho \left(\frac{E[P_{sn}]}{D_r} + T_{pr} \right)}{(1-\rho)} + \frac{P_{ss}}{D_r} + T_{pr} \quad (4.20)$$

Siendo μ_s y μ_n la tasa de salida para paquetes del sistema y de la red respectivamente, y P_{ss} y P_{sn} los tamaños de paquete del sistema y de la red respectivamente. Por lo que el tiempo en dispositivos se representa como:

$$E[T_d] = \frac{N}{D_r} \left(\frac{E[\rho]}{(1-E[\rho])} E[P_{sn}] + P_{ss} \right) + \frac{1}{(1-E[\rho])} (N_{sw}T_{prsw} + N_rT_{prrr}) \quad (4.21)$$

4.2.2.5 Latencia total

A partir de los tiempos descritos, es posible hacer una estimación del tiempo medio que tardarán los paquetes en llegar de un equipo remoto al sistema de control y viceversa.

Cuando la red es totalmente conocida puede efectuarse este cálculo de forma exacta. Pero en la práctica habitual esto no es posible, ya que el tamaño de los paquetes y el comportamiento de los sistemas son variables aleatorias.

El total de tiempo utilizado por un paquete será la suma de los tiempos empleados en la propagación de la señal, los tiempos empleados en los dispositivos de red y el tiempo de serialización empleado en el emisor del paquete.

$$T = T_p + T_s + T_d \quad (4.22)$$

El tiempo de propagación es el mostrado en la ecuación (4.1), el tiempo de serialización en la ecuación (4.3) y el tiempo total en los dispositivos se muestra en la ecuación (4.21).

La incertidumbre de algunos de los parámetros hace que estos valores varíen a lo largo del tiempo. Estas variaciones se pueden modelar estocásticamente.

Las principales fuentes de incertidumbre son la longitud de los paquetes, que afecta a los tiempos de serialización, y la carga de la red, que incrementa la ocupación de las colas en los dispositivos de red.

De este modo, si cada una de estas variables se considera como una variable aleatoria, el tiempo total también lo será. De este modo, la esperanza de la latencia total se expresa como:

$$T = \frac{l}{kc} + \frac{P_{ss}}{D_r} + \frac{N}{D_r} \left(\frac{E[\rho]}{(1-E[\rho])} E[P_{sn}] + P_{ss} \right) + \frac{1}{(1-E[\rho])} (N_{sw}T_{prsw} + N_rT_{prrr}) \quad (4.23)$$

En el caso de redes inalámbricas, la latencia varía en función de la distancia, interferencias, etc., incrementando el tiempo de propagación y el tiempo de procesamiento. Estas diferencias se han de tener en cuenta a la hora de utilizar estos medios de comunicación en diferentes situaciones.

4.2.3 Fiabilidad

En [Kales, P. 1998] se define la fiabilidad de un elemento general como: “la probabilidad de que realice una función específica, bajo unas condiciones operacionales y ambientales específicas, en y durante un tiempo específico.” Queda claro que hablar de fiabilidad en todo caso es hablar de probabilidad.

Desde el punto de vista de la fiabilidad, es importante conocer la tasa de fallos, el tiempo medio entre fallos (MTBF, *Mean Time Between Failures*), el tiempo medio de recuperación (MDT, *Mean Down Time*) y la posibilidad de restauración de la comunicación.

Aplicado al caso de un canal de comunicación, si tomamos como constante a lo largo del tiempo la tasa de fallos λ , $\lambda(t)=\lambda$, siendo λ la relación entre las muestras consideradas fallo y el total de muestras observadas, la fiabilidad del sistema es:

$$R(t) = e^{-\lambda t} \quad (4.24)$$

siendo t el tiempo estimado de funcionamiento.

Dado que el tiempo medio hasta un fallo (MTTF, *Mean Time To Failure*) se define como

$$MTTF = - \int_{t=0}^{\infty} t dR(t) \quad (4.25)$$

y que $R(t)$ tiende a 0 cuanto t tiende a infinito, tenemos

$$MTTF = \int_{t=0}^{\infty} R(t) dt \quad (4.26)$$

Sustituyendo (4.24) en (4.25) tenemos

$$MTTF = \int_{t=0}^{\infty} e^{-\lambda t} dt \quad (4.27)$$

$$MTTF = \frac{1}{\lambda} \quad (4.28)$$

Los problemas en la red de comunicaciones pueden ser de distinta naturaleza, lo que genera, en una primera aproximación, dos grupos de fallos. Por un lado, puede producirse un corte en el canal de comunicaciones físico, lo que implica que sea necesaria una intervención humana. El tiempo medio entre fallos para este tipo de cortes es elevado, del orden de meses o incluso años, y del orden de horas el tiempo medio de caída. Este tipo de fallos causan una caída total del sistema, imposible de recuperar y que no se puede prever ni solucionar de forma autónoma. De otro lado, se pueden

considerar las saturaciones en la red, retardos excesivos, etc., este tipo de problemas son los que se estudiarán en esta tesis. Este grupo se caracteriza por tener una tasa de recuperación elevada (los fallos no son definitivos) lo que afectará al funcionamiento autónomo del sistema.

Por lo tanto, podemos tomar como $t = 0$ el instante, tras un fallo, en el que se reanuda la comunicación. Esto implica que el MTBF será igual al MTTF, dado que λ es constante a lo largo del tiempo.

Para calcular la disponibilidad se tendrá en cuenta la media de tiempo que el sistema está sin funcionar en cada fallo. De esta forma se define la disponibilidad (A , *Availability*) como:

$$A = \frac{MTBF}{MTBF + MDT} \tag{4.29}$$

4.3 Canales analizados

4.3.1 Metodología empleada

Para el caso de redes de comunicación con arquitectura parcialmente o totalmente desconocida, es inviable obtener un resultado analítico de los parámetros que las definen. Por ello y con el objetivo de obtener una estimación de los parámetros anteriormente descritos, se han realizado una serie de medidas sobre diferentes canales de comunicaciones utilizando distintas técnicas, que a continuación se detallan.

Por un lado, se han realizado medidas del tiempo de respuesta utilizando el protocolo ICMP. Este método mide el tiempo que tarda un paquete en realizar los trayectos entre las capas de dos nodos de red. Cuando la conexión es directa se mide únicamente el tiempo tomado por el paquete en el medio.

Por otro, se ha medido la influencia de la latencia utilizando paquetes de datos y medidas utilizando la aplicación de control remoto de convertidores descrita en el apartado 3.3.3. Este método utiliza un sistema de comunicación completo, atravesando varias capas de la torre de protocolos, y por lo tanto, incrementando la latencia medida.

En la Figura 4.3 se muestra un esquema de las capas de la torre OSI implicadas en cada método.

	Medida del tiempo de respuesta	Medida desde la aplicación de control
TRANSPORTE		TCP
RED	ICMP	IP
	IP	
ENLACE	Ethernet	Ethernet

Figura 4.3. Capas de red utilizadas en cada método.

Hay que tener en cuenta que cuando existe una infraestructura de red, intervienen otros elementos en la medida. Un ejemplo de ello son los equipos de enrutamiento de red. Los *routers* pueden organizar el tráfico por diferentes rutas, atendiendo los paquetes con distintos algoritmos y enviándolos hacia su destino en base a diferentes criterios. Para poder atender las solicitudes en caso de llegadas simultáneas, se utilizan colas de datos que atienden a un modelo estocástico del tipo M/M/C. Esta parte añade cierta incertidumbre a la medida que depende de la carga de la red en cada instante.

Las medidas realizadas mediante ICMP permiten caracterizar parámetros de la red, sobre los cuales trabaja la aplicación. Las medidas realizadas directamente en el entorno de la aplicación incluyen los tiempos de procesamiento y atención, que dependen de la red y de la propia estructura de datos.

Para poder obtener y analizar los datos de los canales, se propone hacer una serie de medidas que aporten información sobre latencia y paquetes perdidos de forma periódica durante un tiempo determinado. Cuanto mayor sea el tiempo durante el que se tomen muestras, mayor información se obtendrá sobre el modelo del canal.

Estas medidas se han de tomar en los puntos de acceso a cada medio, evitando dispositivos adicionales que puedan inferir en las medidas.

Al tomar las medidas es necesario ajustar un tiempo máximo del paquete. Todo paquete de datos que tarde más de ese tiempo, se dará por perdido. Este tiempo depende de la aplicación. No tiene la misma restricción un lazo de control que un sistema de monitorización y autoreparación de la red eléctrica, ya que para el primero perder la comunicación durante más de un periodo de muestreo del lazo de control puede significar hacer el sistema inestable, siendo este tiempo del orden de los cientos de milisegundos, mientras que en el caso de la autoreparación de la red de media tensión, es mejor un paquete que llega tarde dentro del orden de segundos que uno que no llega.

De forma genérica este tiempo de pérdida se puede ajustar en base a los tiempos de latencia media de cada canal, dándolo por perdido si tarda un tiempo superior a 10 veces el tiempo medio de latencia. Si la aplicación para la que se va a usar está claramente definida, se deben utilizar los tiempos que esta marque.

Se deben recoger muestras de cada canal durante tiempos prolongados. Una toma de un día de datos no va a aportar la misma información que una toma recogida durante un mes. De la misma manera, que no será igual tomar una muestra de una red móvil en una capital durante un mes en el que la mayoría de los días sean laborables, en el que las redes están a pleno rendimiento, que en época vacacional, en la que su tráfico disminuye notablemente. Esta decisión se debe tomar para el peor de los casos para asegurar que los parámetros serán mejores que los aportados.

Para extraer los parámetros del canal en base a la información recogida, se debe contabilizar la latencia de cada paquete junto a su marca de tiempo y el número de paquetes perdidos. A continuación, contar los paquetes con un retardo superior al establecido como límite y agruparlos junto con los paquetes perdidos.

A la hora de realizar el análisis, se propone hacer una representación gráfica de la latencia por franjas de tiempo en tres dimensiones, de modo que se pueda ver la evolución de la distribución de los tiempos en los paquetes.

De esta forma se podrán observar influencias puntuales y perturbaciones sobre la red de comunicaciones. Se esperan observar

4.3.2 Medidas

A continuación se muestra una representación gráfica de las pruebas realizadas para obtener los valores medios de latencia y las desviaciones típicas de cada tipo de canal.

Estas medidas tienen una fuerte dependencia con variables sociales y técnicas.

Desde el punto de vista social, la medida se ve afectada por los comportamientos habituales de uso de las redes de datos, como por ejemplo, consultas de correo y lectura de noticias en las primeras horas de la mañana, o infrautilización de los recursos desplegados por la noche.

Desde el punto de vista técnico, una caída en un sistema relacionado puede causar una variación en la respuesta del sistema no solo durante su caída, sino durante un periodo de tiempo mayor, dada la acumulación de peticiones al servicio.

Aunque se pueden obtener resultados diferentes en el mismo canal, estos resultados dependerán de los dos tipos de variables comentados, sociales y técnicas.

Los periodos capturados se han elegido para obtener curvas en los momentos con mayor probabilidad de encontrar el peor caso, excluyendo fines de semana y periodos vacacionales.

La información obtenida para los canales 3G, GPRS y ADSL contiene los datos obtenidos durante 48 horas consecutivas, con muestras tomadas cada 5 segundos. Se representa en 48 bloques de 1 hora. En el caso de la red Ethernet, las muestras se han tomado cada 100 ms y se representan en bloques de 1 hora. Se representan 96 bloques de 1 hora.

En los siguientes apartados se muestran cuatro gráficas por cada tipo de tecnología.

- La primera muestra la evolución temporal de la distribución densidad de probabilidad de la latencia. Esta gráfica aporta información en cuanto a la sensibilidad de un canal a

sucesos externos a la propia comunicación. Se puede ver cómo la variación es mayor en los canales móviles que en las comunicaciones guiadas.

- La segunda gráfica representa para cada bloque la distribución de muestras por tiempo. Las pérdidas de cada canal se pueden observar en la parte superior de cada columna, ya que cada bloque de datos debe contener el mismo número de muestras.
- La tercera gráfica muestra el número de tramas perdidas a lo largo del tiempo, considerando como pérdidas las tramas que no han llegado y las que han tardado demasiado.
- La cuarta es una representación gráfica de la función distribución de probabilidad acumulada, que aporta información sobre la estabilidad de la latencia del canal en el periodo muestreado.

Los resultados obtenidos se pueden generalizar en base al tipo de tecnología, y el análisis de nuevos canales con la misma metodología proporcionará resultados similares con las mismas dependencias.

4.3.2.1 GPRS

Los canales móviles, dada la naturaleza de la comunicación, contienen una serie de parámetros asociados al medio físico que introducen retardos e interferencias por el rebote, absorción, reflexión y otros efectos que se producen en la propagación de las ondas electromagnéticas.

Además, al existir múltiples caminos naturales por no ser un medio guiado, se refleja en los histogramas esta naturaleza multimodal, con varios máximos representados.

Se puede observar la dispersión de las muestras, y la reducida variación temporal de los datos obtenidos en la Figura 4.4, así como las muestras que han excedido el tiempo máximo representado sobre todo al inicio de la prueba.

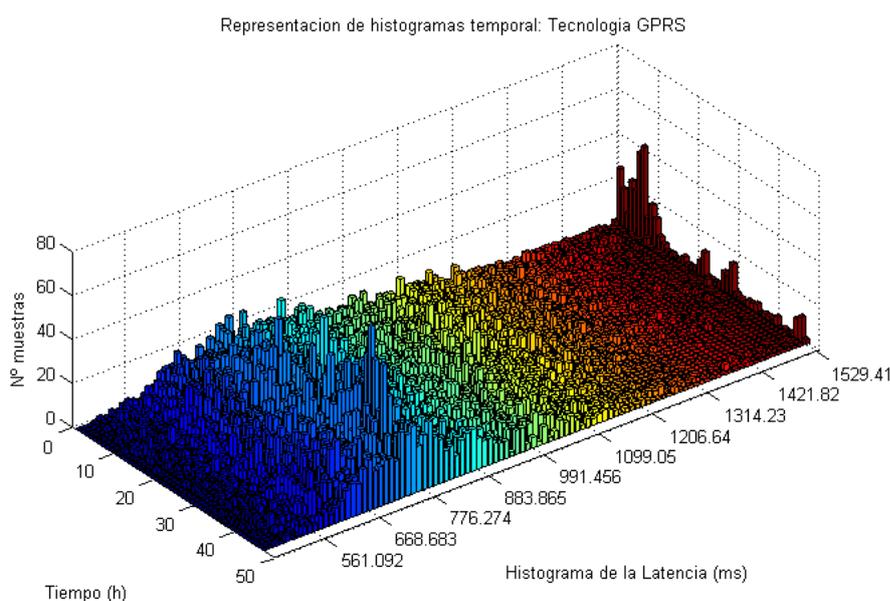


Figura 4.4. Representación del histograma a lo largo del tiempo de la latencia del canal GPRS analizado

En la Figura 4.5 y Figura 4.6 se puede observar que las pérdidas a lo largo del tiempo no siguen ningún patrón relacionado con la medida, aunque la cantidad de muestras perdidas es apreciable, ya que la cantidad es superior a 100 muestras sobre las 34850 tomadas.

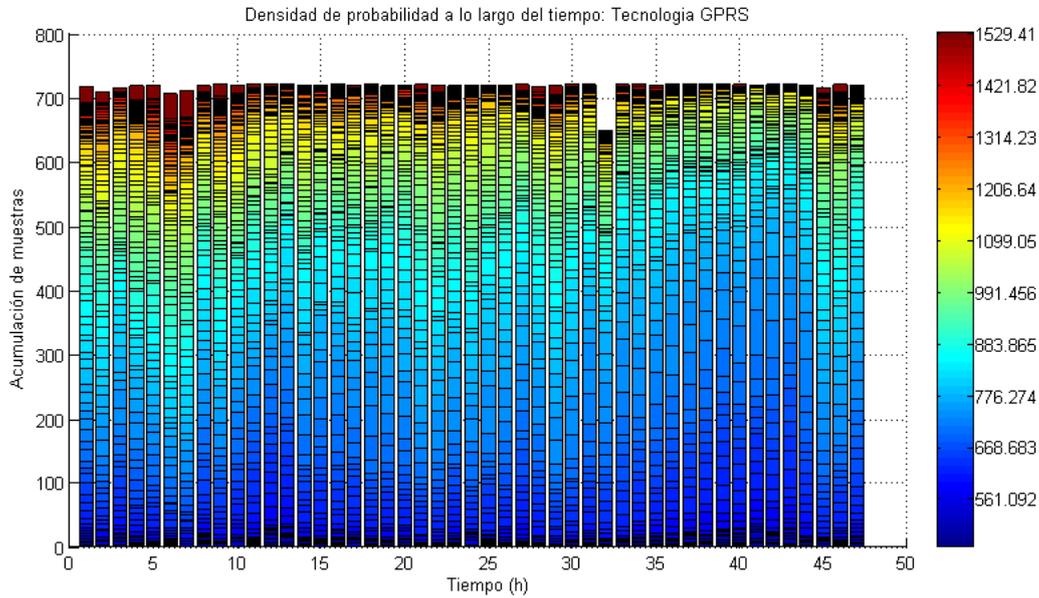


Figura 4.5. Densidad de probabilidad a lo largo del tiempo del canal GPRS Analizado

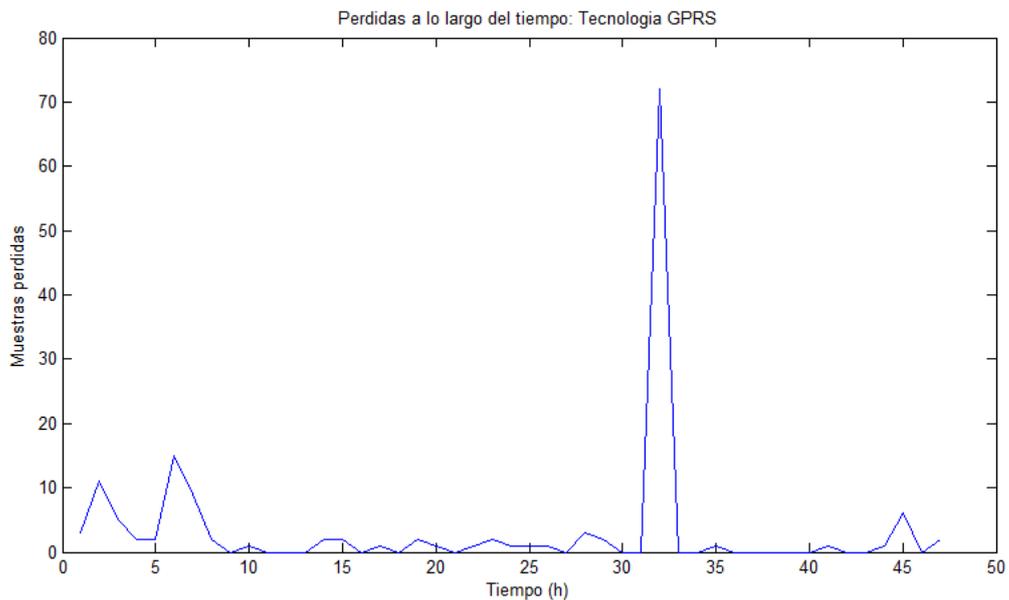


Figura 4.6. Pérdidas del canal GPRS analizado

En la Figura 4.7 se puede observar que debido a ser un sistema multimodal existen entre 4 y 5 cambios de pendiente, que se corresponden con las rutas más utilizadas del sistema.

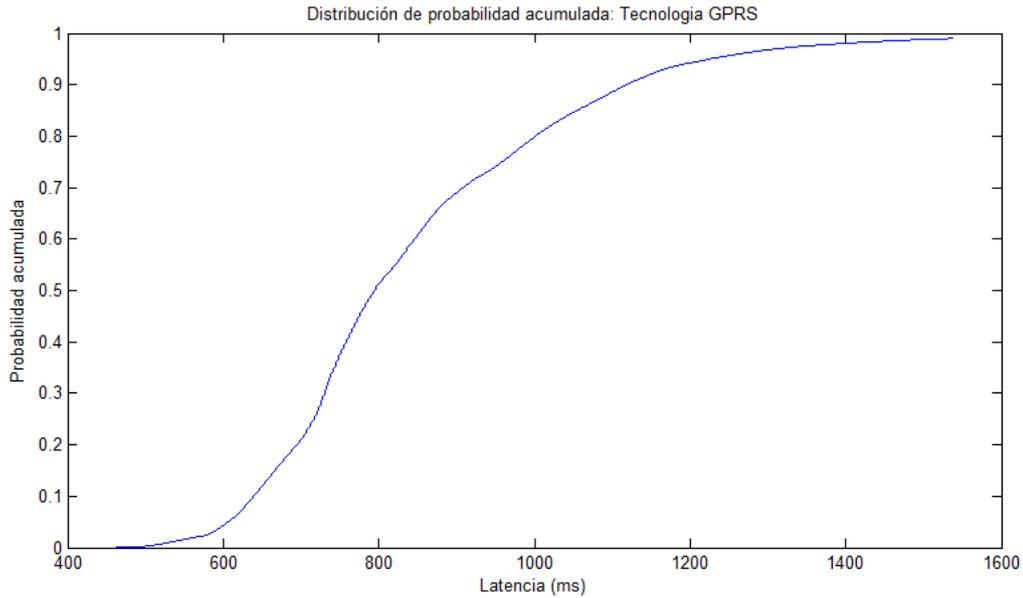


Figura 4.7. Distribución de probabilidad acumulada del canal GPRS analizado

En la Figura 4.8 se puede ver una ampliación de la Figura 4.7 alrededor del valor medio. Este rizado con diferentes acumulaciones de muestras a lo largo de la distribución se debe a los múltiples caminos lógicos que puede recorrer cada paquete debido a la complejidad de la red cableada. Este fenómeno se observará en todos los canales analizados, en mayor o menor medida.

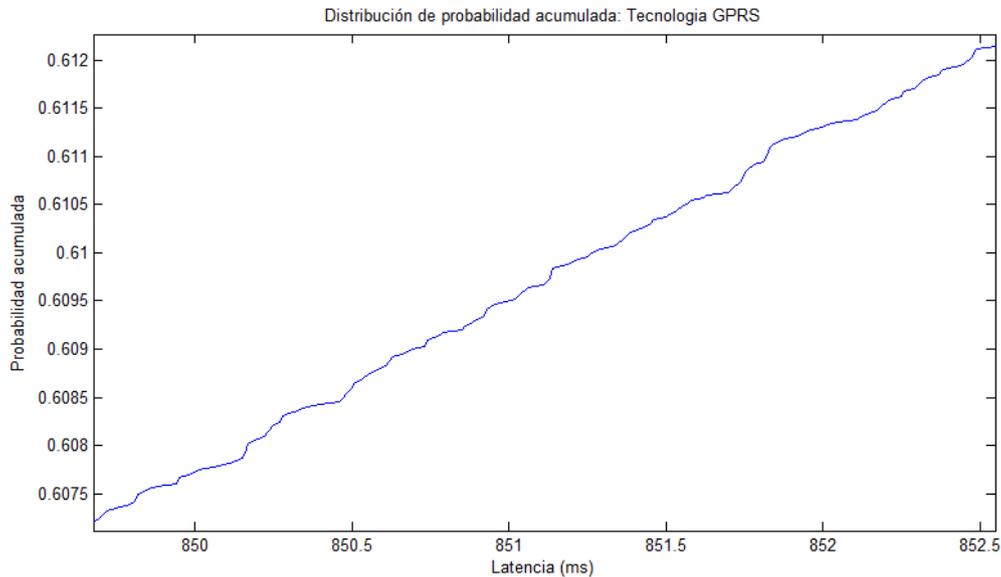


Figura 4.8. Zoom sobre la distribución de probabilidad acumulada del canal GPRS analizado

4.3.2.2 3G

Las características principales de este canal se corresponden con las de GPRS, aunque magnitud diferentes. Este es también un sistema multimodal, pero con tiempos mucho menores y más estables.

Al igual que el anterior, se puede observar en la Figura 4.9 la dispersión de las muestras, y la reducida variación temporal de los datos obtenidos, pero en este caso, dada la mayor velocidad de procesamiento de los paquetes, existe menor retardo intermedio, lo que reduce la saturación del canal y limita la cantidad de caminos más utilizados. También se observa que los datos están más concentrados en los valores menores de latencia.

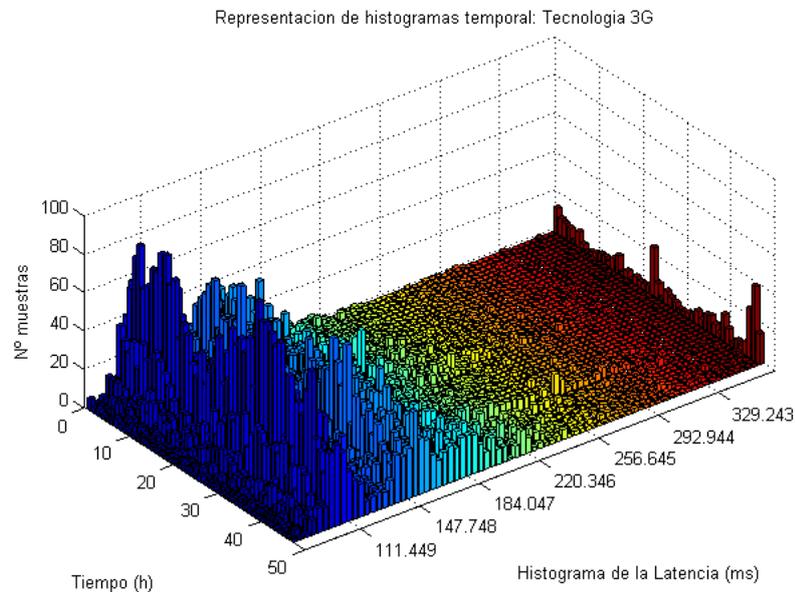


Figura 4.9. Representación del histograma a lo largo del tiempo de la latencia del canal 3G analizado

En este caso, se puede observar en la Figura 4.10 y Figura 4.11 que hay menos tramas perdidas (13 sobre 34850) y la menor variación de los valores atendiendo al color azul oscuro predominante, lo que indica una reducida desviación típica.

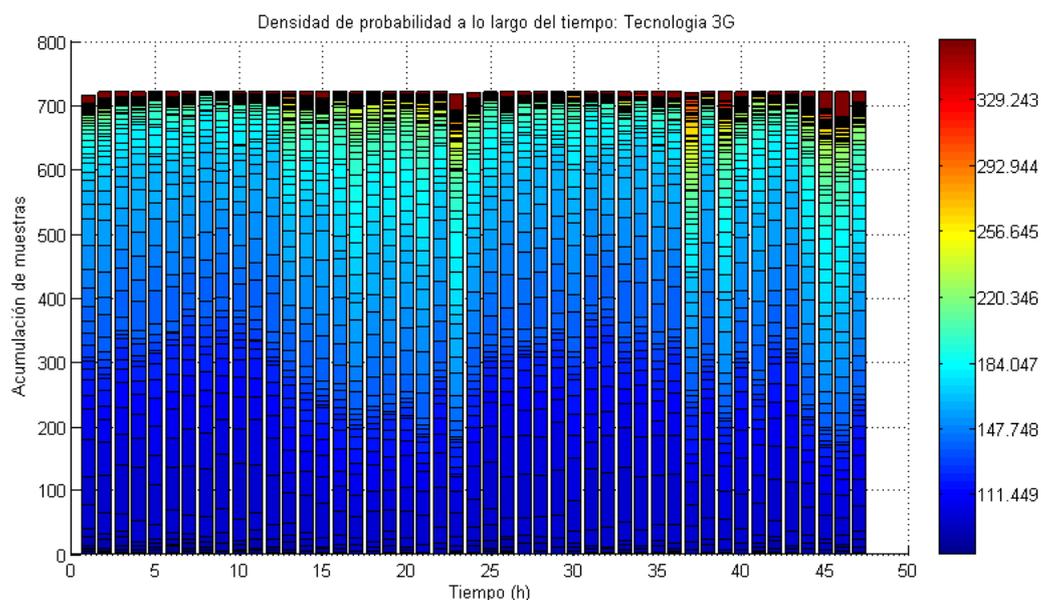


Figura 4.10. Densidad de probabilidad a lo largo del tiempo del canal 3G analizado

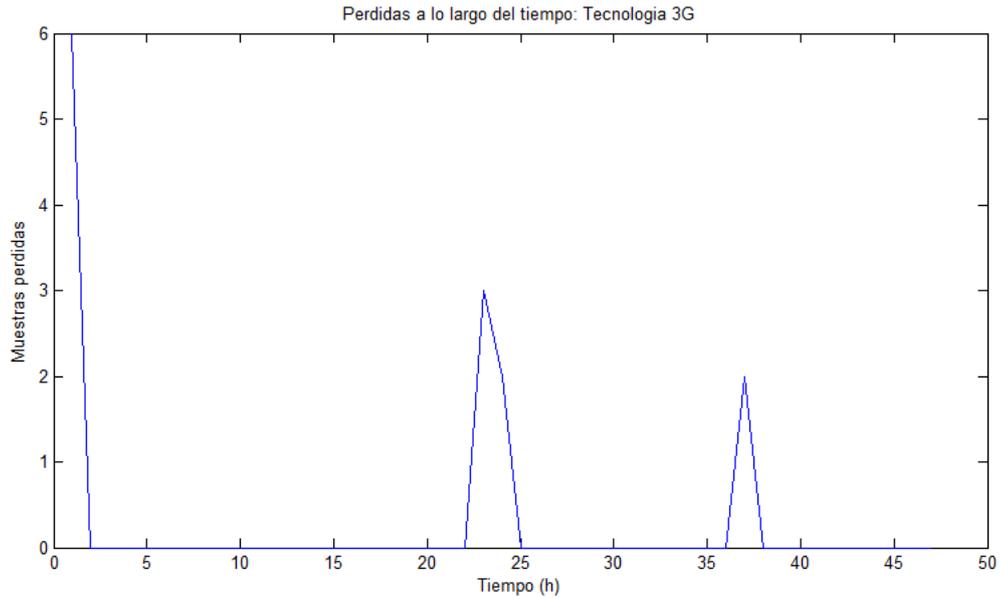


Figura 4.11. Pérdidas del canal 3G analizado

En cuanto a la Figura 4.12 se aprecian marcados principalmente dos canales, que si se observa la Figura 4.9 se puede apreciar que son constantes a lo largo del tiempo.

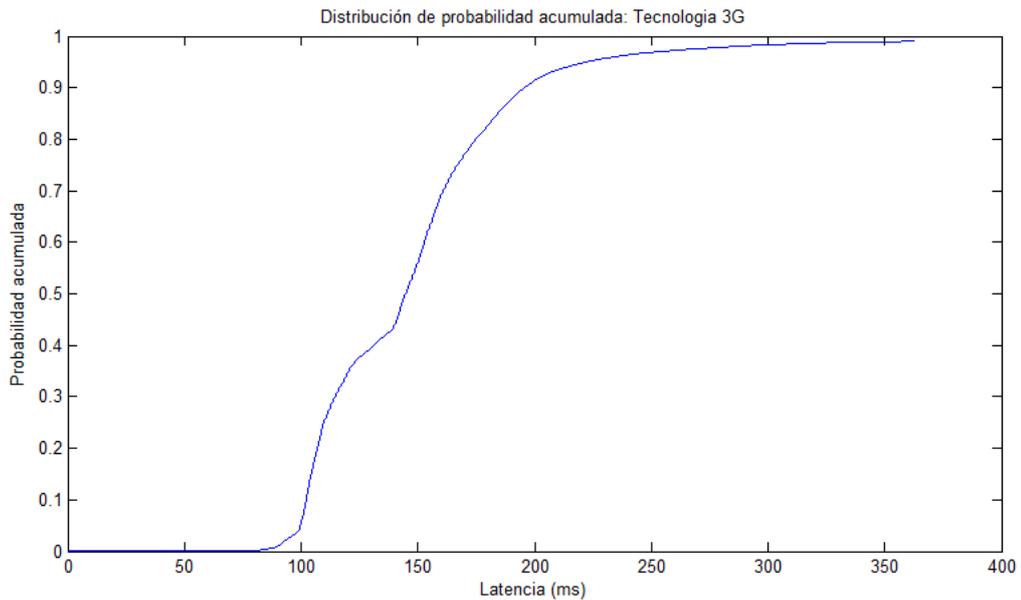


Figura 4.12. Distribución de probabilidad acumulada del canal 3G analizado

En la Figura 4.12 se puede ver una ampliación de la Figura 4.13 alrededor del valor medio. Es el mismo efecto que se observa en el canal GPRS.

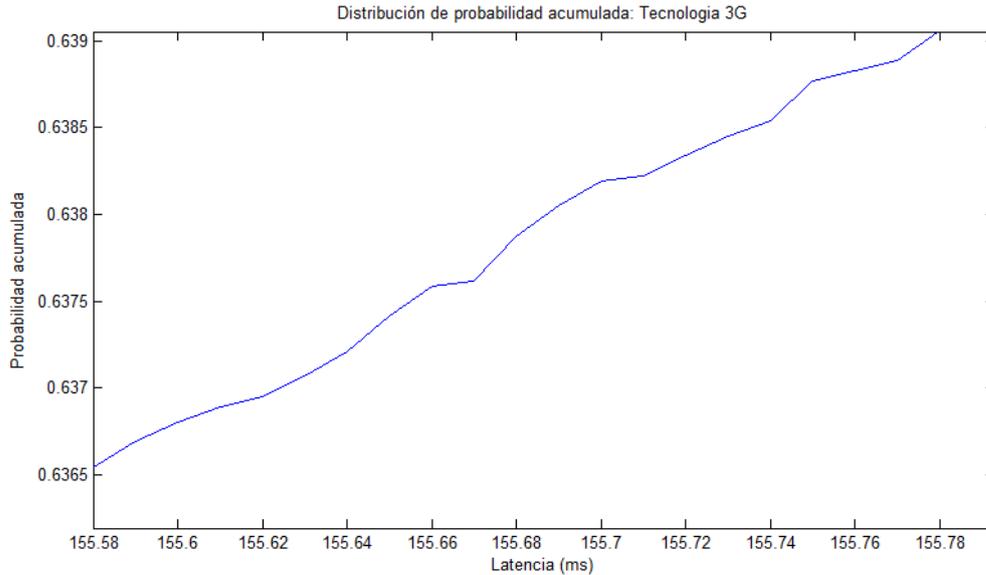


Figura 4.13. Zoom sobre la distribución de probabilidad acumulada del canal 3G analizado

4.3.2.3 ADSL

Este tipo de canal proporciona valores de latencia menores y más estables que en el caso de las comunicaciones móviles. El carácter multimodal se debe a los múltiples caminos lógicos que puede recorrer cada paquete debido a la complejidad de la red cableada. Pero en comparación con los anteriores, la separación en términos de latencia entre los distintos caminos es mucho menor, como cabe esperar ya que el medio es guiado.

En la Figura 4.14 y en la Figura 4.15 se observa una marcada estabilidad a lo largo del tiempo, manteniendo en todo momento valores próximos tanto en el máximo de los histogramas como en la dispersión.

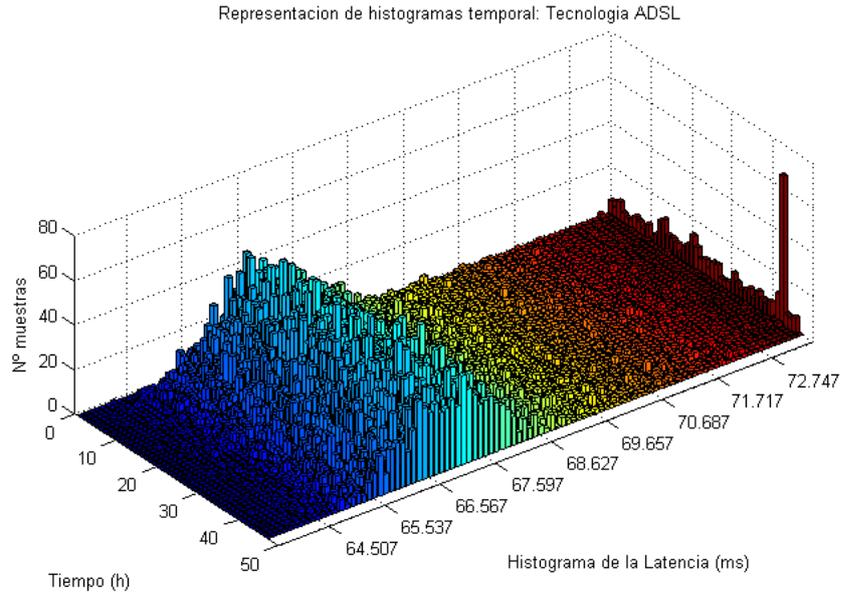


Figura 4.14. Representación del histograma a lo largo del tiempo de la latencia del canal ADSL analizado

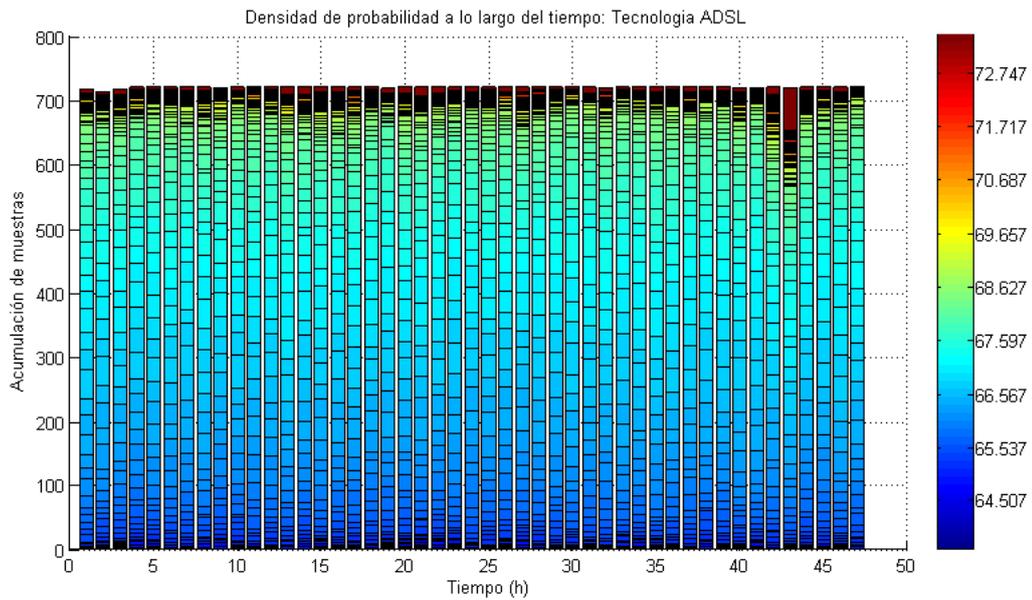


Figura 4.15. Densidad de probabilidad a lo largo del tiempo del canal ADSL analizado

La cantidad de tramas perdidas es comparable a la red 3G, siendo bastante reducida y focalizada al inicio de la prueba. Tanto en este caso como en el caso del canal 3G, estas pérdidas iniciales se corresponden con la adaptación que realiza la red en función de la carga para amoldarse a las condiciones de uso.

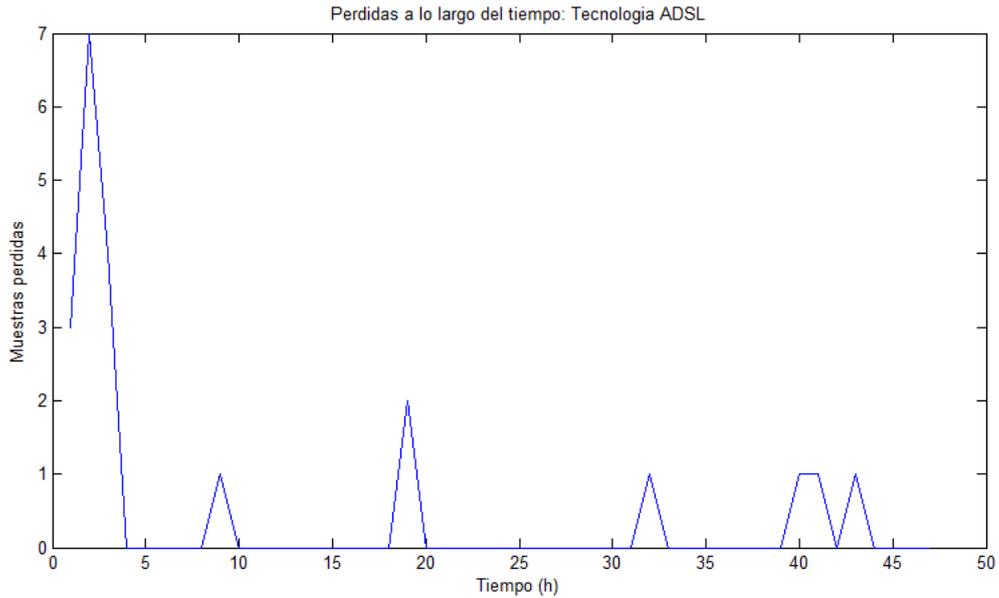


Figura 4.16. Pérdidas del canal ADSL analizado

En la Figura 4.17 se puede observar como existe una sola pendiente principal, ya que se propaga por un medio guiado, pero con un pequeño rizado, mostrado en la Figura 4.18, debido a la transmisión a través de la red.

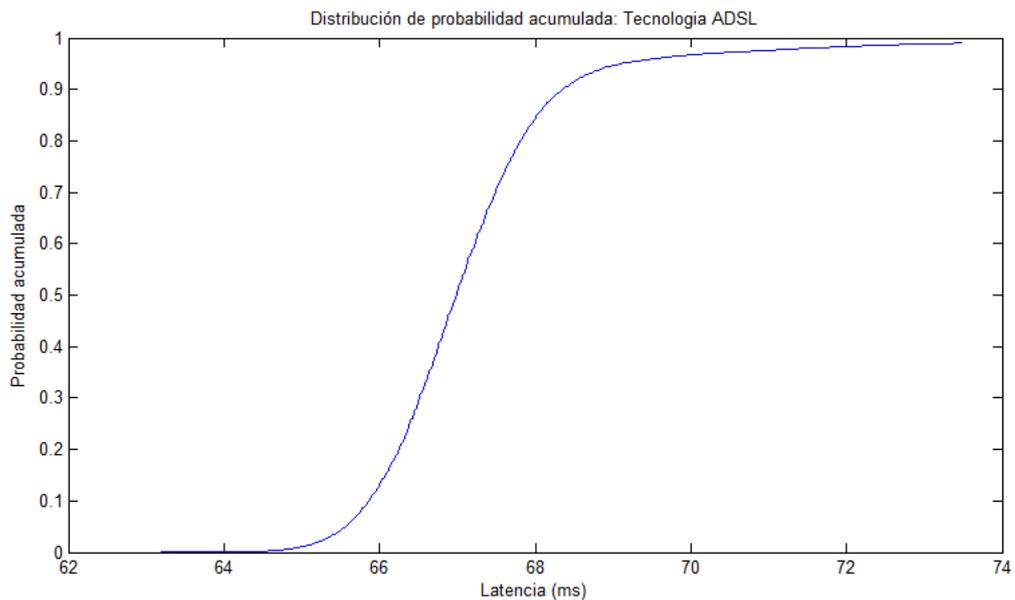


Figura 4.17. Distribución de probabilidad acumulada del canal ADSL analizado

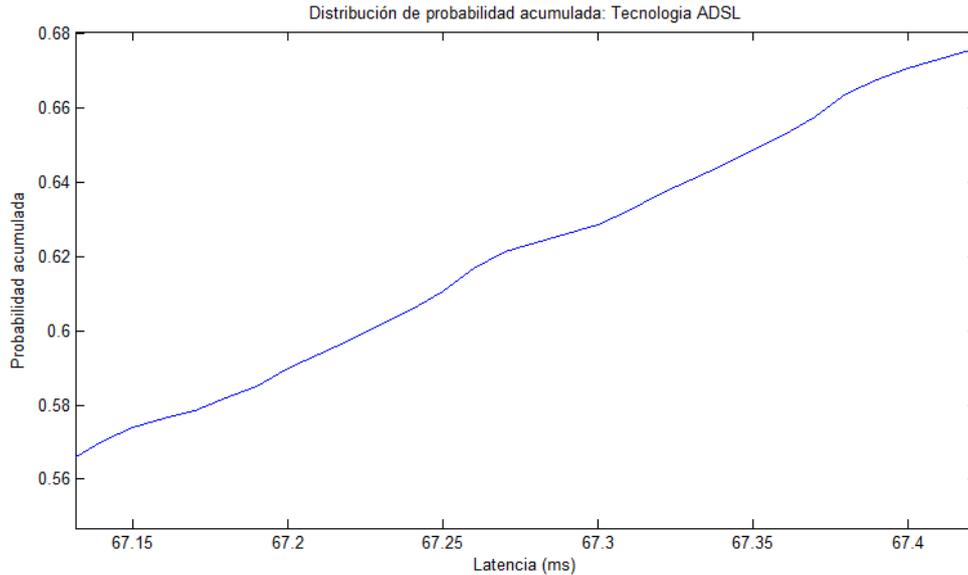


Figura 4.18. Zoom sobre la distribución de probabilidad acumulada del canal ADSL analizado

4.3.2.4 Ethernet

Este canal proporciona los menores niveles de latencia y con menor varianza de los canales analizados. Esto se debe a la extrema sencillez de la red, ya que en total existen pocos caminos posibles conectados todos ellos a alta velocidad (> 100 Mbps). La variación en los retardos solo se debe a la influencia del tráfico que recorre la red, que ha sido dimensionada y cumple con un 25% de ocupación.

En la Figura 4.19 se observa la estabilidad a lo largo del tiempo. Existe cierta variación a lo largo del tiempo de las muestras que se retardan por encima de lo representado, agrupándose en la última columna en torno a 1,13118 ms.

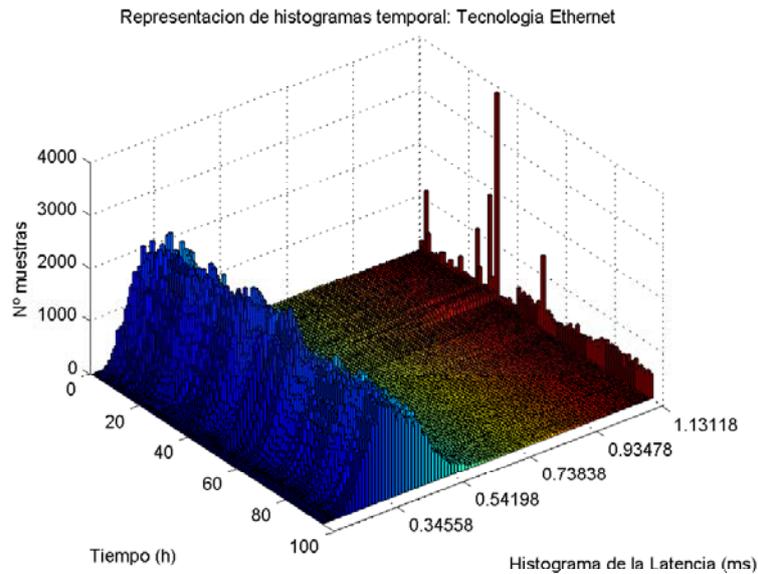


Figura 4.19. Representación del histograma a lo largo del tiempo de la latencia del canal Ethernet analizado

Este banco de pruebas se ha realizado durante un periodo de 4 días. Durante este periodo se inició un generador de tráfico entre los puntos analizados en paralelo al sistema de medida a las 40H de iniciar la prueba, y se observó una caída en el servidor de nombres de dominio (DNS, Domain Name Server) de la red alrededor de las horas 30 y 32. En la Figura 4.20 se puede observar cómo durante los eventos de caída se incrementan las latencias para un 30% de las tramas, debido al incremento de peticiones y la correspondiente sobrecarga de la red. A partir de la hora 40, se aprecia la sobrecarga inducida en la red.

La sobrecarga de la red se ha analizado solo en este canal debido a que es el único por sus valores que puede ofrecer información, ya que la aportación del efecto es del mismo orden de magnitud que la medida.

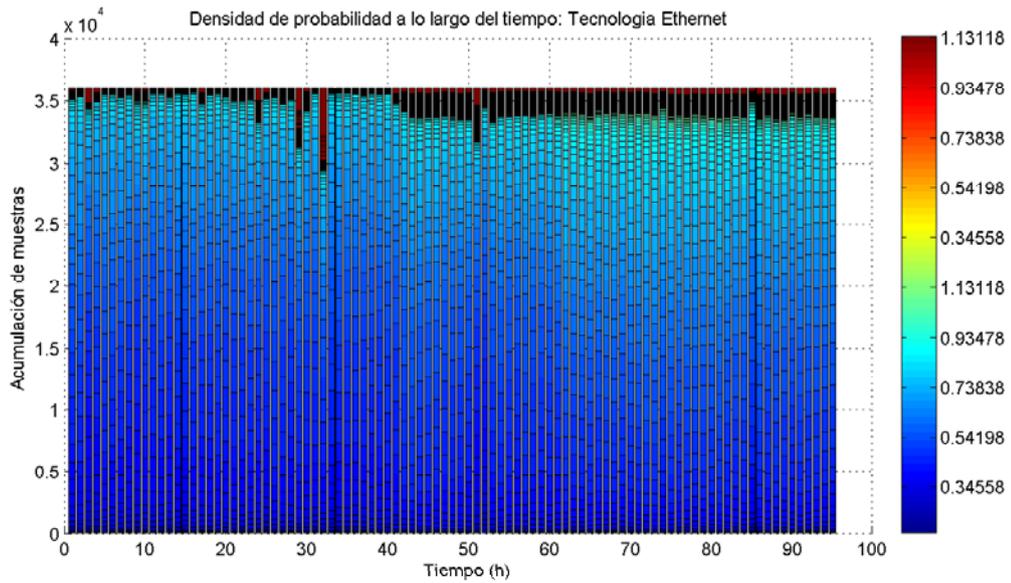


Figura 4.20. Densidad de probabilidad a lo largo del tiempo del canal Ethernet analizado

Las pérdidas en este tipo de medio son mínimas, teniendo en cuenta que tal y como se muestra en la Figura 4.21 el total de tramas perdidas es de 2, sobre un total de 3.454.362 muestras.

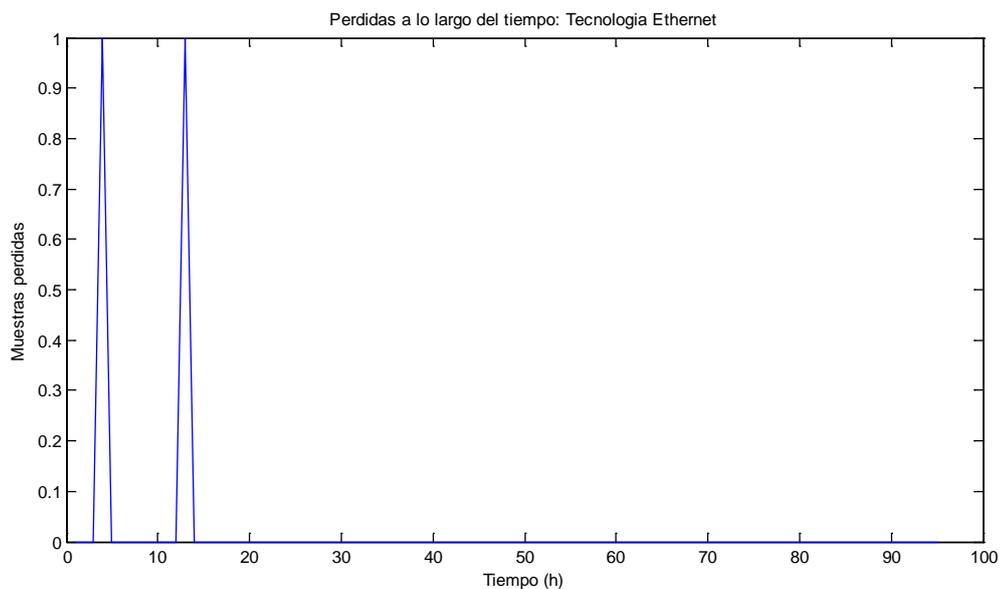


Figura 4.21. Pérdidas del canal Ethernet analizado

En la Figura 4.22 se puede observar como existe una sola pendiente principal, ya que se propaga por un medio guiado, y el rizado es mínimo debido a la sencillez de la red analizada. La parte final de la gráfica, por encima de los 0,5 ms se debe a la influencia de la sobrecarga de tráfico.

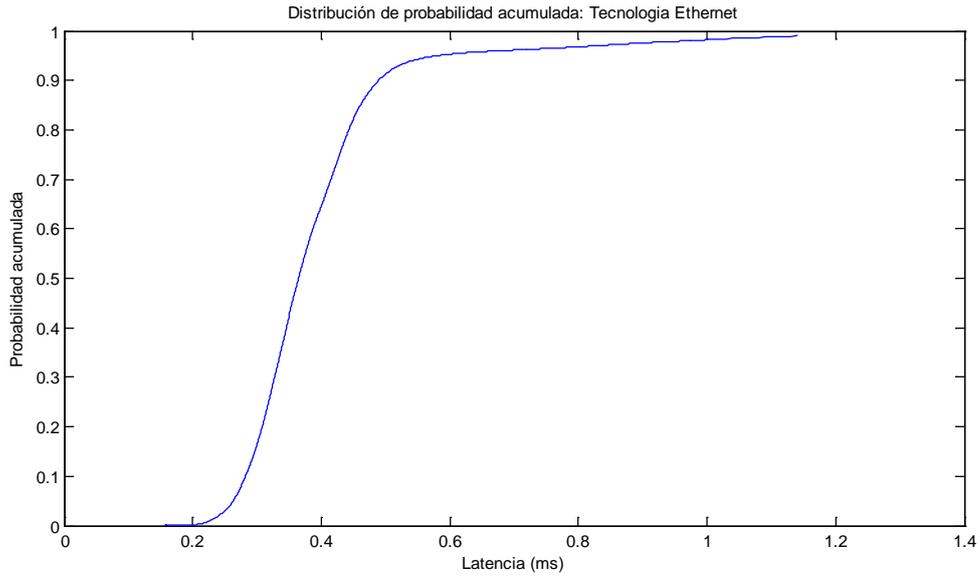


Figura 4.22. Distribución de probabilidad acumulada del canal Ethernet analizado

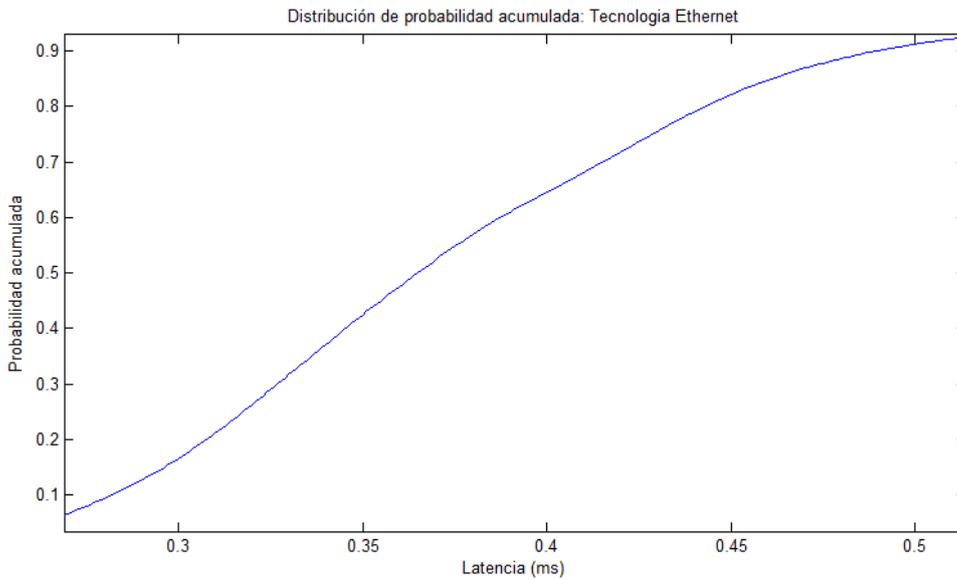


Figura 4.23. Zoom sobre la distribución de probabilidad acumulada del canal Ethernet analizado

4.4 Resultados

4.4.1 Características extraídas

A partir de las medidas tomadas para los diferentes canales se extrae los valores medios de latencia, desviación típica y disponibilidad del canal. La disponibilidad se ha calculado utilizando la ecuación (4.29).

El cálculo del valor medio de la latencia en base a las muestras tomadas se realiza mediante la ecuación (4.30)

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \quad (4.30)$$

Y la desviación típica mediante la ecuación (4.31):

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} \quad (4.31)$$

En la Tabla 4.1 se muestran los resultados estadísticos de las medidas tomadas.

Tabla 4.1. Valores extraídos de las medidas.

	Disponibilidad	Valor medio de la latencia (ms)	Desviación Típica latencia (ms)
GPRS	99,64%	847	199
3G	99,91%	115	34
ADSL	99,96%	67	3,9
Ethernet	100% (pérdidas < 10 ⁻⁷)	0,4008	2,1

4.4.2 Contraste del modelado de la latencia

Para contrastar el modelado de los parámetros realizado en el apartado 4.2 se ha empleado una red Ethernet que se corresponde con el segmento de la red de la Escuela Politécnica que comunica internamente el Departamento de Electrónica de la Universidad de Alcalá. En este segmento, entre los dos puntos analizados se encuentran 4 switches con tiempos de procesamiento de paquetes de 6 μ s, 1 router con un tiempo de procesamiento de 1 μ s y aproximadamente 50 m de cable Ethernet de categoría 6. La ocupación se estima en un 25%.

La velocidad de propagación estimada para un cable de categoría 6 es del 60% de la velocidad de la luz.

Se estima un tamaño de paquete de 256 bytes y hay que tener en cuenta para el tiempo de espera en las colas de los dispositivos que el tamaño máximo del paquete en TCP/IP es de 1520 bytes.

Tabla 4.2. Parámetros para el cálculo teórico de la latencia.

Parámetro	Valor
l	50 m
k	60%
P_{ss}	256 bytes
D_r	100 Mbps
ρ	25%
P_{sn}	1520
N_{sw}	4
N_r	1
T_{prsw}	$6 \cdot 10^{-6}$
T_{prr}	$4 \cdot 10^{-5}$

Aplicando la ecuación (4.23), y teniendo en cuenta los parámetros de la Tabla 4.2, se obtiene una esperanza sobre la latencia de 0,39 ms para la red bajo estudio, que se encuentra dentro de la desviación medida en el canal real.

La pequeña diferencia entre la latencia estimada y la medida puede venir marcada por el evento de caída en los servidores DNS que se registró durante las medidas en el canal Ethernet.

4.5 Conclusiones

En este capítulo se han definido y analizado los parámetros a considerar de los canales de comunicación para su aplicación en sistemas de medida y control de área extensa. Estos parámetros son la latencia, ancho de banda, disponibilidad y variación de la latencia a lo largo del tiempo.

Se ha definido un procedimiento para calcular la latencia de forma estadística, utilizando modelos de Markov, aproximando los valores de latencia en función de la ocupación de la red de comunicaciones. También se analiza el comportamiento estadístico de la disponibilidad en base a la fiabilidad del sistema.

Para casos complejos en los que no es posible tener conocimiento de la red con el objeto de realizar este análisis, se propone un método de análisis de los resultados de las medidas de la latencia. Con este método también se extrapola el parámetro de disponibilidad en base a los tiempos máximos permisibles en cada controlador. En las gráficas se puede observar también como los parámetros de latencia y disponibilidad van variando a lo largo del tiempo. Esta variación, debida a la ocupación de la red, se ha de tener en cuenta a la hora de diseñar los controladores, ya que pueden hacer que un sistema que con los valores medios es estable, falle sistemáticamente en determinados momentos del día o ante ciertos eventos ambientales.

Con este método se han analizado los canales comúnmente más utilizados en los dos casos de uso que se proponen en esta tesis, analizados en capítulos posteriores. Estos son los canales móviles GPRS y 3G, y los canales de tierra por cable ADSL y Ethernet.

En el caso de Ethernet se ha contrastado el resultado obtenido con el resultado medido, obteniendo una confirmación del método.

Capítulo 5.

Influencia de las comunicaciones en los índices de continuidad de la red de distribución

5.1 Introducción

Las RRII aplicadas al campo de la distribución suponen una evolución tecnológica del sistema de distribución de energía que incorpora a las instalaciones eléctricas actuales monitorización, sistemas de información y telecomunicaciones. Los objetivos que se persiguen son facilitar la integración de las energías renovables, de la generación y almacenamiento distribuido o del vehículo eléctrico en la red eléctrica. Esta integración, conforme a la Estrategia Europa 2020 [Comisión Europea. 2010], debe realizarse atendiendo a la mejora de la seguridad energética, eficacia, competitividad y sostenibilidad. En definitiva, se trata de gestionar la distribución de energía de una forma óptima, lo que debe permitir ampliar los servicios que se pueden ofrecer y mejorar la calidad del servicio, especialmente la seguridad y la calidad del suministro eléctrico.

De acuerdo con la Plataforma Tecnológica Europea de Redes Inteligentes [European technology platform for the electricity networks of the future], y en consonancia con el Comité Europeo de Normalización Electrotécnica (CENELEC, *Comité Européen de Normalisation Electrotechnique*) [European Committee for Electrotechnical Standardization], una red inteligente se define como “una red eléctrica capaz de integrar de forma inteligente el comportamiento y las acciones de todos los usuarios conectados a ella – generadores, consumidores y aquellos que realizan ambas acciones – con el fin de asegurar el suministro eléctrico, desde un punto de vista eficiente, económico y sostenible, con bajas pérdidas y altos niveles de calidad y seguridad de suministro”.

Existe en la actualidad la idea de que las redes inteligentes consisten en invertir en tecnologías de información y comunicación (TIC) que permitan incluir la gestión de los flujos de potencia, el telecontrol y reducir la necesidad de nuevas líneas. Sin embargo, estas tecnologías ya existen, si

bien su total implantación en una red tan extensa como la de distribución, suponga costes prohibitivos. Por tanto, el enfoque debe reconducirse a conseguir determinar el nivel de despliegue tecnológico óptimo que permita alcanzar estos objetivos al mínimo coste. Esto es fácil de comprender si se piensa en las dimensiones del sistema eléctrico de distribución actual: unos 2 millones de kilómetros y una enorme cantidad de clientes (más de 28 millones). Si a este sistema unidireccional, cuya función básica ha sido proporcionar energía a través de esas líneas a los clientes, se le añade la opción bidireccional de la generación o almacenamiento disperso, caso del vehículo eléctrico, entonces se hace más complejo y apasionante el desafío de encontrar el equilibrio tecnología versus inversión.

Para mantener e incluso mejorar la actual calidad de la red eléctrica, la conexión de la generación distribuida en la red no debe realizarse de manera directa, sino de forma inteligente, de modo que su gestión sea controlable en niveles superiores. Esta conexión inteligente es posible con la creación de redes inteligentes que permitan la integración de todos los elementos que se van a automatizar, para lo cual, se han de definir las necesidades de automatización en colaboración con las empresas distribuidoras de energía eléctrica.

En general, el subtransporte o niveles altos de tensión de las redes de distribución (entre 45 kV y 132 kV), están automatizados (control y operación) y con telegestión desde el centro de control de la compañía eléctrica. Sin embargo, en la red de media tensión (entre 1 kV y 36 kV) la automatización acaba en cabecera de subestación, quedando el resto, centros de transformación (CT) (entre media y baja tensión), controlados de manera manual y sin medida.

La automatización de la red de MT es necesaria para la integración a red y control de la minigeneración, el mini-almacenamiento y las cargas gestionables, con el objetivo de asegurar, e incluso mejorar, la actual calidad de red. La rápida reposición del suministro eléctrico tras situaciones de falta es un factor clave en la calidad de la red. Por ello, la automatización de la red debe permitir desarrollar un sistema auto-cicatrizante, capaz de reponer el servicio del modo más rápido y eficiente posible.

Existen índices objetivos para medir la calidad de suministro, determinados por la administración general del estado, sobre los que se establecen cierto rango de variación, y que tienen en consideración la continuidad del suministro en cuanto a número y duración de las interrupciones [Administración General del Estado. 1997]. Estos índices, que deben ser mejorados con la automatización de la reposición del servicio, son el Tiempo de Interrupción Equivalente en Potencia Instalada (TIEPI) y el Número de Interrupciones Equivalente en Potencia Instalada (NIEPI) en el caso de España y Portugal.

Los índices más utilizados internacionalmente son: Índice de Duración Media de Interrupción del Sistema (SAIDI, *System Average Interruption Duration Index*), Índice de Frecuencia Media de Interrupción del Sistema (SAIFI, *System Average Interruption Frequency Index*) e Índice de Duración Media de Interrupción de los Usuarios (CAIDI, *Customer Average Interruption Duration Index*). Con estos índices se puede hacer una mejor comparativa internacional. A modo de equivalencia, el Índice de Duración Media de Interrupción del Transformador del Sistema (T-SAIDI, *Transformer System Average Interruption Duration Index*) equivalente al TIEPI, y el Índice de Frecuencia Media de Interrupción del Transformador del Sistema (T-SAIFI, *System Average Interruption Frequency Index*) equivalente al NIEPI.

Todos estos índices se calculan normalmente para un año completo en una región determinada.

Según datos obtenidos del Consejo de Reguladores de Energía Europeos (CEER) [CEER Benchmarking Report 5.2 on the Continuity of Electricity Supply], que muestra los datos de varios índices por años naturales en diversos países, España contabilizó, en promedio y por cada usuario, 58,20 minutos perdidos en el año 2011 en 1,42 interrupciones no planificadas del suministro eléctrico (excluyendo eventos excepcionales). En la Figura 5.1 y la Figura 5.2 se muestran las evoluciones de los índices SAIDI y SAIFI (o equivalente según denominación de cada país) correspondientes a interrupciones imprevistas del suministro eléctrico (excluyendo eventos excepcionales) en diferentes países de la comunidad europea y para diversos años (1999-2013). Es necesario resaltar que no todos los países consideran, en sus estudios estadísticos, incidentes en los mismos niveles de tensión, depende del nivel de monitorización del que dispongan, y que cada país tiene su propia metodología para cuantificar los índices de calidad de servicio, así como para determinar qué se considera evento excepcional.

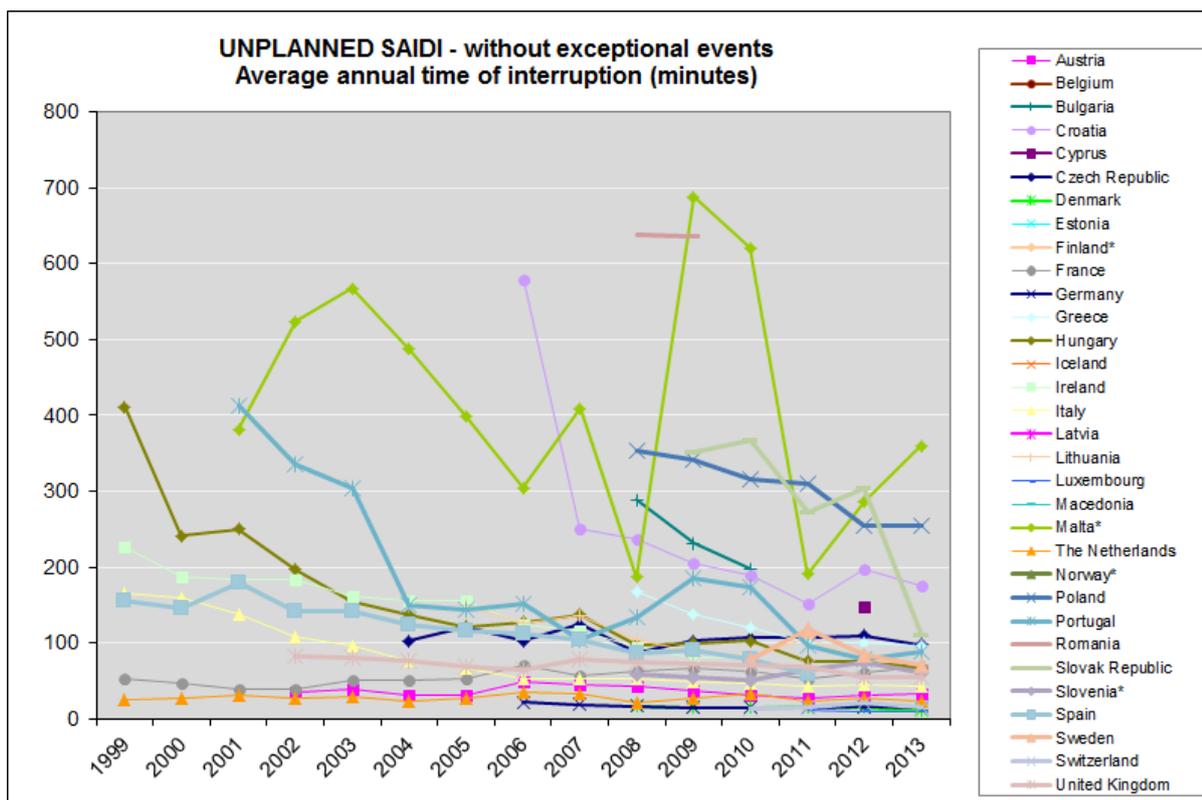


Figura 5.1. Interrupciones imprevistas del suministro eléctrico (excluyendo eventos excepcionales): Minutos perdidos por año, en promedio y por cada usuario.

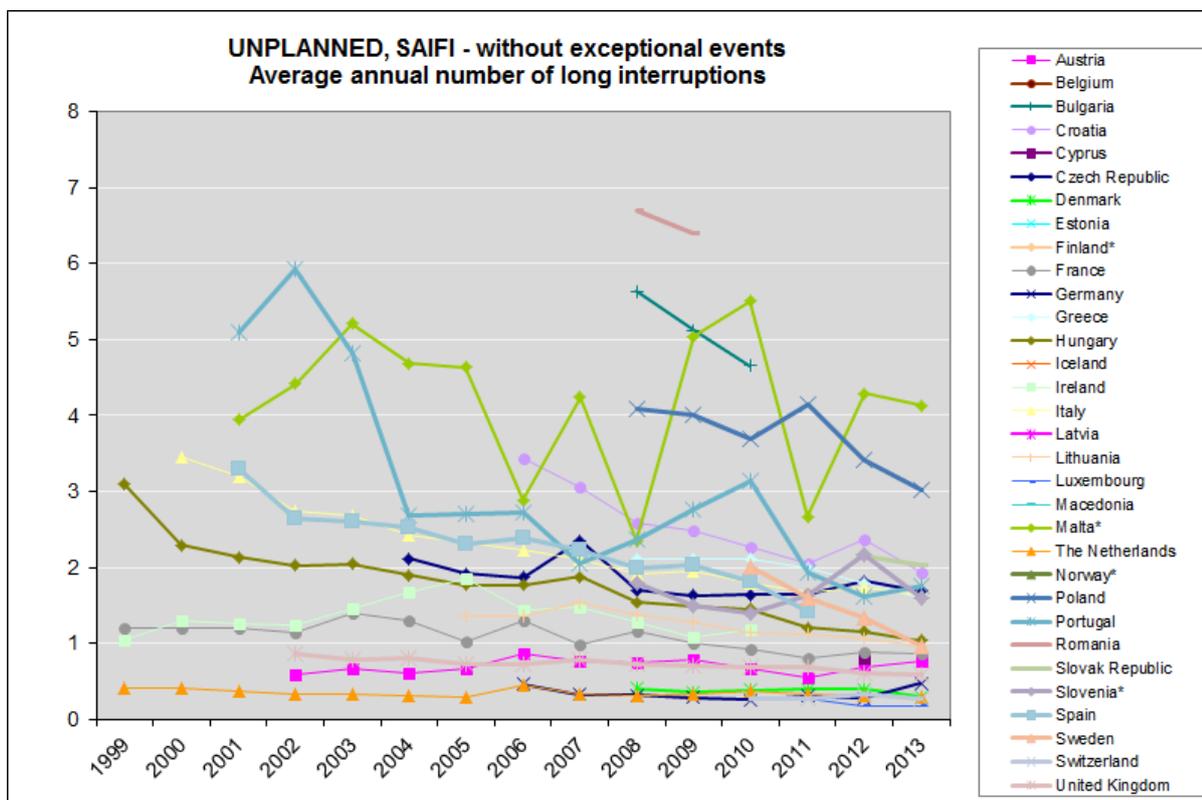


Figura 5.2. Interrupciones imprevistas del suministro eléctrico (excluyendo eventos excepcionales): Número de interrupciones por año.

El cálculo del coste económico de dichas interrupciones no es obvio y dependerá en buena medida del tipo de clientes afectados, es decir, depende del tipo de zona (urbana, semiurbana, rural concentrada o rural dispersa).

En [Warren, C. A. 1996] y [Sumper, A., et al. 2005] se plantean los diferentes puntos de vista de la calidad del servicio, así como los parámetros que afectan a los indicadores T-SAIDI y T-SAIFI basados en la potencia y el CAIDI basado en el número de consumidores.

Hay que diferenciar entre dos puntos de vista cuando se analiza la disponibilidad, y existen índices para cada uno de ellos. Desde el punto de vista del cliente, en el que se pondera cada cliente por igual, y desde el punto de vista de la distribuidora, en el que se tiene en cuenta la carga afectada [Hlatshwayo, M., et al. 2010].

Para todos estos índices se hace una previsión que depende de los tiempos de respuesta de cada evento. Todos estos tiempos han sido recopilados en base a la experiencia por los operadores de red.

En este proceso, las comunicaciones afectan tanto desde el punto de vista de la detección y señalización como de la actuación. Los pasos que se consideran automatizados, se caracterizan homogéneamente usando un tiempo medio de retardo del canal de comunicaciones, pero sin tener en cuenta el tipo de canal utilizado.

Desde el punto de vista de las comunicaciones, existen dos parámetros a tener en cuenta: la disponibilidad y la latencia. Si se estudian estos dos parámetros de manera individualizada atendiendo al tipo de canal de comunicaciones, se podrán conseguir previsiones más precisas para los índices de disponibilidad de red. De esta forma, se puede obtener una mejor aproximación a los efectos reales que tendrán nuevas inversiones en la mejora de la automatización de la red eléctrica.

5.2 Definiciones

La continuidad del suministro viene determinada por el promedio del número y la duración de las interrupciones que sufre un usuario durante un periodo de un año en un área determinada.

Estos dos parámetros se definen como:

a) El **tiempo de interrupción**, igual al tiempo transcurrido desde que la misma se inicia hasta que finaliza, medido en horas. El tiempo de interrupción total será la suma de todos los tiempos de interrupción durante un plazo determinado.

b) El **número de interrupciones**. El número de interrupciones total será la suma de todas las interrupciones habidas durante un plazo determinado.

Las interrupciones pueden ser imprevistas o programadas, estas últimas para permitir la ejecución de trabajos de mantenimiento programados en la red, en cuyo caso los consumidores deberán ser informados de antemano por la empresa distribuidora, previa autorización de la administración competente.

5.2.1 Factores básicos

Los términos necesarios para calcular los índices anteriormente explicados son:

- ΣPI = Suma de la potencia instalada de los centros de transformación MT/BT del distribuidor más la potencia contratada en MT (en kVA).
- PI_i = Potencia instalada de los centros de transformación MT/BT del distribuidor más la potencia contratada en MT, afectada por la interrupción «i» de duración H_i (en kVA).
- H_i = Tiempo de interrupción del suministro que afecta a la potencia PI_i (en horas).
- K = N° total de interrupciones durante el periodo considerado.
- r_i = Tiempo de restauración por cada evento de interrupción.
- N_i = Número de usuarios afectados por cada evento de interrupción.
- N_T = Número total de usuarios en el área indexada.

5.2.2 TIEPI

Es el tiempo de interrupción equivalente de la potencia instalada en media tensión ($1 \text{ kV} < V \leq 36 \text{ kV}$). Este índice se define mediante la siguiente expresión:

$$TIEPI = \frac{\sum_{i=1}^k (PI_i \times H_i)}{\sum PI} \quad (5.1)$$

Las interrupciones que se considerarán en el cálculo del TIEPI serán las de duración superior a tres minutos.

• **Percentil 80 del TIEPI**: es el valor del TIEPI que no es superado por el 80 % de los municipios del ámbito provincial definidos.

5.2.3 NIEPI

• **NIEPI**: es el número de interrupciones equivalente de la potencia instalada en media tensión ($1 \text{ kV} < V \leq 36 \text{ kV}$). Este índice se define mediante la siguiente expresión:

$$NIEPI = \frac{\sum_{i=1}^k PI_i}{\sum PI} \quad (5.2)$$

Las interrupciones que se considerarán en el cálculo del NIEPI serán las de duración superior a tres minutos.

El número y la duración de las interrupciones programadas deberán tenerse en cuenta a efectos de cálculo del TIEPI y NIEPI total, pero las mismas no darán lugar a reducciones en la facturación.

5.2.4 SAIDI

El índice SAIDI (System Average Interruption Duration Index) es la duración total promedio de interrupción por cliente por año; muestra la duración total de una interrupción por cliente durante un año y se suele medir en horas o minutos.

$$SAIDI = \frac{\text{Suma de las duraciones de las interrupciones}}{\text{Número total de usuarios atendidos}}$$

Y se calcula con la ecuación

$$SAIDI = \frac{\sum_{i=1}^k r_i N_i}{N_T} \quad (5.3)$$

El índice SAIDI hace referencia al tiempo esperado que un usuario va a estar sin suministro en un año.

5.2.5 SAIFI

El índice SAIFI (System Average Interruption Frequency Index) es la frecuencia media de interrupciones del sistema y se obtiene como el número de interrupciones durante el año dividido entre el número de usuarios suministrados.

$$SAIFI = \frac{\text{Número total de interrupciones}}{\text{Número total de usuarios atendidos}}$$

Y se calcula con la ecuación

$$SAIFI = \frac{\sum_{i=1}^k N_i}{N_T} \quad (5.4)$$

El índice SAIFI da una idea del número de interrupciones que puede tener un usuario en un año.

5.2.6 CAIDI

El índice CAIDI representa el tiempo medio para restaurar el servicio tras una interrupción sostenida y se obtiene dividiendo la duración total de las interrupciones en un año entre el número de interrupciones.

$$CAIDI = \frac{\Sigma \text{ Duracion de las interrupciones}}{\text{Número total de interrupciones}}$$

Y se calcula con la ecuación

$$CAIDI = \frac{\sum r_i N_i}{\sum N_i} = \frac{SAIDI}{SAIFI} \quad (5.5)$$

5.3 Efecto de las comunicaciones sobre los indicadores de calidad

Como ya se ha argumentado, en las redes de distribución el tiempo de restauración del servicio ante una falta, afecta a la calidad del servicio ofrecido a los usuarios finales. Las redes inteligentes incluyen comunicaciones para poder reducir en gran medida los tiempos de actuación ante estas faltas.

Las comunicaciones utilizadas en las redes de distribución de media tensión se caracterizan por las operadoras, al efecto del cálculo de los indicadores de disponibilidad, con valores fijos para la latencia y considerando una disponibilidad total. Sin embargo, la realidad es otra: dependiendo del tipo de canal de comunicaciones empleado, la latencia cambia de valor, sufre efectos de jitter y la disponibilidad no es del 100%. Esto es así porque los equipos de comunicaciones tienen determinadas probabilidades de fallo, que afectarán a los tiempos de restauración ante faltas, ya que, para suplir el fallo de los equipos de comunicaciones, se deberá enviar una brigada a actuar sobre el seccionador o tramo de red afectada, lo que supondrá un aumento en los tiempo de actuación sobre los centros de transformación.

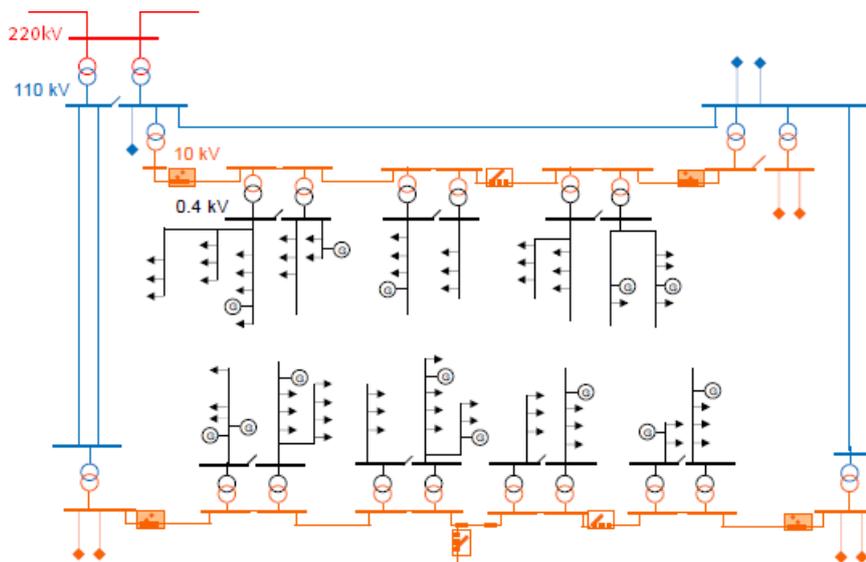
Los métodos empleados por las operadoras eléctricas para la predicción de los valores de los índices de continuidad no tienen en cuenta la no disponibilidad de los canales de comunicación ni el comportamiento pseudoestocástico en los retardos en los diferentes canales.

En base a los estudios de los diferentes canales de comunicación realizados en el Capítulo 4, se puede observar que la diferencia entre los valores utilizados para realizar los cálculos estimativos de los indicadores, y los valores reales son significativamente diferentes. En este apartado se realiza la comparación entre la estimación por parte de las distribuidoras y el efecto de incluir valores estimados más próximos a la realidad.

5.3.1 Red de distribución prototipo

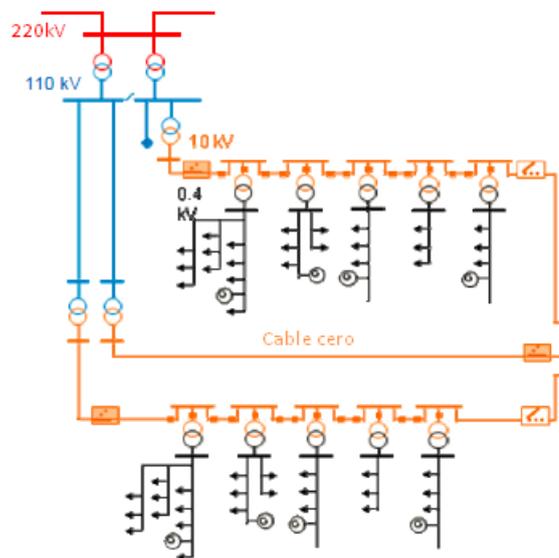
La operación habitual de las redes de distribución de media y baja tensión se realiza de forma radial. Desde el centro de control en las subestaciones, se pueden realizar maniobras telemandadas para la localización y aislamiento de las posibles averías, para posteriormente, previo paso por tensión cero, recuperar el servicio a los clientes.

En la Figura 5.3 y Figura 5.4 se muestran dos esquemas comunes de redes de distribución.



-  Interruptor de cabecera que aísla automáticamente la línea de falta
-  Puntos frontera con otras líneas de su mismo nivel de tensión, que sirven de apoyo para la restauración del servicio en caso de falta. Su operación no está automatizada.

Figura 5.3 Esquema explicativo de topología de distribución actual con puntos frontera.



-  Interruptor de cabecera que aísla automáticamente la línea de falta
-  Puntos frontera con otras líneas de su mismo nivel de tensión, que sirven de apoyo para la restauración del servicio en caso de falta. Su operación no está automatizada.

Figura 5.4 Esquema explicativo de topología de distribución actual con centro de reflexión

Como puede apreciarse, las redes en media tensión son de explotación radial, con puntos frontera con otras líneas de su mismo nivel de tensión o con centros de reflexión que se conectan al mismo nivel de tensión. Ambos sistemas sirven de apoyo para la restauración del servicio en caso de falta.

En el caso de falta en una de estas redes, la operación habitual consiste en la apertura automática del interruptor de cabecera de la línea en falta. Posteriormente las brigadas desplazadas a la zona afectada localizan la falta con la ayuda del interruptor de cabecera hasta aislar la mínima zona posible. Tras la detección y aislamiento de la falta, se cierran los interruptores de cabecera y de los puntos frontera, o puntos de reflexión, para resolver la incidencia, a la vez que se restaura el servicio de las zonas no afectadas.

La red prototipo que servirá para validar las propuestas realizadas en esta tesis, es una red del corredor del Henares que tiene la topología mostrada en la Figura 5.5. Esta red es de explotación radial, con 5 puntos frontera que unen diferentes líneas, aportando distintos caminos configurables para llegar a un punto de suministro.

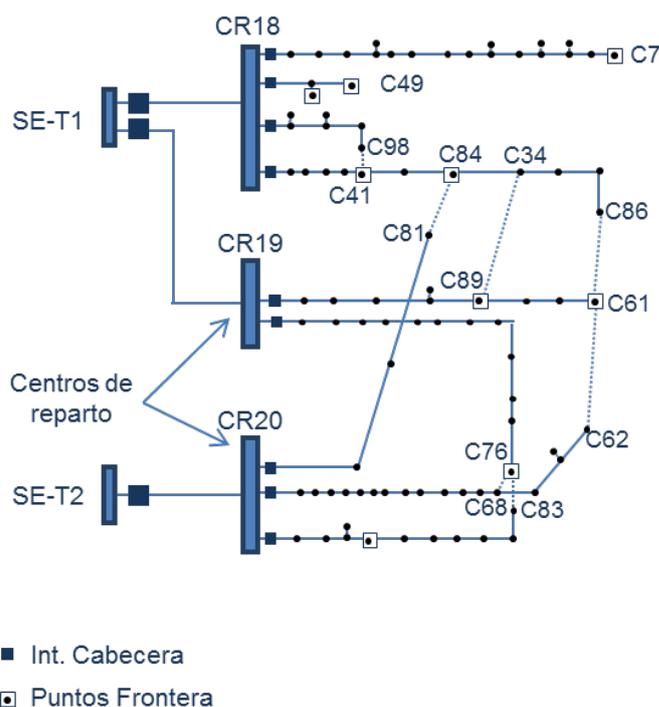


Figura 5.5. Esquema de red urbana de la red considerada.

En lo referente a los parámetros de los distintos canales de comunicaciones, la red prototipo queda caracterizada según se muestra en la Tabla 5.1. Los datos han sido proporcionados por la compañía que opera dicha red.

Tabla 5.1. Caracterización de las comunicaciones de las líneas urbanas

Línea	Retardo medio (ms)	Disponibilidad
Línea 1	324,942	0,996
Línea 2	260,649	0,998
Línea 3	145,928	0,999
Línea 4	186,549	0,998
Línea 5	646,840	0,996
Línea 6	645,096	0,998
Línea 7	1.177,474	0,966
Línea 8	555,595	0,996
Línea 9	420,719	0,997

5.3.2 Escenarios de estudio

Para poder cuantificar la influencia de las comunicaciones en los índices de calidad del suministro se han analizado diferentes escenarios de despliegue de automatización de la red de distribución.

- Escenario 1: emplea telecontrol (TC) en interruptor automático de cabecera, así como en los CTs que sean punto frontera (PF) y que también emplean TC. Este escenario es la base para la evaluación de las mejoras de la red.
- Escenario 2, con Detección de Paso de Falta (DPF): emplea únicamente detectores de paso de falta distribuidos a lo largo de la línea, pero no cuenta con TC, por lo que las operaciones de restablecimiento del servicio deben ser llevadas a cabo por la brigada en campo. Este escenario no es un escenario real, ya que los detectores de paso de falta siempre irán acompañados de telecontrol. Se analiza únicamente por observar el efecto.
- Escenario 3, con TC y DPF (TC+DPF): además de disponer de interruptor automático de cabecera y TC en los puntos frontera, cuenta con equipos distribuidos a lo largo de la línea para DPF. También dispone de TC en los interruptores asociados a dichos DPF.
- Escenario 4, con Self-healing: dispone de TC y DPF con idénticas características que en el escenario anterior (TC+DPF), pero se diferencia por estar gestionado automáticamente por la función o algoritmo de autocatrización (self-healing).

Además, en cada uno de estos escenarios también se consideran tres diferentes niveles de implementación de las tecnologías, 10%, 15% y 20%, a excepción del escenario 1 que incluye el grado de implementación que posee la red actualmente. Adicionalmente, también se considera un escenario denominado “escenario Base” que no dispone ni de TC ni de DPF.

De esta manera, la relación de escenarios considerados se muestra en la Tabla 5.2.

Tabla 5.2. Relación de escenarios considerados.

Escenarios	Nivel de implementación	Denominación
Escenario Base	-	Base
Escenario 1	-	TC
Escenario 2 - Detección de Paso de Falta (DPF)	10%	DPF al 10%
	15%	DPF al 15%
	20%	DPF al 20%
Escenario 3 - Telecontrol + Detección de Paso de Falta (TC+DPF)	10%	TC+DPF al 10%
	15%	TC+DPF al 15%
	20%	TC+DPF al 20%
Escenario 4 - Self-healing	10%	Self-healing al 10%
	15%	Self-healing al 15%
	20%	Self-healing al 20%

En el caso particular de la red mostrada en la Figura 5.5, que se caracteriza por tener una gran diversidad de configuraciones por línea, los niveles de implementación se corresponden con el porcentaje de CTs de las líneas en los que se implantará la tecnología, según cada escenario. La elección de los puntos a automatizar depende de la cantidad de CTs y de la carga de cada una de las líneas de la red. Según estas consideraciones, a continuación se resumen en la Tabla 5.3 algunas de las características de esta red: el número de PF que posee cada línea (segunda columna), el número de CTs del escenario 1 que cuentan con TC (tercera columna) y el número de CTs que se verán afectados por cada nivel de implementación de la tecnología en cada escenario considerado (cuarta columna). Asimismo, esta distribución de tecnología implantada se puede visualizar en la Figura 5.5.

Tabla 5.3. Reparto de la implementación de tecnología por línea en la red.

Línea	Nº de PF actuales	Puntos telecontrolados actuales	CTs considerados según el nivel de implementación		
			10%	15%	20%
Línea 1: T1-C18- ... -C7	1	1	1	2	3
Línea 2: T1-C18- ... -C49	2	0	1	1	1
Línea 3: T1-C18- ... -C98	1	0	1	1	1
Línea 4: T1-C18- ... -C86	4	1	1	2	3
Línea 5: T1-C19- ... -C61	2	0	1	2	2
Línea 6: T1-C19- ... -C76	1	0	1	2	3
Línea 7: T2-C20- ... -C81	2	0	1	1	1
Línea 8: T2-C20- ... -C62	2	1	1	2	3
Línea 9: T2-C20- ... -C83	2	2	2	2	2

5.3.3 Procedimiento para el despeje de falta según los diferentes escenarios

Para cada escenario se define un procedimiento para el despeje de falta y para la restauración del servicio en una línea de distribución. En función de estos procesos, y teniendo en cuenta las tablas de tiempos definidas anteriormente, se podrá evaluar el indicador de eficiencia, TIEPI, para estos escenarios.

Cada compañía tiene sus topologías características, que se han tenido en cuenta a la hora de desarrollar el proceso actual de despeje de la falta y de restauración del servicio, y también a la hora de proponer los diferentes grados de implementación de la automatización.

De forma genérica, el proceso de despeje de falta y restauración del servicio dependerá del número de detectores de paso de falta y por lo tanto, del número de interruptores automatizados y telecontrolados. Este proceso identifica el tramo en el que se encuentra la falta, lo aísla lo máximo posible, y envía una brigada para su reparación. El proceso de automatización aporta, apoyándose en las comunicaciones, una reducción muy considerable del tiempo de respuesta, al poder aislar la falta sin tener que enviar una brigada a recorrer la línea completa, sino solo a un área reducida de esta.

```

N → Número de detectores de paso falta
D → Detector Paso Falta
T → Tramos entre Detectores de paso de falta, Siendo Ti el tramo que va de Di-1 a Di
Falta_en_la_linea
{
    Deteccion y Apertura de cabecera
    Reenganche
    For i ∈ N
    {
        Si (No Deteccion Paso Falta en Di)
        {
            Reestablece Ti+1 ... TN
            Brigada a Ti
        }
    }
}

```

Esta metodología es aplicable a cualquier tipo de red. De forma particular para aplicar la propuesta de esta Tesis se aplicará sobre la red mostrada en la Figura 5.5 y descrita en los apartados anteriores.

5.3.3.1 Proceso de despeje de la falta y de restauración del servicio en el escenario 1

La Figura 5.6, muestra el diagrama de flujo del proceso de despeje de la falta y de restauración del servicio, considerando una línea en la que, además del interruptor automático de cabecera, están telemandados el interruptor del extremo de la línea y un punto intermedio.

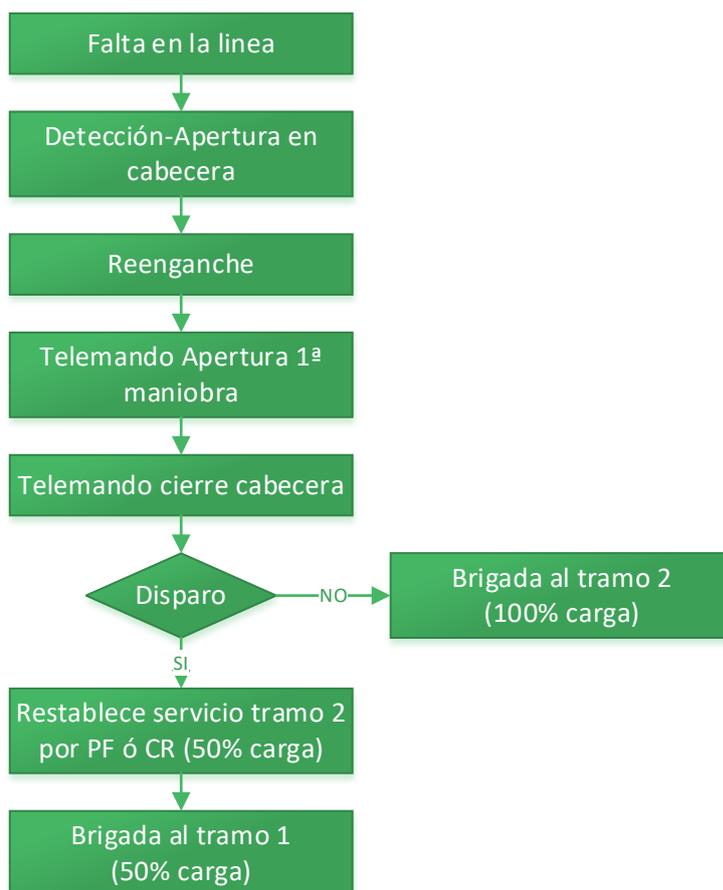


Figura 5.6. Diagrama de flujo del proceso actual de despeje de una falta y restauración del servicio, considerando interruptor de cabecera más dos interruptores telemandados.

Tal y como se aprecia en el diagrama de la Figura 5.6, tras la detección de la señal de falta en el centro de control se debe proceder a su localización. La localización se realiza a través de la apertura del interruptor de primera maniobra (el cual se encuentra en un punto intermedio), y la orden de cierre del interruptor de cabecera. Un nuevo disparo del interruptor automático implica que la falta se encuentra en el primer tramo. Por el contrario, si, transcurrido el tiempo de comprobación, no hay detección de la señal de disparo en el centro de control (CC), entonces la falta se ubica en el segundo tramo.

Cada una de estas posibilidades supone una secuencia de eventos diferente para llegar a restablecer el servicio. Una falta en el primer tramo (Figura 5.7) permite restablecer el servicio en el segundo tramo de la línea a través del punto frontera o centro de reflexión, mientras la brigada acude al primer tramo al objeto de localizar la falta y restablecer por completo el suministro. Una falta en el segundo tramo (Figura 5.8) no permitirá restablecer el servicio de ningún tramo hasta que la brigada tenga totalmente localizado el tramo en el que se localiza la falta.

En las siguientes figuras, se representan el estado de los interruptores, en blanco cuando están abiertos y rellenos cuando su estado es cerrado. Si la línea es de color naranja significa que sus CTs no están siendo alimentados y cuando la línea es de color azul significa que está en servicio.

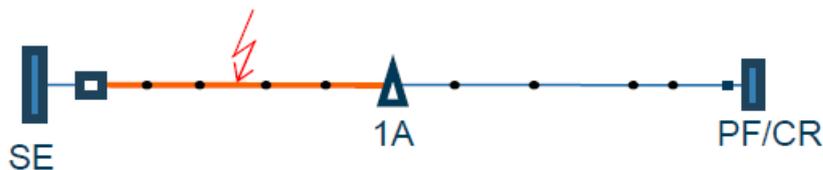


Figura 5.7. Diagrama de localización de una falta en el tramo 1 para el escenario 1.

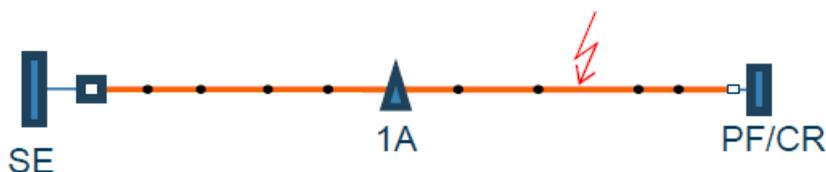


Figura 5.8. Diagrama de localización de una falta en el tramo 2 para el escenario 1.

La actuación de la brigada para la localización de la falta consiste en ir abriendo localmente interruptores en el tramo en falta hasta encontrar el tramo afectado (aquél en el que el interruptor de cabecera no se dispara al cerrarlo). Una vez localizada la falta en un CT, o entre dos de ellos, se abren de forma local los interruptores que aíslan el área afectada y se cierran los interruptores telemandados, al objeto de restaurar el servicio en el resto de la línea.

5.3.3.2 Proceso de despeje de la falta y de restauración del servicio en los escenarios al 10% de automatización

Como se ha descrito anteriormente, el escenario 2 incluye la automatización de dos interruptores telecontrolados y un dispositivo de detección de paso de falta en el punto intermedio de la línea. En los escenarios 3 y 4 con el 10% de automatización, el caso es similar.

El procedimiento de detección, despeje de la falta y restauración del servicio sería tal y como se muestra en el siguiente diagrama de flujo de la Figura 5.9.

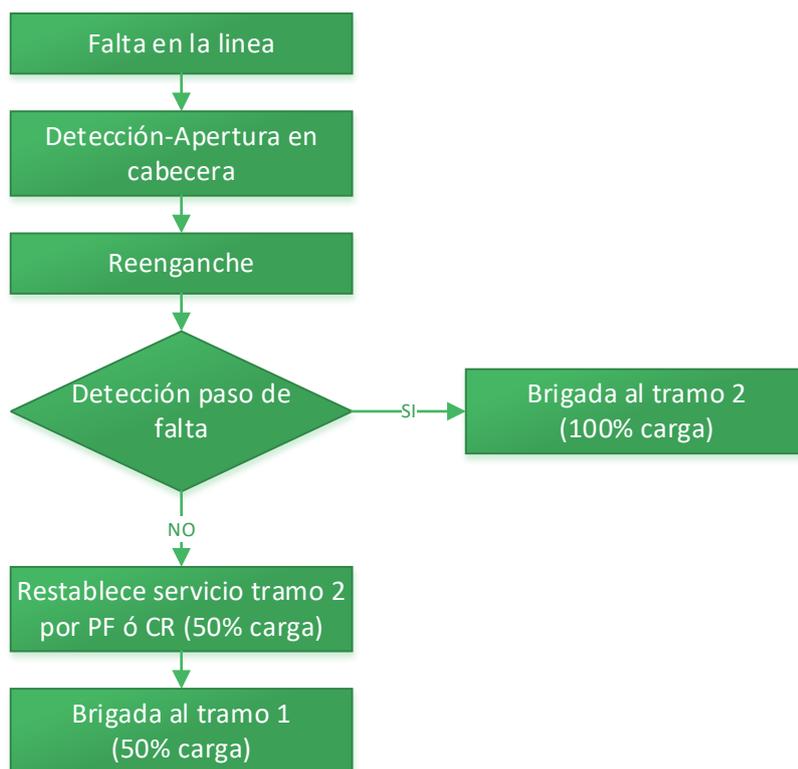


Figura 5.9. Diagrama de flujo del proceso automatizado de despeje de una falta y restauración del servicio, considerando interruptor de cabecera más dos interruptores automatizados, y detectores de paso de falta.

La gran diferencia con respecto al escenario 1 es que desaparece la actuación del personal del Centro de Control (CC) para la localización de la falta, que se realiza mediante una función o algoritmo que, con la información del estado del detector de paso de falta, manda directamente la orden de actuación de brigada al tramo afectado, así como la orden de restablecimiento del servicio cuando sea posible. Esta diferencia conlleva de media 2.5 minutos menos en el restablecimiento del servicio, correspondientes a la suma de tiempos que el personal del CC utiliza en los procedimientos de detección del fallo según las tablas que se verán en el punto 5.3.4, y, por tanto, también conlleva una reducción en el TIEPI.

5.3.3.3 Proceso de despeje de la falta y de restauración del servicio en los escenarios al 15% y al 20% de automatización

Para los escenarios con el 15% y 20% de automatización, el diagrama de flujo que describe el procedimiento de detección, despeje de la falta y restauración del servicio es prácticamente el mismo, tal y como puede observarse en los dos siguientes diagramas representados en la Figura 5.10 y en la Figura 5.11.

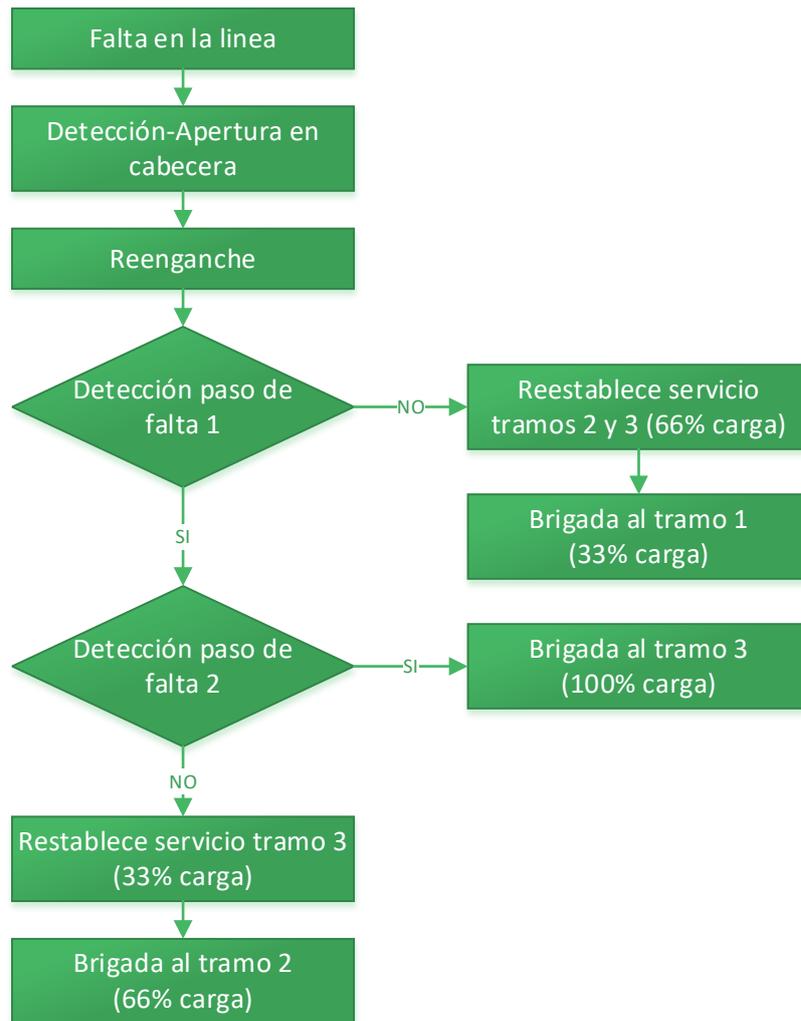


Figura 5.10. Diagrama de flujo del proceso automatizado de despeje de una falta y restauración del servicio, considerando interruptor de cabecera más tres interruptores automatizados y dos detectores de paso de falta.

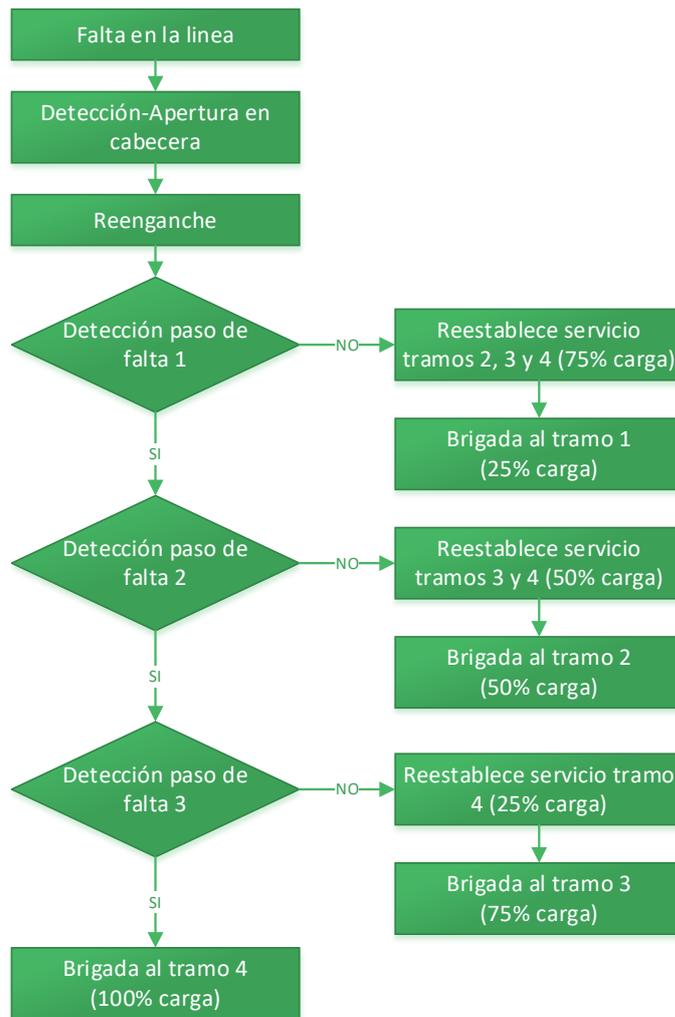


Figura 5.11. Diagrama de flujo del proceso automatizado de despeje de una falta y restauración del servicio, considerando interruptor de cabecera más cuatro interruptores automatizados y tres detectores de paso de falta.

La diferencia con el procedimiento del segundo escenario es que el algoritmo recibe información de estado de más puntos y que el área de actuación para la brigada disminuye conforme aumenta la automatización y la instalación de detectores de paso de falta.

5.3.4 Tiempos de actuación

Conforme a los procedimientos de actuación en caso de falta en una línea de distribución, a continuación se desglosan los tiempos de cada evento involucrado en la detección de la falta, en la localización de la falta y en la restauración del servicio.

En la Tabla 5.4 se muestran los tiempos típicos de los eventos involucrados en la detección de la falta. Todos los eventos indicados son comunes al proceso actual y al automatizado. Los resultados recogidos en estas tablas resultan de la información que han proporcionado las distribuidoras de la red sobre los tiempos de actuación.

Tabla 5.4. Tiempos típicos considerados para cada uno de los elementos involucrados en la detección de la falta.

Evento	T(ms)
Detección de la falta por el interruptor automático de cabecera	30
Apertura del interruptor automático de cabecera antes o tras reenganche	60
Actuación del reenganche	3000
Señal de alarma al Centro de Control (CC) - (Tiempo de comunicación)	1500
Detección de la señal de disparo en el Centro de Control (CC) - (Retardo del automatismo)	10
Tiempo de espera del CC para verificar si hay o no disparo de un dispositivo de corte después de una maniobra en localización de la falta	150

Algunos de estos eventos, como “Detección de la falta por el interruptor automático de cabecera”, “Apertura del interruptor automático de cabecera” y “Detección de la señal de disparo en el Centro de Control (CC)” son también requeridos en el procedimiento para la localización de la falta.

En la Tabla 5.5 se muestran los tiempos del resto de eventos involucrados en la localización de la falta.

Tabla 5.5. Tiempos considerados para cada uno de los elementos involucrados en la localización de la falta.

Evento	T(ms)
Actuación del personal del CC (orden de cierre/apertura) [1er evento] (sólo para el proceso actual)	10000
Actuación del personal del CC (orden de cierre/apertura) [2º evento] (sólo para el proceso actual)	7000
Envío de petición automática desde CC de estado a los detectores de paso de falta (sólo para el proceso automatizado)	20
Recepción de estado de los detectores de paso de falta (sólo para el proceso automatizado)	20
Algoritmo de localización de la falta (sólo para el proceso automatizado)	5

Evento	T(ms)
Orden automática de apertura/cierre a un interruptor (tiempo de ejecución de la función selfhealing)(sólo para el proceso automatizado)	5
Tiempo de comunicación de la señal de apertura/cierre a cabecera, seccionador, PF, CR (en ambos procesos)	40
Apertura de los interruptores de: 1ª maniobra, 2ª maniobra, Punto frontera (PF), Centro de reparto (CR) (en ambos procesos)	80
Cierre de: interruptor automático, PF, CR,... (en ambos procesos)	40
Confirmación de cierre/apertura de: interruptor automático, PF, CR,... (en ambos procesos)	20

La Tabla 5.6 recoge los tiempos de los eventos involucrados en la restauración del servicio. Respecto a la estimación del tiempo de actuación de la brigada, se diferencia en función de los tramos que se deben cubrir.

Tabla 5.6. Tiempos considerados para cada uno de los elementos involucrados en la localización de la falta.

Evento	T(ms)
Actuación del personal del CC (aviso a brigada) (sólo para el proceso actual)	180000
Aviso automático a brigada (sólo para el proceso automatizado)	100
Actuación de brigada en función del tamaño de los tramos a cubrir (ambos procesos):	
Actuación de brigada (1,5 h) línea entera	5400000
Actuación de brigada (1 h) línea entera corta	3600000
Actuación de brigada (0,75 h) media línea	2700000
Actuación de brigada (0,5 h) un tercio de línea	1800000

Evento	T(ms)
Actuación de brigada (0,375 h) un cuarto de línea	1350000
Actuación del personal del CC (aviso a brigada) (sólo para el proceso actual)	180000
Aviso automático a brigada (sólo para el proceso automatizado)	100

En estas tablas, se asume un comportamiento determinístico de la red de comunicaciones con una latencia fija de 40 ms y una disponibilidad del 100%.

5.3.5 Propuesta de metodología para incluir la influencia de las comunicaciones en el TIEPI

En los apartados anteriores se ha evaluado el proceso de restauración de faltas en distintos escenarios de automatización de la red. Sin embargo, no se han tenido en cuenta los efectos de la variabilidad de la latencia y de la disponibilidad de la red de comunicaciones.

Para abordar estos efectos de una manera más completa, se considerarán dos aspectos relativos a la influencia de la red de comunicaciones:

1. Por un lado, se estudia cuál es el efecto sobre el TIEPI de los retardos en los intercambios de información entre equipos comunicados instalados en la red eléctrica, es decir, la latencia del sistema de comunicaciones. Para el presente estudio se tienen en cuenta los resultados del Capítulo 4 relativos a los distintos canales de comunicaciones, aplicados al retardo de cada nudo de comunicación de las líneas de la red mostrada en la Figura 5.5.
2. Adicionalmente, también se analiza cuál es el efecto sobre el TIEPI de una pérdida parcial o total de la red de comunicaciones. Aunque la probabilidad de ocurrencia de la pérdida total del sistema de comunicaciones es considerablemente reducida, se pueden dar situaciones tales como sobretensiones en la red eléctrica que dejan fuera de servicio los equipos de comunicaciones, actos vandálicos que rompen/roban dichos equipos, etc., que provocarían la pérdida total de las comunicaciones. Para ello, se ha considerado el valor de la disponibilidad de las comunicaciones según los resultados del estudio del Capítulo 4. En la Tabla 5.8 y la Tabla 5.9 se consideró que la disponibilidad de las comunicaciones era del 100% o, dicho de otra manera, que no existía pérdida de comunicaciones. La consecuencia de una pérdida de comunicaciones es que debe iniciarse el procedimiento de actuación para restablecer el servicio considerando que no hay comunicaciones, esto es, se trataría del caso base planteado en el apartado 5.3.2. En el presente estudio se considera que una vez activado este procedimiento básico, se mantendrá hasta resolver la falta. En la realidad,

las comunicaciones se restablecerían en un determinado tiempo, y se volvería a hacer uso del procedimiento de actuación considerando comunicaciones, pero dado que no se dispone de datos relativos a tiempos de restauración, no se tendrá en cuenta esta última alternativa.

Se procede a continuación a evaluar el efecto de la red de comunicaciones sobre los escenarios descritos en el apartado 5.3. Previamente es necesario realizar algunas consideraciones. En primer lugar, el efecto de la red de comunicaciones será evidente únicamente en aquellos escenarios en los que la red de comunicaciones constituya el principal medio de intercambio de información entre los elementos de la red eléctrica. Por este motivo, el Escenario Base, que no dispone ni de TC ni de DPF, no será nuevamente analizado.

Por otro lado, en todos los escenarios estudiados se considera que existe comunicación con cabecera de línea y con los PF al final de la línea y, puesto que el objetivo de este estudio es comparar cómo afecta la variabilidad de la latencia y la disponibilidad del sistema de comunicaciones en distintos escenarios ya descritos, no se va a considerar la pérdida de comunicaciones en estos puntos, sino en los puntos donde se aplicaría TC, DPF o auto cicatrización. Aunque sí se considera el retraso que pueden sufrir las comunicaciones de esos puntos según la tecnología empleada, puesto que según el escenario bajo estudio, se recurrirá un mayor número de veces a estos puntos para ubicar la falta o para aislarla.

En los siguientes apartados se detallan las consecuencias que tienen la variabilidad de la latencia y la disponibilidad de la red de comunicaciones, en cada escenario analizado.

5.3.5.1 Método de cálculo de la influencia de la variabilidad de la latencia de las comunicaciones y de la disponibilidad, en los valores de TIEPI

La inclusión de los parámetros aportados por el análisis de las comunicaciones se contempla de dos maneras diferentes.

Por un lado, la latencia medida en los canales se reflejará en los cálculos del TIEPI al incrementar los valores de los tiempos empleados en las comunicaciones tanto de la señalización como de la actuación. El incremento será debido a la diferencia entre el tiempo fijo de 40 ms proporcionado por las distribuidoras como tiempo de comunicación y los hasta 1177,47 ms de retardo en la línea 7.

Para tener en cuenta la disponibilidad de cada canal, es necesario tener calculado el tiempo de restauración en caso de que no tener implantando ningún sistema de comunicaciones. La pérdida de comunicaciones se detecta porque se sobrepasa un determinado tiempo de espera, dependiente del tipo de canal y de si se trata de una aplicación de telecontrol o de telemedida. Los tiempos de espera considerados en este trabajo son los descritos en Capítulo 4.

El tiempo de restauración (H_i) se ve afectado por las comunicaciones según:

$$H_i = (H * D_i) + (H_0 * (1 - D_i)) \quad (5.6)$$

Siendo H_0 el tiempo empleado en la restauración en caso de no estar disponibles las comunicaciones, H el tiempo cuando todas las comunicaciones funcionan correctamente y D_i la disponibilidad de los canales de comunicaciones utilizados.

5.3.5.2 Efecto de la red de comunicaciones sobre el escenario 1

En el escenario 1 las cabeceras de las líneas están telecontroladas, al igual que aquellos CTs que actúan como PF y que, según la configuración de la red, también emplean TC, tal y como se expone en la Tabla 5.3. Además, se dispone de interruptor automático en cabecera.

Debido a la diversidad de las configuraciones de las líneas de esta red, a continuación se detalla el efecto de la red de comunicaciones sobre la misma en función del tipo de línea en el escenario 1.

Cada caso implica unas consecuencias distintas ante los fallos o retardos de las comunicaciones.

5.3.5.2.1 Línea con un punto frontera en su extremo

En primer lugar, desde el punto de vista de la automatización, el caso más básico que ocurre en el escenario 1 de la red se da en aquellas líneas en las que sólo se posee un PF en su extremo y no se dispone de ningún tipo de TC (excepto en cabecera, que siempre existe TC), tal y como se representa en la Figura 5.12.



Figura 5.12. Escenario 1: Esquema de línea con un PF en su extremo.

En este tipo de líneas, ante la detección de la falta por la protección de cabecera y el consiguiente disparo de dicho interruptor, todas las cargas conectadas a dicha línea quedarán sin suministro hasta que se envíe a la brigada a restaurar los tramos afectados de la línea. De esta manera, el retraso imputable a las comunicaciones es de aplicación sólo a las primeras fases de este procedimiento de actuación. Debido al elevado tiempo necesario para restaurar la carga en este tipo de líneas del escenario 1, el efecto de los retardos de comunicaciones es comparativamente despreciable.

Tal y como se ha expuesto en la introducción del apartado 5.3.2, no se considera el fallo en las comunicaciones de cabecera ni de los PF en los extremos de la línea, por lo que, en este escenario, no aplica el análisis de la disponibilidad de las comunicaciones.

5.3.5.2.2 Línea con dos o más puntos frontera tele controlados

En este apartado se presenta el caso de líneas en las que se poseen dos o más PF, uno en el extremo y el resto distribuidos a lo largo de la línea, disponiendo todos estos PF de TC, tal y como se representa en la Figura 5.13 y en la Figura 5.14.

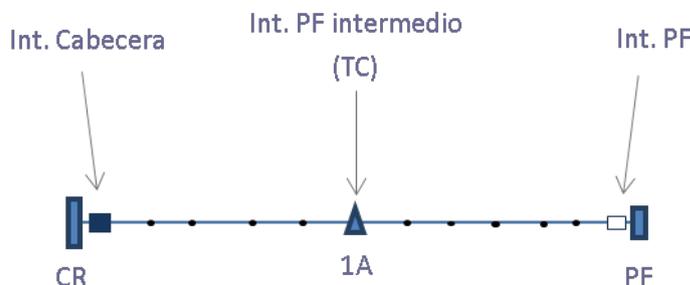


Figura 5.13. Escenario 1: Esquema de línea con dos PF telecontrolados.

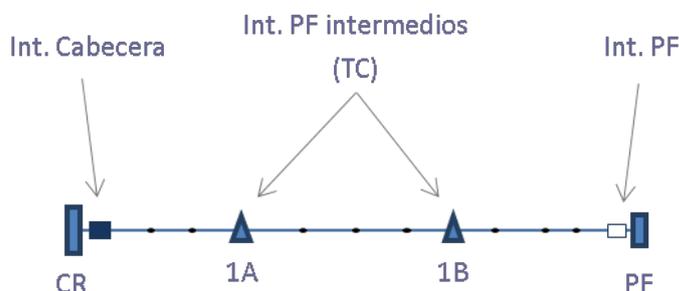


Figura 5.14. Escenario 1: Esquema de línea con tres PF telecontrolados.

En este tipo de líneas, ante la detección de la falta por la protección de cabecera, y el consiguiente disparo de dicho interruptor, el operario del centro de control (CC) procederá a abrir por telemando el PF intermedio de la línea. Posteriormente, se cerrará también por telemando el interruptor de cabecera y, en función de si existe disparo de cabecera de nuevo, se localiza en qué tramo de la línea está la falta. El número de PF intermedios determina cuántas veces se lleva a cabo esta acción, y el tramo mínimo en el que se puede localizar la falta. Además, este TC implica que un porcentaje de la carga se restaura muy rápido, por debajo de los 3 minutos, por lo que no contabiliza en el cómputo del TIEPI. En el caso de dos PF, según los cálculos extraídos del procedimiento indicado en la Orden ECO/797/2002 [Ministerio de Economía. 2002] y teniendo en cuenta los tiempos del apartado 5.3.4 proporcionados por las distribuidoras, el 50% de la carga se consigue restaurar en 1.29 minutos o 1.15 minutos (en función del tramo en falta) y en el caso de tres PF, el 66% de la carga se consigue restaurar en 1.84 minutos, 1.69 minutos o 1.16 minutos (en función del tramo en falta).

En este tipo de líneas, el efecto de los retardos de la red de comunicaciones no implica que la restauración del primer porcentaje de la carga supere los 3 minutos, por lo que aunque los retardos de comunicaciones influyeran en el TIEPI, su efecto no sería significativo. De hecho, aplicando la

metodología de cálculo descrita en el apartado 5.3.5.1, el resultado es el mismo valor de TIEPI que teniendo en cuenta los retardos de comunicaciones de 40 ms que se consideraron inicialmente.

Por otro lado, el efecto de la pérdida de comunicaciones sí puede tener una influencia mayor, ya que si este fallo se produjera antes de que se haya determinado el tramo en falta, no se podría restaurar ninguna parte de la falta sin que antes se haya tenido que desplazar la brigada y haya conseguido ubicar la falta. La disponibilidad de los equipos es alta, o lo que es lo mismo, la probabilidad de que esto ocurra es baja, pero tiene influencia en el TIEPI, como se puede observar en la Tabla 5.7. En la columna denominada “*TIEPI [min]*” se presentan los valores del TIEPI obtenidos antes de introducir el efecto de las comunicaciones reales y en la columna denominada “*TIEPI [min] (disponibilidad)*” se presentan los valores del TIEPI obtenidos tras aplicar la disponibilidad de las comunicaciones.

Tabla 5.7. TIEPI obtenido para el escenario 1, teniendo en cuenta la disponibilidad de las comunicaciones calculada.

Escenarios	TIEPI [min]	TIEPI [min] (disponibilidad)	Incremento
Actual: Implementación al 10%	58.2	59.1	1,55%

5.3.5.3 Efecto de la red de comunicaciones sobre el escenario 2 con DPF

En el escenario 2 con DPF, que no cuenta con ningún tipo de TC en sus CTs, se pueden presentar retardos en el envío de la orden de actualizar el estado de los DPF, en la recepción del estado de los mismos, en el envío de las órdenes de apertura y cierre de cabeceras y PF, y en las señales de confirmación de las órdenes.

Al incluir los retardos variables originados en las comunicaciones en el cálculo del TIEPI, su valor aumenta, pero, desde un punto de vista relativo, el incremento resulta despreciable, entre el 3% y el 4%. Los valores, para los tres niveles de implementación de la tecnología DPF, se exponen en la Tabla 5.8. En la columna denominada “*TIEPI [min]*” se presentan los valores del TIEPI obtenidos antes de introducir el efecto de las comunicaciones reales y en la columna denominada “*TIEPI [min] (retardo)*” se presentan los valores del TIEPI obtenidos tras incluir el efecto de la latencia variable de las comunicaciones.

Tabla 5.8. TIEPI obtenido para cada nivel de automatización del escenario 2, teniendo en cuenta los retardos de las comunicaciones calculados.

Escenarios	TIEPI [min]	TIEPI [min] (retardo)	Incremento
DPF: Implementación al 10%	104.8	108.1	3,15%
DPF: Implementación al 15%	104.1	107.5	3,27%
DPF: Implementación al 20%	100.6	105.0	4,37%

Por otro lado el fallo total de comunicaciones, sólo puede presentarse en el envío de la orden de actualizar el estado de los DPF y en la recepción del estado de los mismos. El fallo de estas comunicaciones conllevaría la aplicación del procedimiento de actuación para restablecer el servicio correspondiente al Escenario Básico, con el consiguiente aumento de tiempos de restauración. Considerando la alta disponibilidad de cada uno de los elementos de DPF de las distintas líneas no hay gran diferencia en los valores del TIEPI, entre el 3% y el 4%. Estos valores, para los tres niveles de implementación de la tecnología DPF, se exponen en la Tabla 5.9. En la columna denominada “TIEPI [min]” se presentan los valores del TIEPI obtenidos antes de introducir el efecto de las comunicaciones reales y en la columna denominada “TIEPI [min] (disponibilidad)” se presentan los valores del TIEPI obtenidos tras aplicar la disponibilidad de las comunicaciones.

Tabla 5.9. TIEPI obtenido para cada nivel de automatización del escenario 2, teniendo en cuenta la disponibilidad de las comunicaciones calculada.

Escenarios	TIEPI [min]	TIEPI [min] (disponibilidad)	Incremento
DPF: Implementación al 10%	104.8	108.2	3,24%
DPF: Implementación al 15%	104.1	107.5	3,27%
DPF: Implementación al 20%	100.6	105.0	4,37%

5.3.5.4 Efecto de la red de comunicaciones sobre el escenario 3

En este escenario además de TC tanto en las cabeceras de las líneas como en aquellos CTs que actúan como PF, también se dispone de la función de DPF. Por ello, las primeras maniobras ejecutadas desde el CC para determinar dónde se encuentra la falta se reducen a una petición del estado de los DPF, a la adquisición de estos datos, pudiendo ordenar el CC, tras ello, restaurar todos aquellos tramos sin falta y, por tanto, permitiendo enviar a la brigada directamente al tramo en falta en mucho menos tiempo.

5.3.5.4.1 Línea con un punto frontera en su extremo

Estas líneas cuentan únicamente con el TC en el interruptor de cabecera y en el PF de su extremo, por lo que no tienen implantada la función DPF en puntos intermedios de la línea, siendo el efecto de las comunicaciones el mismo que el del escenario 1. Al no ser necesario considerar el fallo de

comunicaciones de cabecera, ni de los PF en los extremos de la línea, en este escenario, no aplica el análisis de la disponibilidad de las comunicaciones.

5.3.5.4.2 Línea con dos o más puntos frontera telecontrolados

En este supuesto pueden apreciarse cambios en el TIEPI con respecto al escenario 1 y además las comunicaciones juegan un papel más relevante.

Con respecto a las latencias, hay que considerar que el número de comunicaciones aumenta significativamente, más cuanto mayor es el número de dispositivos que reciben y envían señales, por lo que los retardos pueden llegar a ser significativos.

Los valores de TIEPI, para los tres niveles de implementación de la tecnología TC+DPF, se exponen en la Tabla 5.10. En la columna denominada “*TIEPI [min]*” se presentan los valores del TIEPI obtenidos antes de introducir el efecto de las comunicaciones reales y en la columna denominada “*TIEPI [min] (retardo)*” se presentan valores del TIEPI obtenidos tras aplicar los retardos variables de las comunicaciones.

Tabla 5.10. TIEPI obtenido para cada nivel de automatización del escenario 3, teniendo en cuenta los retardos de las comunicaciones calculados.

Escenarios	TIEPI [min]	TIEPI [min] (retardo)	Incremento
TC+DPF: Implementación al 10%	36.5	43.2	18,36%
TC+DPF: Implementación al 15%	28.3	32.9	16,25%
TC+DPF: Implementación al 20%	24.9	27.9	12,05%

Desde el punto de vista del fallo de comunicaciones, hay que tener en cuenta que un fallo en cualquiera de las comunicaciones obliga a iniciar el procedimiento de actuación de la brigada. Aunque no supondrá el mismo efecto si la pérdida de comunicaciones ocurre antes, durante o después de la localización de la falta. En función de la comunicación que falla, se debe enviar a la brigada a localizar la falta en la línea entera, en un tramo más o menos grande, o directamente a reparar el tramo en falta habiendo restaurado el resto de la carga de la línea. Por lo tanto, aunque un mayor número de equipos supone mayor probabilidad de fallo, también supone mayores facilidades para la actuación de la brigada. Estos efectos se exponen en la Tabla 5.11. En la columna denominada “*TIEPI [min]*” se presentan los valores del TIEPI obtenidos antes de introducir el efecto de las comunicaciones reales y en la columna denominada “*TIEPI [min] (disponibilidad)*” se presentan los valores del TIEPI obtenidos tras aplicar la disponibilidad de las comunicaciones calculada.

Tabla 5.11. TIEPI obtenido para cada nivel de automatización del escenario 3, teniendo en cuenta la disponibilidad de las comunicaciones calculada.

Escenarios	TIEPI [min]	TIEPI [min] (disponibilidad)	Incremento
TC+DPF: Implementación al 10%	36.5	44.4	21,64%
TC+DPF: Implementación al 15%	28.3	34.1	20,49%
TC+DPF: Implementación al 20%	24.9	29.3	17,67%

5.3.5.5 Efecto de la red de comunicaciones sobre el escenario 4, Self-Healing

En este escenario se procede exactamente igual que en el escenario anterior en cuanto a las órdenes de localización y restauración de la falta. La diferencia en este escenario se encuentra en que en vez de ser el CC quien recibe la información y actúa en consecuencia, es un algoritmo de autocatrización el que lo hace. Por ello, el efecto tanto de los retardos de comunicaciones, como de la disponibilidad de estas será de la misma magnitud que en el escenario anterior.

5.3.5.5.1 Línea con un punto frontera en su extremo

Como en el escenario anterior, estas líneas, que disponen únicamente de automatización en el interruptor de cabecera y en el PF de su extremo, no se benefician de la implantación del algoritmo de autocatrización, por lo que el efecto de las comunicaciones es el mismo que en los escenarios anteriores. El efecto de los retardos de comunicaciones es despreciable, y al no ser necesario considerar el fallo de comunicaciones de cabecera, ni de los PF en los extremos de la línea, no aplica el análisis de la disponibilidad de las comunicaciones.

5.3.5.5.2 Línea con DOS o más PUNTOS frontera telecontrolados

En este supuesto pueden apreciarse cambios significativos en el TIEPI con respecto al escenario 1 y al escenario 3, y al igual que en el escenario anterior, las comunicaciones juegan un papel muy relevante.

Con respecto a las latencias, hay que considerar que el número de comunicaciones aumenta significativamente, más cuanto mayor es el número de dispositivos que reciben y envían señales, por lo que los retardos pueden llegar a ser importantes.

Los valores de TIEPI, para los tres niveles de implementación de la tecnología Self-healing, se exponen en la Tabla 5.12. En la columna denominada “TIEPI [min]” se presentan los valores del TIEPI obtenidos antes de introducir el efecto de las comunicaciones reales y en la columna denominada “TIEPI [min] (retardo)” se presentan los valores del TIEPI obtenidos tras aplicar los retardos de las comunicaciones calculados.

Tabla 5.12. TIEPI obtenido para cada nivel de automatización del escenario 4, teniendo en cuenta los retardos de las comunicaciones calculados.

Escenarios	TIEPI [min]	TIEPI [min] (retardo)	Incremento
Self-healing: Implementación al 10%	32.5	38.4	18,15%
Self-healing: Implementación al 15%	24.9	28.9	16,06%
Self-healing: Implementación al 20%	22.1	24.8	12,22%

Desde el punto de vista del fallo de comunicaciones, hay que tener en cuenta que un fallo en cualquiera de las comunicaciones obliga a iniciar el procedimiento de actuación de la brigada. Aunque no supondrá el mismo efecto si la pérdida de comunicaciones ocurre antes, durante o después de la localización de la falta. En función de la comunicación que falla, se debe enviar a la brigada a localizar la falta en la línea entera, en un tramo más o menos grande, o directamente a reparar el tramo en falta habiendo restaurado el resto de la carga de la línea. Por lo tanto, aunque un mayor número de equipos supone mayor probabilidad de fallo, también supone mayores facilidades para la actuación de la brigada. Estos efectos se exponen en la Tabla 5.13. En la columna denominada “TIEPI [min]” se presentan los valores del TIEPI obtenidos antes de introducir el efecto de las comunicaciones reales y en la columna denominada “TIEPI [min] (disponibilidad)” se presentan los valores del TIEPI obtenidos tras aplicar la disponibilidad de las comunicaciones calculada.

Tabla 5.13. TIEPI obtenido para cada nivel de automatización del escenario 4, teniendo en cuenta la disponibilidad de las comunicaciones calculada.

Escenarios	TIEPI [min]	TIEPI [min] (disponibilidad)	Incremento
Self-healing: Implementación al 10%	32.5	39.7	22,15%
Self-healing: Implementación al 15%	24.9	30.2	21,29%
Self-healing: Implementación al 20%	22.1	26.2	18,55%

5.4 Conclusiones

En este capítulo se ha analizado la influencia de las comunicaciones en la calidad de servicio que proporciona el sistema de distribución de la red eléctrica y su cuantificación en los indicadores al uso. En el sector es habitual realizar los análisis de estos indicadores teniendo en cuenta que los retardos en las comunicaciones son constantes y que la red de comunicaciones tiene una disponibilidad absoluta.

Se han estudiado diferentes escenarios en la automatización de la red. En estos escenarios las comunicaciones son un factor clave para disminuir el tiempo de detección ante un fallo. No

obstante, cuando se tienen en cuenta la latencia variable y la disponibilidad real de las comunicaciones, los resultados obtenidos muestran una degradación de los indicadores de calidad.

Se ha analizado la diferencia obtenida al aplicar la propuesta de esta Tesis, a partir de valores reales obtenidos de una red de distribución parcialmente automatizada. De esta forma, este estudio aporta una mejora en el modelo de cálculo de los indicadores, aproximándolo más a la realidad.

En la Tabla 5.14 se puede observar una comparativa al tener en cuenta la influencia de la disponibilidad y de los retardos en la red de comunicaciones. Como se puede apreciar, la aportación a los índices al tener en cuenta la disponibilidad o la latencia es similar. Esto justifica la necesidad de tener en cuenta la latencia, además de la disponibilidad del canal, mejorando la aproximación que se propone en [Kounev, V., et al. 2015].

Tabla 5.14.- Comparación de todos los TIEPI obtenidos

Escenarios	TIEPI [min]	TIEPI [min] (retardo)	Δ (%)	TIEPI [min] (Disponibilidad)	Δ (%)
1: Actual: Implementación al 10%	58.2			59.1	1,55%
2: DPF: Implementación al 10%	104.8	108.1	3,15%	108.2	3,24%
2: DPF: Implementación al 15%	104.1	107.5	3,27%	107.5	3,27%
2: DPF: Implementación al 20%	100.6	105.0	4,37%	105.0	4,37%
3: TC+DPF: Implementación al 10%	36.5	43.2	18,36%	44.4	21,64%
3: TC+DPF: Implementación al 15%	28.3	32.9	16,25%	34.1	20,49%
3: TC+DPF: Implementación al 20%	24.9	27.9	12,05%	29.3	17,67%
4: Self-healing: Implementación al 10%	32.5	38.4	18,15%	39.7	22,15%
4: Self-healing: Implementación al 15%	24.9	28.9	16,06%	30.2	21,29%
4: Self-healing: Implementación al 20%	22.1	24.8	12,22%	26.2	18,55%

Para contrastar esta información es necesario esperar a la publicación del CEER [CEER Benchmarking Report 5.2 on the Continuity of Electricity Supply], con información sobre 2014-2015. No es posible contrastar con datos anteriores a 2014, ya que no se dispone de históricos de información sobre disponibilidad y latencia de los canales de comunicación.

La representación gráfica de la Tabla 5.14 se muestra en la Figura 5.15. En esta figura se puede ver por cada porcentaje de automatización la comparativa entre tener DPF, TC+DPF y Self Healing, y por encima sombreado el efecto de las comunicaciones, en el mismo color pero más oscuro.

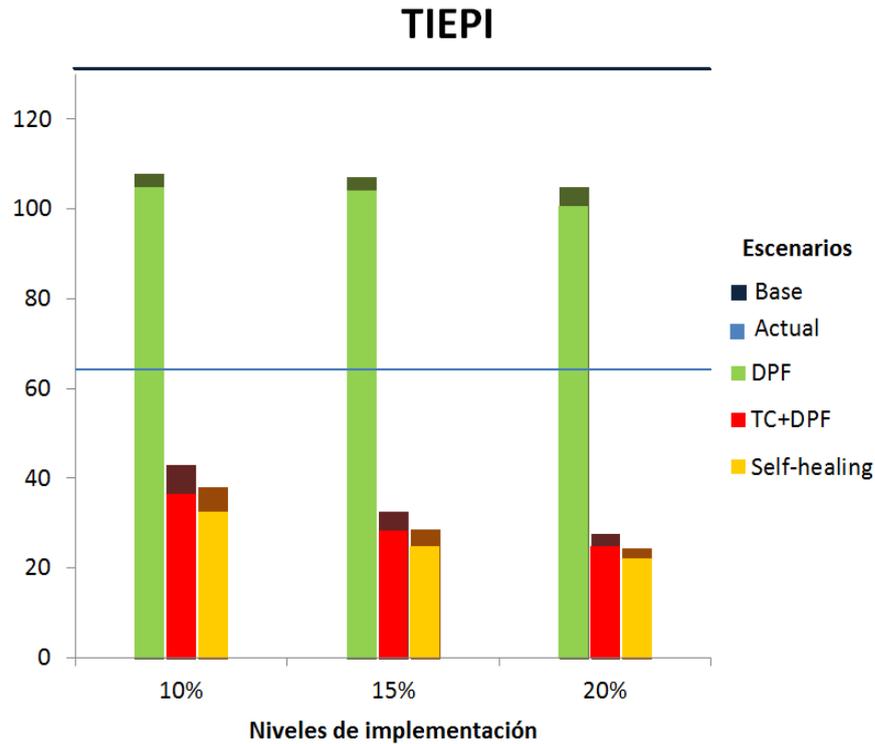


Figura 5.15. Representación gráfica del incremento de los resultados al incluir parámetros de las comunicaciones.

Según los valores de TIEPI obtenidos, se puede concluir que, en todos los casos, los retardos y fallos en el sistema de comunicaciones implican un mayor valor de TIEPI y, aunque este no es realmente significativo, sí que es importante señalar que su efecto es mayor cuanto menor es la implementación de tecnologías de detección de faltas y menor es la implementación del sistema de comunicaciones. Es decir, los efectos negativos de los retardos y la disponibilidad de las comunicaciones sobre el TIEPI disminuyen conforme aumentan estas.

Capítulo 6.

Influencia de las comunicaciones en redes

WACS: el caso del STATCOM

6.1 Introducción

6.1.1 Concepto de WAMS/WACS

En los sistemas WAMS las medidas se realizan en un punto alejado del lugar en el que se ubica el controlador y se envían, mediante diversos medios de comunicación, al despacho de control donde se ejecuta una aplicación SCADA. Los WACS son sistemas en los que la planta y el lazo de control se encuentra geográficamente distribuidos, con distancias entre ellos tales que se hace indispensable el uso de sistemas de comunicación para unirlos. En ambos tipos de sistemas, las comunicaciones juegan un papel importante, ya que pueden introducir retardos o pérdidas de comunicación completas, cuyas consecuencias pueden llegar a la pérdida de estabilidad del controlador.

En las redes inteligentes, ambos tipos de sistemas (WAMS y WACS) están adquiriendo cada vez más importancia, ya que, por su extensión, las redes eléctricas requieren de sistemas de medida y control distribuidos, para incrementar la calidad y cantidad de servicios y su disponibilidad.

El problema que se plantea es que, aunque existen soluciones fiables basadas en comunicaciones determinísticas, como etherCAT, o redes dedicadas para tiempo real [Wu, J., Chen, T. 2007] que pueden dar soporte al control distribuido o remoto, este tipo de redes no siempre están disponibles, y en caso de estarlo, su coste las convierte en inviables para un despliegue masivo, por lo que las tecnologías que se usan son aquellas de bajo coste, de uso compartido y, a ser posible, ya desplegadas (GPRS, 3G, ADSL, etc.).

En esta línea, este capítulo aborda el estudio de la influencia de las comunicaciones no determinísticas en un caso de uso paradigmático de las redes WACS, como es el soporte de red eléctrica utilizando STATCOMs para, mediante la inyección de potencia reactiva, variar la tensión en el punto de acoplamiento común. Con el apoyo del entorno de pruebas descrito en el Capítulo 3, se han realizado una serie de experimentos que permiten evaluar los requisitos que deben cumplir

las redes de comunicaciones para dar soporte de red mediante inyección de potencia reactiva, y el nivel de tolerancia a fallos necesario para mantener el sistema en funcionamiento.

En el Apéndice A se encuentra la descripción de un STATCOM. Por otro lado, los lazos de control empleados para las pruebas de este capítulo han sido explicados en el apartado 3.3.

6.2 Análisis de la influencia de las comunicaciones (latencia y disponibilidad) en los lazos de control para soporte de red

6.2.1 Problemática asociada a las comunicaciones en WAMS (NCS)

El uso de comunicaciones en lazos de control, y por extensión en sistemas que proporcionen soporte de red eléctrica, mediante sistemas bien de medida o bien de control, introduce una serie de problemas, que de forma general se podrían enunciar como:

1. Retardo en los paquetes: Al utilizar medios de comunicación compartidos para el intercambio de información entre distintos elementos, se introducen retardos en la entrega de los paquetes. Estos retardos pueden ser variables, constantes o aleatorios, y pueden degradar el rendimiento de los sistemas de control, si han sido diseñados sin tener en cuenta estos retardos.
2. Pérdida de los paquetes: Por motivos intrínsecos a los canales de comunicación, pueden producirse errores irrecuperables en la transmisión de las señales, que se traducen en la pérdida del paquete transmitido. Y aunque la mayoría de los protocolos contemplan métodos para la recuperación mediante retransmisión de los paquetes, esta se produce tras un periodo de tiempo que es demasiado elevado, en la mayoría de los casos, para asegurar un funcionamiento correcto de los lazos de control.
3. Desorden en los paquetes: En los canales multimodales, es posible que los paquetes lleguen de un punto a otro desordenados, dados los diferentes caminos que puede tomar un paquete para llegar de un punto a otro. A efectos de los sistemas de control, y por simplicidad, se tomarán estos paquetes como paquetes perdidos, ya que para aplicaciones de control, los paquetes no superar el tamaño necesario para su segmentación. Por lo tanto, el desorden solo puede venir provocado porque un paquete tenga mayor retardo que el paquete del siguiente periodo.

Estos problemas pueden producir efectos en el lazo de control que afecten a la respuesta transitoria, e incluso a la estabilidad, por lo que se debe acotar el tiempo máximo entre paquetes (expresado en periodos completos) soportados por el sistema bajo control.

La manera en la que afectan este tiempo máximo dependerá de dónde se produzcan las incidencias.

En el caso de los sistemas de medida en red, WAMS, lo único que se transmite mediante un canal de comunicaciones son medidas tomadas en puntos geográficamente distribuidos. En la Figura 6.1 se muestra un esquema simplificado de un sistema WAMS con un solo punto de medida. En este caso, el canal de comunicaciones se utiliza en la realimentación.

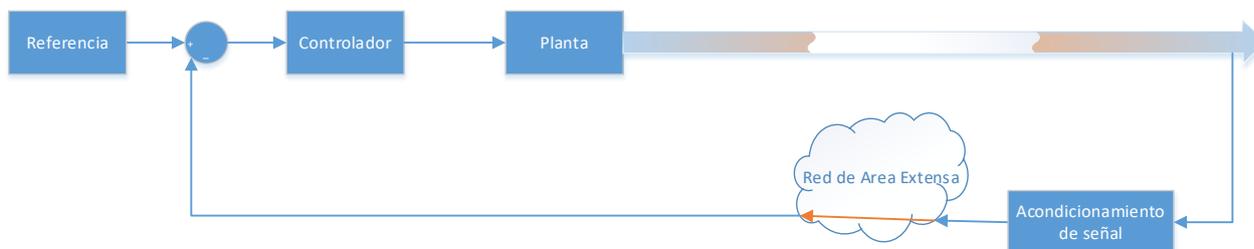


Figura 6.1. Esquema de medida con comunicaciones.

Este podría ser el caso de un parque eólico, en el que la planta es un aerogenerador, y se realiza un control teniendo en cuenta la tensión en el punto de acoplamiento común, por lo que la medida se realiza a una distancia que puede llegar a ser de varios kilómetros.

Sobre un esquema típico de control por red (WACS) como el mostrado en la Figura 6.2, los canales de comunicación se utilizan en dos ramas del lazo de control, a saber, en la recepción de la señal de actuación en la planta y en el envío de las medidas de salida para realimentar al sistema de control.

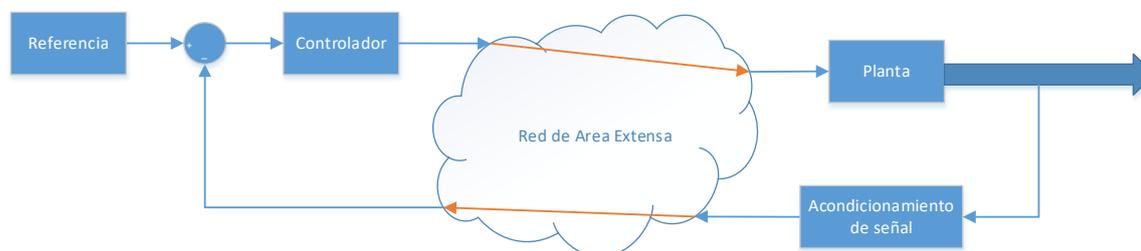


Figura 6.2 Esquema de control típico con comunicaciones

En este caso (Figura 6.2) se aprecia un sistema de control típico con una planta, un controlador y la realimentación. La planta se encuentra geográficamente en el lugar en el que se produce la actuación. El resto de los elementos se encuentran en un punto remoto. Este esquema es típico en el uso de diversos actuadores repartidos en un área geográfica extensa, como puede ser, siguiendo con el ejemplo anterior, el control secundario de todos los aerogeneradores de un parque eólico. También podría encontrarse este esquema en el control de un segmento de red eléctrica con generación distribuida para aportar soporte de red eléctrica en términos de estabilidad de la tensión y frecuencia.

En este esquema, los problemas se pueden encontrar en la transmisión de la señal de realimentación, en la transmisión de la señal de actuación desde el controlador a la planta, o en ambos.

En el caso de perder la señal de realimentación, la señal de error que llega al controlador permanecerá constante, y, siendo el caso de un controlador con un integrador (PID), la señal de salida del controlador crecerá indefinidamente, lo que provocará que el actuador se sature.

Mediante el uso de un *antiwindup*, la salida del controlador se puede limitar en el punto de saturación para evitar que crezca indefinidamente. De este modo, la planta producirá una salida con un sobreimpulso mayor, pero sin llegar a la inestabilidad. Cuando las comunicaciones se recuperen, la salida del integrador disminuirá ya que la señal de error será completamente opuesta a la que hacía que se saturara.

El caso en el que se pierdan las comunicaciones en el canal entre el controlador y la planta, la situación es similar a la anterior, pero en este caso, el crecimiento indefinido de la señal de salida del controlador no se propagará a la planta, por lo que la salida del sistema no tendrá sobreimpulso asociado durante el corte de comunicación. Por contra, el integrador se encontrará saturado, por lo que cuando se restauren las comunicaciones se provocará un sobreimpulso en la salida de la planta.

Otro aspecto a tener en cuenta, en caso de pérdida temporal de las comunicaciones, radica en cómo gestionar las tramas de actuación o de medida retardadas, si finalmente se reciben tras la recuperación de la comunicación. Se pueden plantear varias alternativas, básicamente reducidas a dos: desecharlas o tenerlas en cuenta en las actuaciones posteriores del controlador.

La forma de abordar esta problemática en trabajos previos es variada. En [Azimi-Sadjadi, B. 2003] se asume que un paquete con un retardo excesivo es descartado, y plantea el uso de un estimador actualizado con la información recibida desde el sensor. Con esta propuesta, se presenta las condiciones suficientes y necesarias para que el sistema sea estable en valores medios cuadráticos.

En [Hu, S., Yan, W. 2007], se propone un método basado en calcular la máxima cantidad de paquetes perdidos admisible antes de que el sistema se vuelva inestable.

En [Liu, G. P. 2010] se proponen diferentes formas de actuar ante la pérdida de datos. El primer método propuesto consiste en que, en caso de pérdida, la trama perdida se considera de valor 0 [Zhang, L., Hristu-Varsakelis, D. 2006]. El segundo método, mantiene el valor anterior [Halevi, Y., Ray, A. 1988], [Zhang, L., Hristu-Varsakelis, D. 2006]. En el tercer caso, se propone utilizar un predictor en caso de pérdida de datos [Hu, S., Yan, W. 2007], [Liu, G. P., et al. 2008].

Todos estos métodos tienen ventajas y desventajas: el primero es simple, pero los transitorios producidos no son aceptables en según qué sistema se esté controlando, lo que puede llevar a la desconexión de los equipos controlados por actuación de los sistemas de protección.

El método 2 proporciona transitorios adecuados en la señal de control, pero al acotar la actuación, la respuesta del sistema es lenta y su tiempo de establecimiento se hace excesivo, empeorando las prestaciones del controlador. El tercer método, mejora tanto el transitorio como el tiempo de establecimiento, pero a costa de exigir mejores prestaciones en las comunicaciones, que en muchos casos no se pueden cumplir. Además, el empleo de estimadores de estado para compensar los efectos de la latencia de las comunicaciones, no es operativo si aparecen perturbaciones en el control.

6.2.2 Influencia de las comunicaciones en la estabilidad

El ancho de banda disponible, la latencia en el envío de paquetes, el retardo de las comunicaciones y la posible pérdida de paquetes de datos, todos ellos variables pseudo-aleatorias, afectan a la estabilidad de los sistemas de control en red, especialmente en el caso de WACS.

Además, debe tenerse presente la técnica de empaquetamiento empleada en el envío de las señales de control y de realimentación. Pueden emplearse comunicaciones multipaquete o de paquete único. En el control de un sistema distribuido, las tramas proceden de diferentes puntos y hay que agruparlas para poder tener toda la información. Por otro lado, una red de datos limitada puede segmentar un paquete. Esto hace que el número de paquetes sea mayor y por lo tanto se amplía la posibilidad de pérdida de paquetes. Es importante entender cómo influyen las diferentes políticas de transmisión en la estabilidad del sistema.

La mayoría de los trabajos publicados se centran en una única política de transmisión de paquetes en las que en cualquier instante de tiempo, todas las salidas de la planta se transmiten a través de un único paquete de datos. Por ejemplo, en [Zhang, W., et al. 2001] se comprobó que una velocidad de muestreo suficientemente rápida puede garantizar la estabilidad en tiempo continuo de un NCS, donde el canal de comunicación se trató como un interruptor que se cierra a una cierta tasa correspondiente a una probabilidad de pérdida de paquetes. Un análisis de la estabilidad de un modelo basado en NCS se puede encontrar en [Montestruque, L. A., Antsaklis, P. 2004], donde se utilizó un modelo adicional para estimar el estado de la planta entre los tiempos de transmisión y la generación de la señal de control. En el caso de tiempo discreto, cuando se conoce la probabilidad de pérdida de un canal de comunicación, el proceso de pérdida de paquetes puede ser modelado como un proceso de Bernoulli o una cadena de Markov. Como tal, un NCS se puede ver como un sistema de salto, cuya estabilidad media cuadrática ha sido bien estudiada.

Los resultados de estabilidad en [Ji, Y. 1991] y [Costa, O. L., Fragoso, M. D. 1993] han sido utilizados para el diseño de controladores como se puede ver en [Seiler, P., Sengupta, R. 2005] y [Azimi-Sadjadi, B. 2003]. En [Hu, S., Yan, W. 2007], los autores analizaron la estabilidad de un NCS introduciendo el concepto de margen de pérdida de paquetes, que mide la máxima pérdida de

paquetes que los NCS pueden tolerar antes de convertirse en inestables. Hay algunos trabajos que estudian los efectos de la eliminación de paquetes sobre la estabilidad de los NCS bajo las políticas de transmisión en paquetes múltiples.

En [Zhang, W., et al. 2001], los autores dieron una condición suficiente para la estabilidad de las redes programadas donde los dos paquetes se envían alternativamente al controlador y cada uno de los paquetes transporta información parcial sobre el estado de la planta. En [Azimi-Sadjadi, B. 2003], se planteó un problema de control óptimo para el control en red bajo una política general de transmisión de paquetes múltiples.

6.3 Propuesta de soluciones

6.3.1 Metodología para la comparación de las soluciones propuestas

Para la comparación y evaluación de las prestaciones de las distintas soluciones aportadas en esta tesis, se propone el empleo de los índices basados en la integración del error utilizados habitualmente para el diseño y ajuste de controladores [Ho, W. K., et al. 1995].

Esta integración se puede hacer utilizando el valor absoluto o el cuadrático del error, y multiplicando o no por el tiempo. Con estas variantes se definen índices IAE, ISE, ITAE, e ITSE:

IAE: Integral del error absoluto. Definido como:

$$IAE = \int |e| dt \quad (6.1)$$

Este índice proporciona información sobre el error de seguimiento del controlador, ponderando por igual las diferencias en todo el periodo de integración.

ISE: Integral del error cuadrático. Definido como:

$$ISE = \int |e|^2 dt \quad (6.2)$$

Al elevar al cuadrado el error, penaliza más los errores elevados, minimizando el efecto de las pequeñas oscilaciones, en todo el periodo de integración.

ITAE: Integral del error absoluto multiplicado por el tiempo. Definido como:

$$ITAE = \int |e| t dt \quad (6.3)$$

Este índice proporciona información sobre el error de seguimiento del controlador, teniendo en cuenta el tiempo de establecimiento y penalizando las oscilaciones permanentes.

ITSE: Integral del error cuadrático multiplicado por el tiempo. Definido como:

$$ITSE = \int |e^2| t dt \quad (6.4)$$

Al elevar al cuadrado el error, penaliza más los errores elevados, minimizando el efecto de las pequeñas oscilaciones pero teniendo en cuenta el tiempo de establecimiento y penalizando las oscilaciones permanentes.

6.3.2 Modelado del efecto de las comunicaciones

Para los efectos del lazo de control, y a la vista de los resultados obtenidos en el capítulo 4, se puede considerar que las comunicaciones introducen un retardo variable, cuantificable en número de periodos de muestreo usado en el control. Dado que la relación entre el tiempo de retardo de las comunicaciones y el periodo de muestreo no tiene porqué ser un número entero, se propone tomar como retardo el suelo de la división, incluyendo en el mismo, la suma del retardo debido a las comunicaciones y el tiempo de procesamiento.

De este modo, se simplifican los cálculos, y el efecto de esta división queda reducido a tener en cuenta una parte constante a sumar al tiempo de las comunicaciones, que será en todo caso, no determinístico. Así, en el peor de los casos se tomará un retardo más de lo debido, pero nunca se aplicará una muestra en un instante distinto al punto de muestreo.

En el esquema de control típico de aplicaciones WACS, la secuencia que se ejecuta en cada periodo de muestreo comienza por la aplicación de la señal de actuación calculada en el periodo anterior, se muestrean las señales necesarias y se ejecuta el algoritmo de control que proporcionará la señal de actuación que deberá aplicarse en el siguiente periodo de muestreo. En la Figura 6.3 se muestra la representación de un caso a modo de ilustración, en el que se puede apreciar cómo un retardo en las comunicaciones puede hacer que la señal de control no llegue a tiempo para ser aplicada en el instante correspondiente. En rojo se muestran los instantes de muestreo y aplicación de la muestra calculada en $k-1$, en azul se representa el tiempo que tarda en llegar la medida desde la planta hasta el controlador. En verde el tiempo que tarda el controlador en calcular la señal a aplicar a la planta en el siguiente periodo de muestreo, que se considera constante. Y en magenta, el tiempo que tarda en llegar la señal desde el controlador hasta la planta.

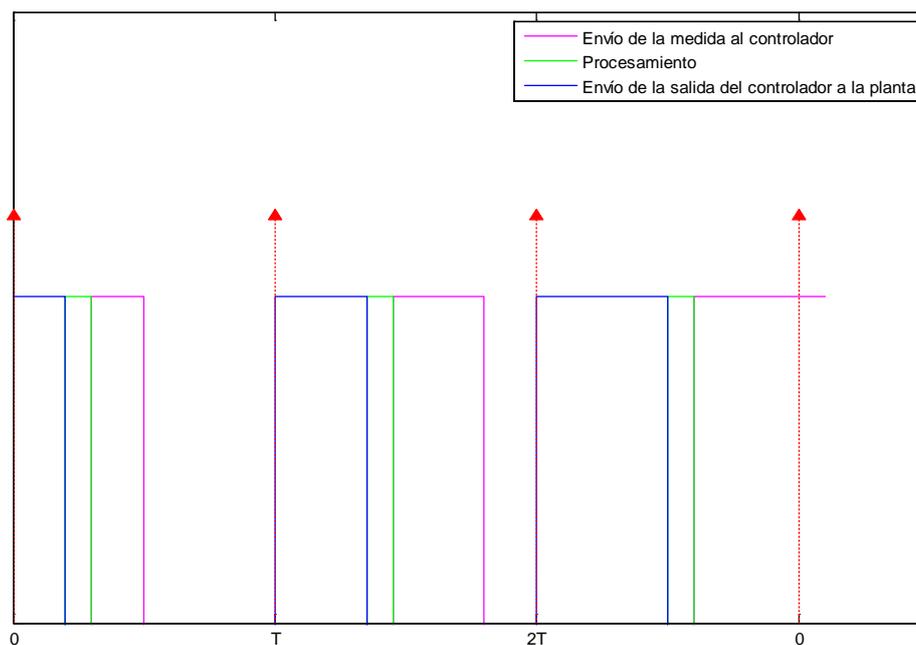


Figura 6.3 Representación de los tiempos asociados al control.

En el primer periodo, la carga de la red hace que los retardos ocupen un 40% del total. En el segundo, la carga de la red es mucho mayor debido a un posible evento externo, ajeno a la red, lo que provoca que el retardo ocupe un 70% del periodo. En estos dos casos, el sistema seguiría recibiendo las muestras a tiempo. Pero en el tercero, la ocupación de la red es mayor aún, y se puede apreciar como la señal llega a tiempo hasta la planta, por lo que se perdería ese periodo de control, y la señal bien se aplicaría en el siguiente periodo, o bien se descartaría en el caso de que llegara la muestra correspondiente al instante $k+1$.

6.3.3 Detección de fallo en las comunicaciones

Por las razones ya explicadas con anterioridad, es importante, en el caso de las redes WACS y WAMS, tener bien caracterizada la latencia introducida por las redes de comunicación. La sincronización de los relojes en los sistemas remotos implicados en un lazo de control, puede ayudar a la detección de las pérdidas de comunicaciones, permitiendo ajustar los lazos de control en consecuencia. La precisión de esta sincronización y la deriva entre ambas será determinante en la estabilidad del sistema de control.

Como alternativa, se propone en esta Tesis un método asíncrono que permite prescindir de la sincronización de relojes en redes WACS. La propuesta consiste en usar como referencia de tiempos al controlador primario, incluyendo una marca de tiempo asociada a las muestras tomadas para la realimentación, para conseguir la sincronización. Por otro lado, se propone que la señal de actuación se acompañe de una marca indicativa del instante de tiempo en el que se debe aplicar. Dentro del

sistema de detección de pérdida de comunicaciones propuesto, esta marca ayudará a determinar si hubo pérdida de comunicaciones o por el contrario es la muestra que corresponde aplicar.

En resumen, en cada paquete de información se incluye una marca de tiempo referenciada al tiempo interno del controlador primario, lo que posibilita la detección y cuantificación de las pérdidas en el canal, ya sean debidas a un retardo excesivo, a la pérdida del paquete o a la pérdida total de comunicación.

La detección de la pérdida se puede llevar a cabo tanto en los puntos de entrada/salida del lazo de control primario como en los del secundario, pero para poder utilizar esta técnica con cualquier sistema de control que se introduzca en el lazo de control primario, sea propietario o comercial, se propone ubicar el algoritmo de detección en el lazo de control secundario. Para esto es necesario que el controlador primario envíe cada dato de realimentación incluyendo una marca de tiempo. De este modo, las señales de actuación irán referenciadas con esa referencia temporal.

Las tramas desde el controlador primario hasta el controlador secundario deben poder contener los siguientes campos:

1. Medida: Valor medio de la medida a lo largo del periodo anterior
2. Marca de tiempo de la medida: Instante en el que se tomó la medida, referenciado al reloj del controlador primario.
3. Última señal de actuación: Valor de la última señal de actuación recibida.
4. Marca de tiempo de la última señal de actuación: Instante de aplicación del último valor de la señal de actuación válida.

La medida se calcula como la media móvil del valor de las variables (en este caso de uso se utiliza la potencia reactiva) durante el periodo anterior al instante de muestreo.

El controlador primario almacena el instante en el que recibe la señal de actuación y el instante en el que debe actualizar la señal de control, que toma como referencia. Este tiempo siempre estará referenciado al del controlador primario.

El controlador secundario dispondrá de la marca de tiempo de la medida recibida y la marca de tiempo de la última señal de actuación aplicada. Atendiendo a la diferencia entre estas dos marcas de tiempo, se puede establecer la marca de tiempo en la que se deberá aplicar la siguiente señal de actuación, que se calcula con la medida recibida.

Las tramas desde el controlador secundario al controlador primario deben contener:

1. Señal de actuación: Valor a aplicar en la planta como referencia.

2. Instante de aplicación: valor referenciado al tiempo del controlador primario en el que se debe aplicar la señal enviada.

Para detectar esta pérdida, puesto que todos los paquetes llevan una marca de tiempo, basta con comprobar si la marca actual se encuentra dentro del rango admisible, calculado a partir de la última muestra buena recibida. Cada muestra también incluye la última marca correcta del equipo en el otro extremo, tal y como se muestra en la Figura 6.4. Finalmente, las referencias del control primario correspondientes a la salida del controlador secundario, incluyen el incremento de tiempo sobre el instante de la medida de la potencia reactiva, indicando así el instante de aplicación.

El comportamiento a seguir ante las pérdidas en el canal de realimentación o en el de actuación, es diferente. En el caso de una pérdida o retraso en el canal con la señal de realimentación, el controlador secundario deberá utilizar, pasado un tiempo de espera, la última medida recibida.

En el caso de una pérdida en el canal de actuación, el controlador secundario mantendrá actualizada su información, pero el controlador primario no recibirá la actuación correspondiente, por lo que mantendrá la última muestra recibida.

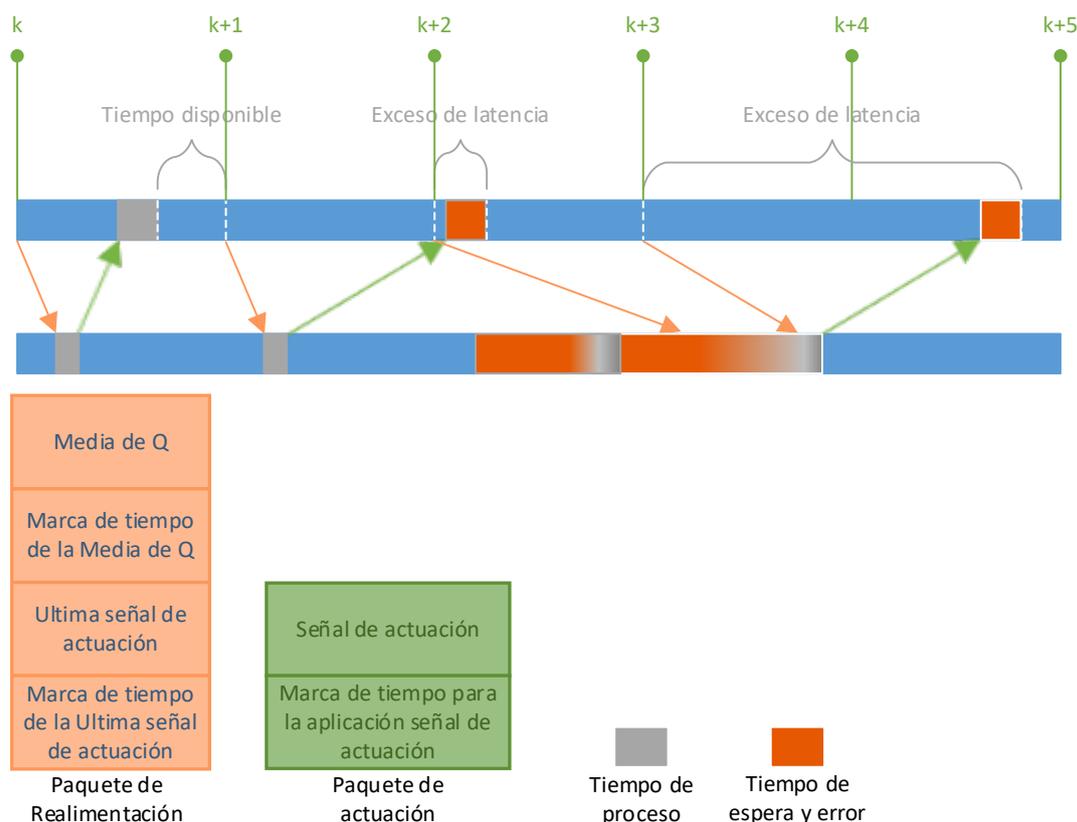


Figura 6.4 Descripción de las marcas de tiempo dentro de las tramas

Cada paquete puede llegar a tiempo, retrasarse o no llegar. Cada caso produce un efecto distinto y se tratará de manera diferente. Al producirse un retardo excesivo en un paquete, la información llega pasado el periodo de muestreo en el que se debe usar, pero llega. Al perder un paquete se

pierde esa información y no se puede recuperar. Y al perder el canal de comunicación, no se puede mantener el sistema activo, al igual que no se podría, en caso de fallo en uno de los componentes internos del convertidor.

La marca de tiempo para la aplicación de la señal de actuación indica el incremento de tiempo, expresado en periodos de muestreo del controlador primario n° de secuencia de muestreo en el que se debe aplicar la actuación.

6.3.4 Saturación del controlador

Al perder las comunicaciones en la actuación, en la realimentación o en ambos canales, la respuesta temporal del sistema controlado empeora notablemente, pudiendo llegar a hacerse inestable. Habitualmente los controladores suelen incluir un integrador en el lazo de control. Este integrador acumula la señal de error y no actualizarse la medida o la actuación, esta acumulación de error puede crecer de forma incontrolada. Para evitar el efecto de posibles saturaciones en el actuador y su influencia en la acumulación de error, el controlador primario incluye un *antiwindup* que limita este crecimiento.

Para el caso de pérdida de comunicaciones, se propone adaptar el funcionamiento del *antiwindup*, de forma que la saturación del error se maneja no por la detección de la saturación del actuador del sistema, sino por la detección de la pérdida de comunicaciones. El error que se pasa al integrador tomará valor 0. En este caso, el integrador dejará de crecer limitando el sobreimpulso en el sistema, aunque se mantendrá la actuación proporcional al error.

En el momento en el que se detecte la recuperación de las comunicaciones, el error se vuelve a aplicar al integrador, por lo que la respuesta actuará como una nueva perturbación.

De esta forma se espera obtener una respuesta que, aunque llegará más tarde de lo debido por la inevitable pérdida de comunicación, tendrá un sobreimpulso similar al caso en el que no haya ninguna pérdida.

Esta solución requiere la detección correcta de la pérdida o retraso en las comunicaciones.

6.3.5 Recuperación de tramas

En el caso que el corte de comunicación se deba a retardos excesivos y se reciban varias muestras acumuladas en un mismo periodo, se propone aplicar todas las muestras por orden reduciendo el periodo de muestreo del control secundario, hasta que se hayan aplicado todas las muestras. En ese momento se reestablece el estado normal del sistema.

La primera fase para el tratamiento de esta información se basa en la detección del fallo de comunicación, tal y como se describe en el apartado 6.3.3.

La marca de tiempo de la medida recibida ha de corresponder con la esperada, permaneciendo el incremento de tiempo entre señales constante. En caso de no ser así, se puede diferenciar entre la pérdida de la trama o el retardo en función del incremento de tiempo entre las dos marcas. La diferencia entre la marca de tiempo anterior recibida y la actual indica la relación entre ambas, y si las muestras son consecutivas o no.

Si la marca de tiempo recibida corresponde con la esperada, el lazo de control continúa su ejecución. En el caso de haber diferencia, se producirá una variación de la misma manera que se produciría en caso de haber una perturbación en el sistema. Dependiendo de las condiciones en el instante de tiempo en el que se produzca, la perturbación puede ser desde inapreciable, hasta producir un sobreimpulso que lleve el sistema a la inestabilidad.

Para reducir estos sobreimpulsos y paliar los efectos de la pérdida de comunicaciones, se propone modificar el periodo de muestreo del controlador de alto nivel al recuperar las comunicaciones para aplicar las muestras en un periodo de tiempo menor y mantener los tiempos de establecimiento.

Para esta propuesta se comprueban tanto los tiempos en los que se envió la anterior referencia al controlador primario, como el instante de recepción de la última muestra, aplicando la técnica en ambos canales.

En el caso de las pérdidas en el canal de realimentación, esta solución no se aplica, ya que la señal de control se calcula a partir del error, por lo que aplicar el último error será, permitirá al controlador ajustar más rápidamente la respuesta del sistema.

En el caso de las pérdidas en el canal de actuación, esta solución proporcionará una salida con una forma similar al caso en el que no se aplique ninguna solución, pero con el sobreimpulso retardado.

Esta solución se propone para su uso conjunto con la parada del integrador, caso en el que se espera que el IAE disminuya con respecto a la solución de parar únicamente el integrador.

Esta propuesta también se aplicará de forma conjunta con la saturación del controlador, deteniendo el integrador del controlador durante la pérdida de comunicaciones, y reduciendo a la mitad el periodo de muestreo del controlador secundario tras recuperar las comunicaciones.

6.4 Validación de las propuestas en el caso de uso STATCOM en WACS

6.4.1 Descripción del caso de uso

Para mostrar los efectos e influencias de las comunicaciones en lazos de control se muestran una serie de simulaciones y pruebas reales en laboratorio con el STATCOM descrito en el Apéndice A, dando soporte a la red eléctrica para mantener el nivel de tensión, mediante la inyección de potencia reactiva. En el apéndice se describen los controladores y la teoría subyacente requerida.

Para que este caso de uso se adapte a lo esperado en un sistema WACS, el control global se divide en tres niveles: primario, secundario y terciario, tal y como se muestra en la Figura 6.5.

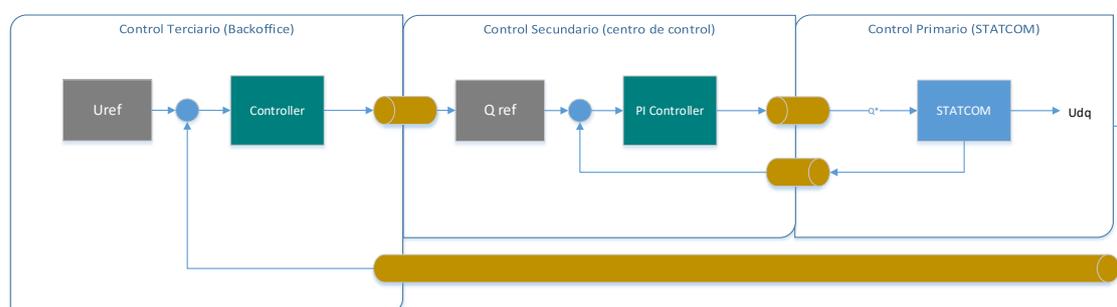


Figura 6.5. Niveles de control

En las pruebas solo se contempla un módulo de cada tipo de controlador por simplicidad, ya que el objetivo es analizar las comunicaciones. En un sistema completo, se dispondría de varios módulos primarios agrupados dentro de un módulo secundario, y de varios secundarios dentro del terciario.

El lazo de control primario se ejecuta en el STATCOM, con un periodo de 200 μ s. Este lazo se describe en el apartado 3.4.2. Se compone de varios lazos anidados y relacionados tal y como se muestra en la Figura 6.6. En este controlador no existe el problema del indeterminismo en las comunicaciones, ya no se soporta en ellas. Se encarga de la sincronización interna con la red eléctrica, por lo que una mínima desviación se traduciría en una corriente elevada, e incluso en un cortocircuito entre fases en la red. Tiene como referencia la tensión en el bus de continua y la potencia reactiva a intercambiar con la red, aunque solo se va a controlar la potencia reactiva. La tensión del bus de continua será constante. Aporta medidas del convertidor, entre ellas, las tensiones de red, corrientes, potencia activa y reactiva y la tensión en el bus de continua. Este lazo de control es necesario para mantener el convertidor sincronizado con la red eléctrica y en funcionamiento. Para el control de potencia reactiva, cuenta con un limitador de la derivada en la referencia y un saturador, que permite al sistema mantenerse en funcionamiento ante una pérdida del controlador secundario utilizando la última referencia recibida.

El lazo de control secundario utiliza el control primario y el punto de acoplamiento común como planta para realizar el control de tensión. El periodo de control se establece en 100 ms para asegurar

la operación en cascada de los controladores y la correcta operación del canal de comunicaciones. El tiempo de establecimiento, para que se adapte a los sistemas industriales y no implique grandes esfuerzos de control, se escoge como 0.8 s (lo que supone 8 muestras del periodo de control secundario). El controlador, en este caso de uso, es habitual que se ubique en un centro de operación, por lo que para el transporte de las consignas y de las actuaciones se utilizan canales de comunicación.

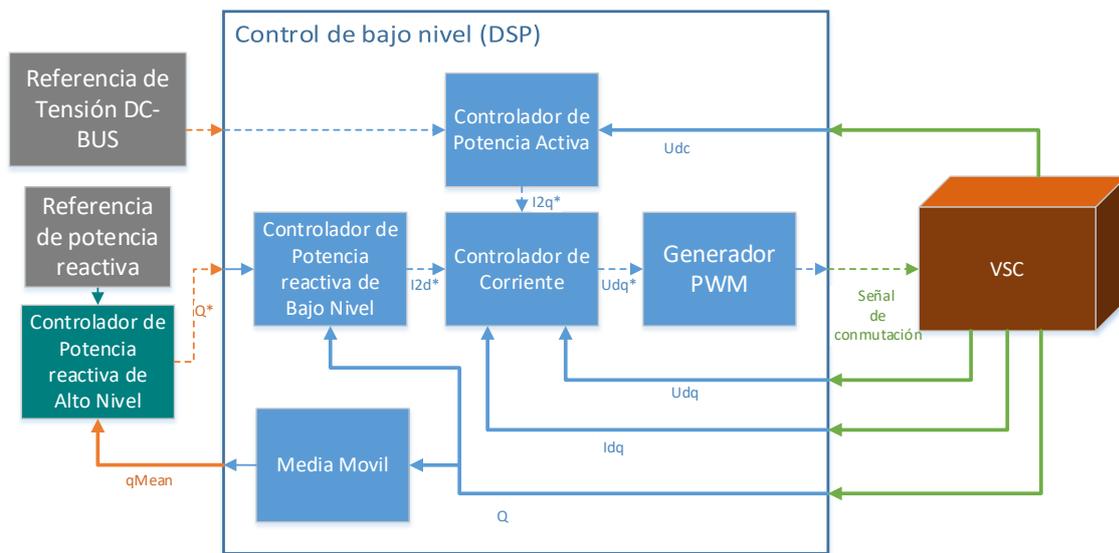


Figura 6.6. Esquema de control

En el lazo de control terciario, el operador de red será el que envíe las consignas de tensión en cada punto de la red para realizar un control del segmento de red de distribución. Este controlador está fuera del objeto de esta Tesis.

En este esquema del sistema, el control secundario tiene la flexibilidad de contar con un control primario como planta. Esto supone contar con un margen de seguridad para poder hacer todo tipo de pruebas, evitando la posible destrucción del sistema ante una pérdida de comunicación.

6.4.2 Simulación del caso de uso

El entorno de simulación que se ha utilizado para las pruebas fue descrito en el apartado 3.3. En el apartado 3.4.3 se muestra la parte de la simulación correspondiente al canal, que permite analizar los resultados en caso de pérdidas.

Los retardos en las comunicaciones debidos a la variación de la latencia son finitos. Pero puede ser que el canal haya perdido la conexión, por lo que se produce un corte. Si la latencia es demasiado elevada, y se encuentra por encima de la máxima admisible por el controlador para mantenerse estable, en lugar de un retraso, se considerará como un corte de la comunicación.

Esta simplificación obedece a la lógica, de que si se envía una muestra, el efecto de esta se debe reflejar en el siguiente periodo de muestreo. Si la latencia es demasiado elevada, lo que se introduce es un retardo en la muestra. Existen diferentes alternativas sobre las acciones a tomar en este caso, como se vio en el apartado 6.2.1. Es evidente que se ha de elegir un valor para aplicar en el lazo de control en ese periodo. Ese valor puede ser el último bueno recibido o una predicción atendiendo a los valores anteriores y el comportamiento del sistema. Lo que no es tan evidente es la mejora que se puede conseguir en el caso de que el controlador espere a la muestra (en el caso de un retardo finito), y aplique las salidas de control variando su periodo. En el caso de recibir varias muestras simultáneamente, también se puede optar por esta solución, o simplemente descartar todas menos la última.

Esta simulación también permite observar las diferencias entre las pérdidas de comunicación en el canal de realimentación y en el canal de actuación.

6.4.2.1 Influencia de las comunicaciones en la respuesta temporal del STATCOM

Las simulaciones realizadas con el modelo de convertidor permiten tener una aproximación al comportamiento real del sistema ante pérdidas de comunicación. Al introducir un canal de comunicaciones en el lazo de control, se introduce un retardo variable con incertidumbre. El propósito de este análisis es valorar la respuesta temporal y el sobreimpulso que se produce en función de la cantidad de muestras perdidas.

Sobre este controlador se simulan pérdidas en los dos puntos que lo unen con el sistema a controlar, como se muestra en la Figura 3.14, en la medida de potencia reactiva realimentada y en la salida del controlador que actúa como referencia de potencia reactiva a aplicar al controlador de bajo nivel. Para facilitar la comparación con el sistema real, el análisis del comportamiento del sistema se ha dividido en diferentes experimentos.

Inicialmente se ha realizado una simulación sin pérdidas para tenerla como referencia. Después se ha realizado una batería de simulaciones,

1. Sin pérdidas
2. Con pérdidas en la recepción de la medida
3. Con pérdidas en el envío de la actuación
4. Con pérdidas en ambos segmentos
5. Con pérdidas en ambos segmentos desfasadas entre ellas

De cada experimento se han realizado simulaciones con referencia 0 y con un salto en la referencia que pasará de -25 kVAr a 5 kVAr. Se toman estos valores para trabajar lejos de la zona de saturación

del convertidor, que está en 50 kVAr. De este modo, se puede apreciar mejor el sobreimpulso producido, ya que no interviene el saturador del sistema.

En el caso de los experimentos con pérdidas de comunicación, se muestran los resultados desde 1 periodo perdido hasta 7 periodos perdidos. En todos los casos, las pérdidas se inician en $t = 1.1$ s coincidiendo con el cambio de referencia.

En esta simulación, dado que se quiere observar el efecto de estos retardos, la detección se presupone correcta.

6.4.2.2 Resultados de la simulación

6.4.2.2.1 Resultados con un retardo constante

Para conocer el retardo máximo que tolera el sistema se ha realizado una simulación comparando los resultados para retardos constantes entre 1 y 3 muestras en ambos canales. Se observa que al introducir un retardo de tres muestras en el canal de actuación se pierde la estabilidad del sistema.

Ajustándolo más a la realidad, se ha simulado el efecto que tendría perder de forma cíclica un número determinado de muestras. Para esto se han introducido ciclos con entre 1 y 7 muestras de retardo y una sin retardo.

6.4.2.2.2 Resultados con referencia 0 kVAr

Al simular los efectos de estas pérdidas con referencia 0, el efecto no es demasiado grande, independientemente del canal en el que se produzca el fallo, dado que al tratarse de errores muy pequeños, el controlador tiene una variación de la misma proporción.

A continuación, se muestran los resultados obtenidos representando las gráficas la comparativa entre el sistema correcto, con fallo en el canal de envío de la actuación, Figura 6.7, con fallo en el canal de envío de la señal de realimentación, Figura 6.8 y con fallo en ambos canales Figura 6.9. Dado el escaso efecto, solo se muestra la comparativa entre el sistema sin pérdidas, con 7 periodos de señal perdidos, y con 7 periodos de señal perdidos y la solución propuesta. En la parte superior se puede ver la evolución de la potencia reactiva y en la parte inferior, la representación de la tensión en el PCC. En todas las gráficas en las que se representan tensiones, estas corresponden a la componente q de la tensión en ejes dq.

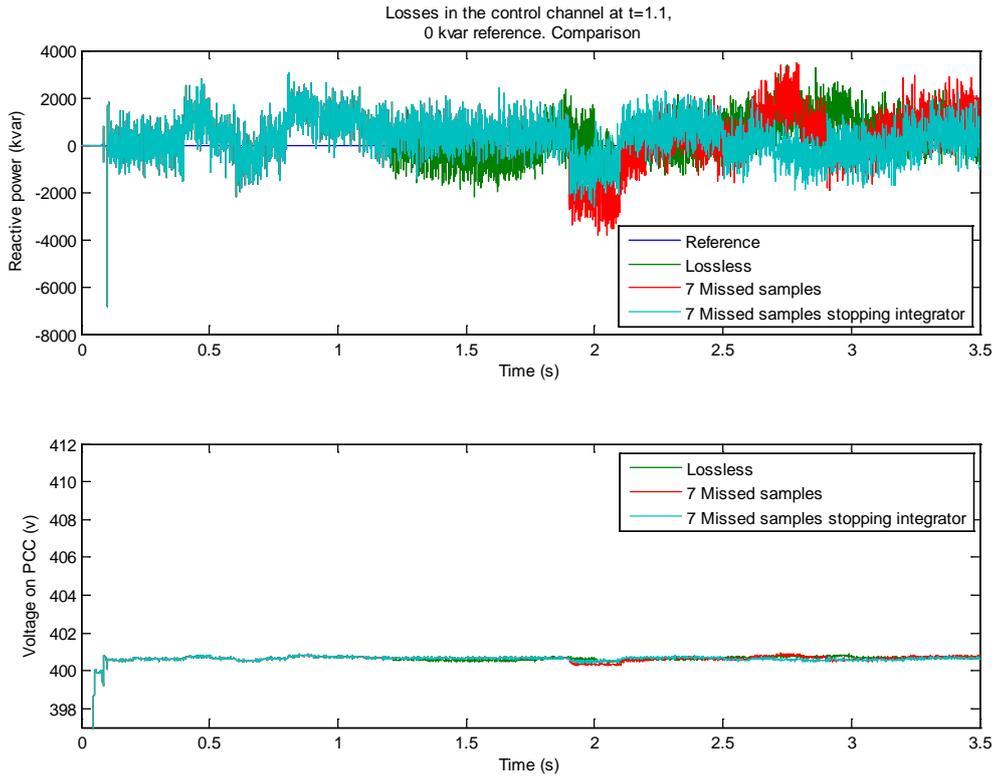


Figura 6.7 Comparativa de la evolución de la potencia reactiva y tensión en el PCC con referencia 0 kVar y pérdidas en la señal de actuación al aplicar la solución propuesta

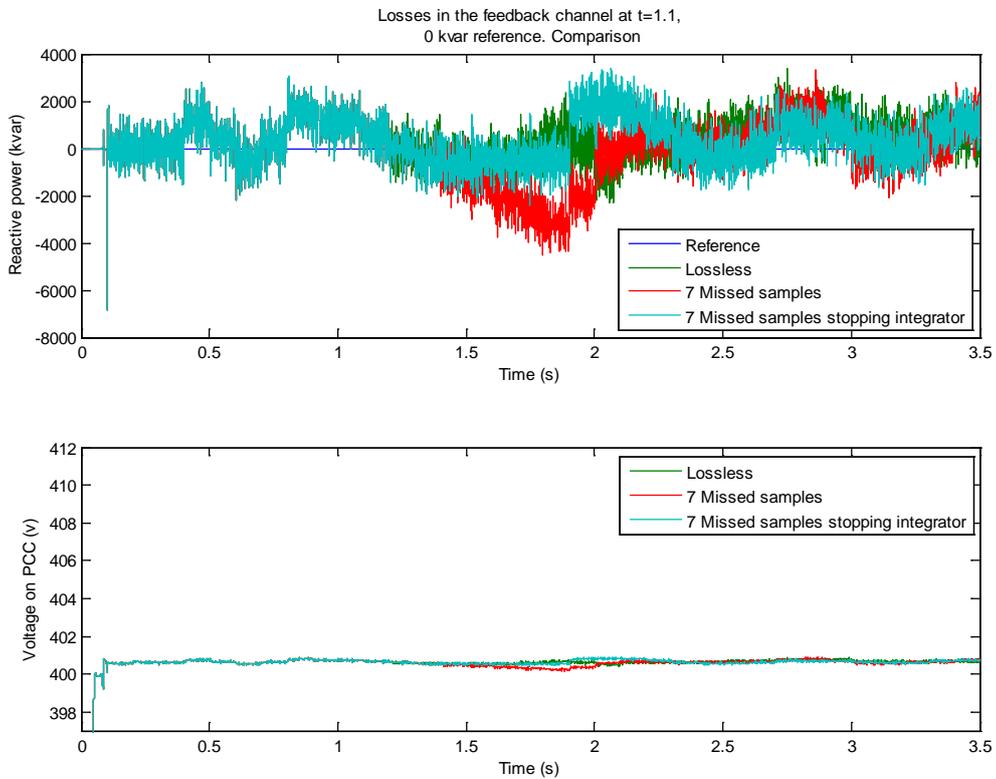


Figura 6.8 Comparativa de la evolución de la potencia reactiva y tensión en el PCC con referencia 0 kVar y pérdidas en la señal de realimentación al aplicar la solución propuesta

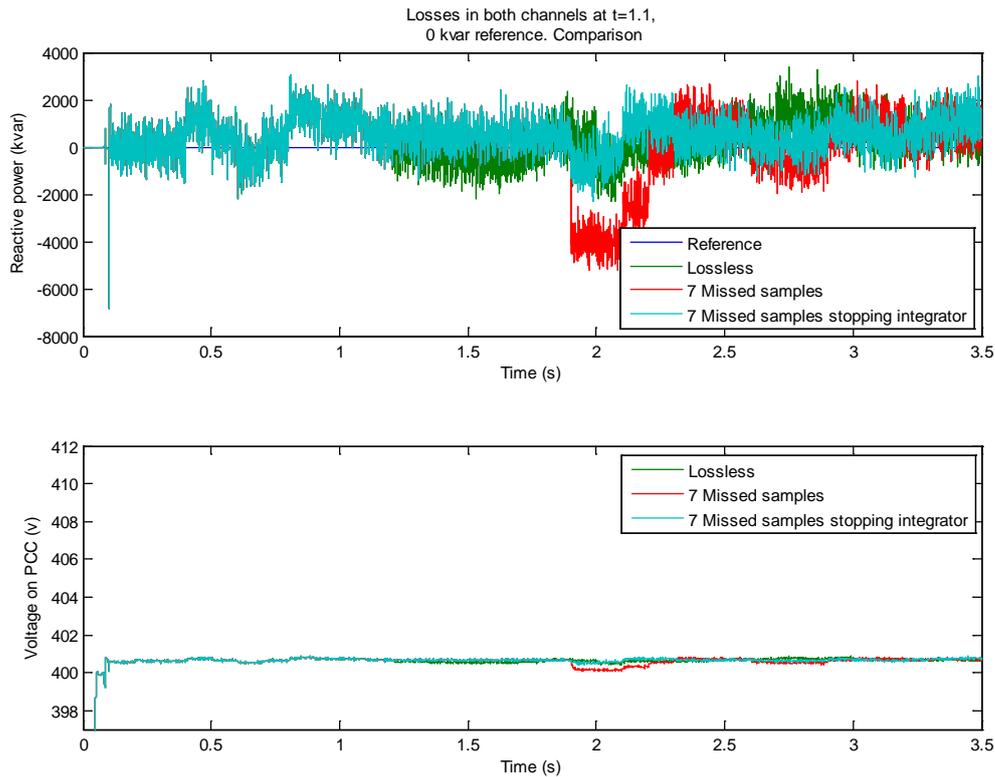


Figura 6.9 Comparativa de la evolución de la potencia reactiva y tensión en el PCC con referencia 0 kVAr y pérdidas en ambos canales al aplicar la solución propuesta

Se puede observar como no existe apenas diferencia entre el sistema con o sin fallo de comunicación, y por lo tanto, las soluciones propuestas no tiene un efecto significativo mejorando o empeorando el funcionamiento.

Sin embargo, en el caso de que la pérdida de comunicaciones se produzca en el momento crítico de cambiar la consigna con un escalón, la falta de comunicación afectará más en función del número de muestras que se pierda.

6.4.2.2.3 Respuesta al escalón con pérdidas en el canal de actuación

Cuando se produce un corte en el canal de envío de la señal de actuación a la planta, el sistema mantiene el último valor recibido, por lo que no habrá variación durante la pérdida, pero al recuperar el funcionamiento normal, el integrador habrá crecido provocando un sobreimpulso proporcional al tiempo de recuperación. Además, se producirá un retardo en la respuesta del sistema inherente a la propia pérdida de comunicaciones. En las siguientes figuras se representan los resultados de la simulación introduciendo hasta 7 periodos de pérdida en este canal. En la Figura 6.10 se muestra la potencia reactiva y en la Figura 6.11 la tensión en el PCC.

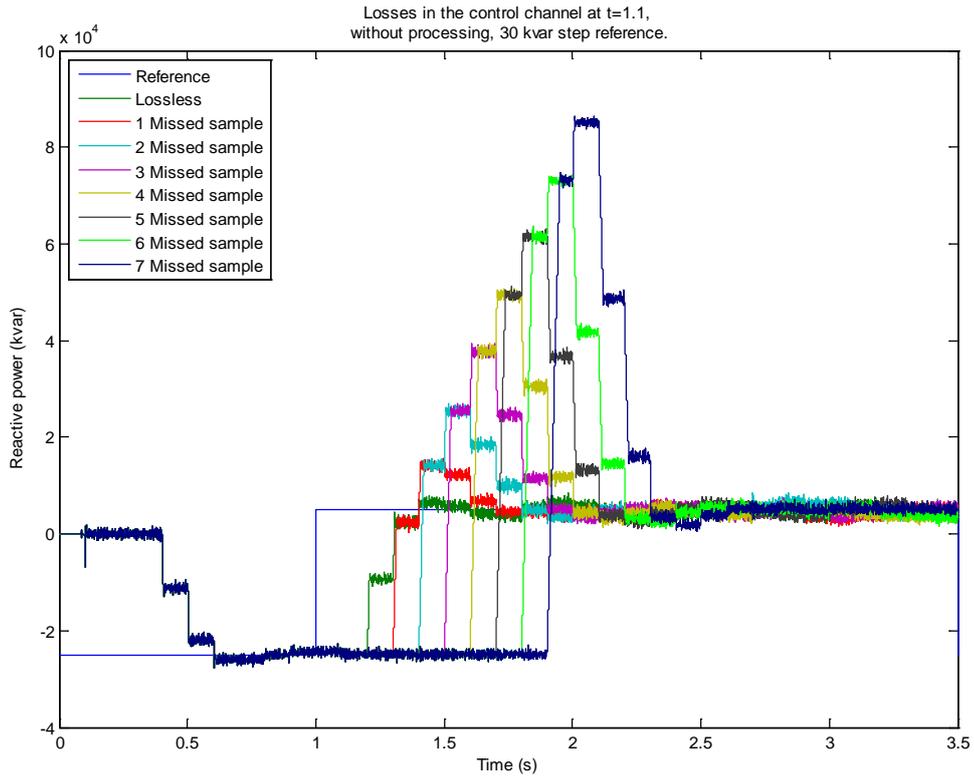


Figura 6.10 Evolución de la potencia reactiva con salto de referencia de 30 kVAr y pérdidas en la señal de actuación

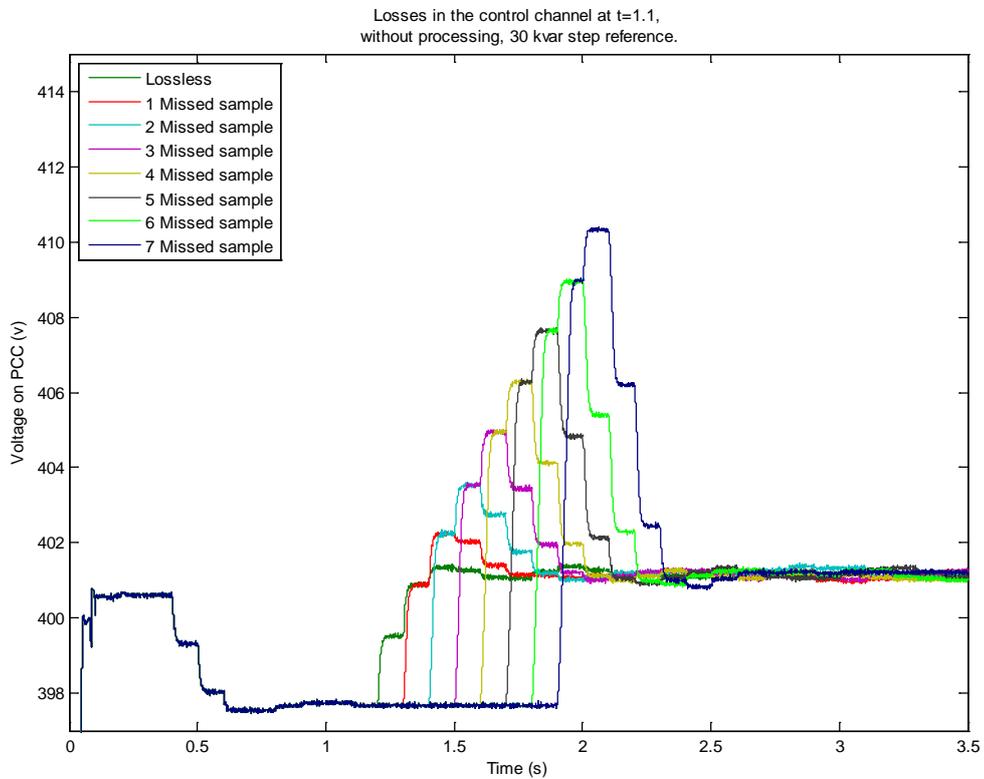


Figura 6.11 Evolución de la tensión en el PCC con salto de referencia de 30 kVAr y pérdidas en la señal de actuación

Se puede observar como con 7 muestras perdidas, el sobreimpulso de la potencia reactiva es del 350%, lo que haría que el sistema se volviese inestable si se mantuviese ese retardo. En el PCC se puede observar cómo se produce un sobreimpulso de 9 V por encima de los 401 V que mantiene con la referencia de 5 kVAr.

Al aplicar la solución propuesta, este sobreimpulso debe desaparecer, al haberse mantenido estática la parte del integrador. Pero al recuperar las comunicaciones se producirá un pequeño sobreimpulso ya que la detección de la pérdida se detecta en el siguiente periodo, por lo que el valor del integrador no será nulo. En la Figura 6.12 se muestra la evolución de la potencia reactiva y en la Figura 6.13 la evolución de la tensión en el PCC.

Se puede observar cómo el sobreimpulso desaparece, y la tensión en el PCC se estabiliza a 401 V, siempre con el retardo producido por la pérdida de comunicaciones. En el momento de recuperar las comunicaciones, se aplicará la última muestra, pero dado que el integrador almacenaba un valor no nulo, se producirá un pequeño sobreimpulso siempre del mismo valor independientemente del número de periodos perdidos.

En la Figura 6.14 se muestra una comparativa entre el sistema sin pérdidas, con 7 periodos de señal perdidos, y con 7 periodos de señal perdidos y la saturación del controlador propuesta. En la parte superior se puede ver la evolución de la potencia reactiva y en la parte inferior, la representación de la tensión en el PCC.

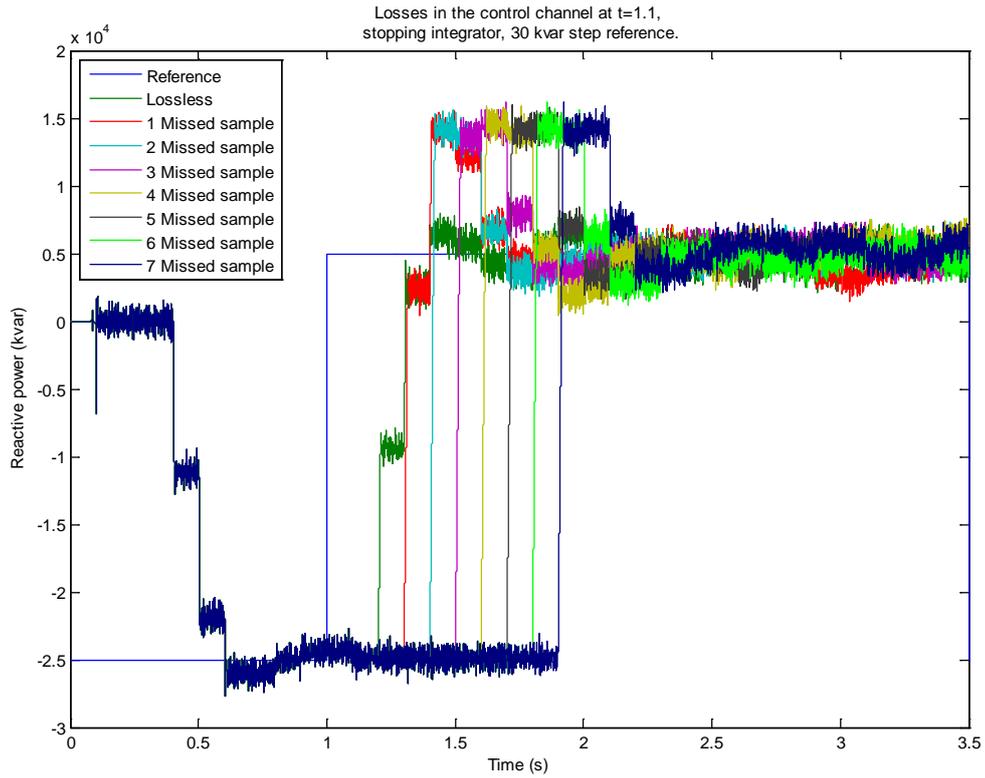


Figura 6.12 Evolución de la potencia reactiva con salto de referencia de 30 kVAr y pérdidas en la señal de actuación, aplicando la solución propuesta

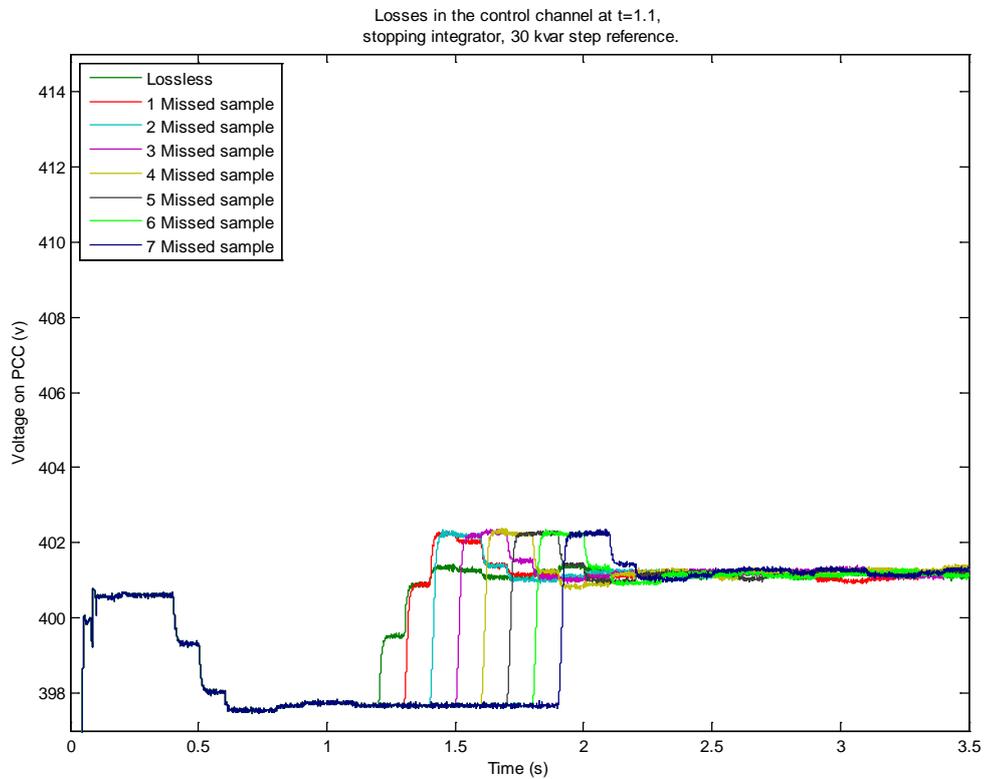


Figura 6.13 Evolución de la tensión en el PCC con salto de referencia de 30 kVAr y pérdidas en la señal de actuación aplicando la solución propuesta

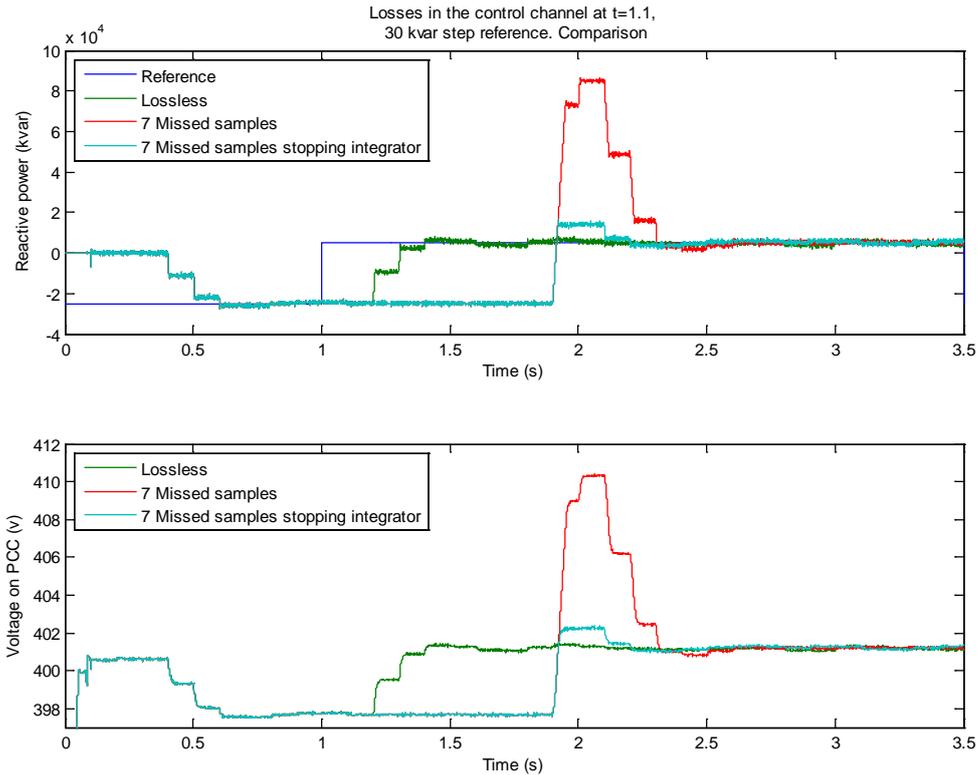


Figura 6.14 Comparativa de la evolución de la potencia reactiva y tensión en el PCC con salto de referencia de 30 kVAr y pérdidas en la señal de actuación al aplicar la solución propuesta

Al comparar los resultados, se observa cómo tanto la tensión del PCC como la potencia que maneja el convertidor tienen un sobreimpulso mucho menor que en el caso de que no hubiera existido el corte en las comunicaciones, aunque con el retardo introducido por las pérdidas.

6.4.2.2.4 Respuesta al escalón con pérdidas en el canal de realimentación

Para el retardo introducido en la realimentación, se producirá un crecimiento lineal de manera proporcional al error al inicio de la pérdida, hasta que se recuperen las comunicaciones, como se muestra en las dos siguientes figuras, ya que el error en el controlador seguirá constante hasta que reciba una nueva medida del sistema.

En las siguientes figuras se representan los resultados de la simulación introduciendo hasta 7 periodos de pérdida en este canal. En la Figura 6.15 se muestra la potencia reactiva y en la Figura 6.16 la tensión en el PCC.

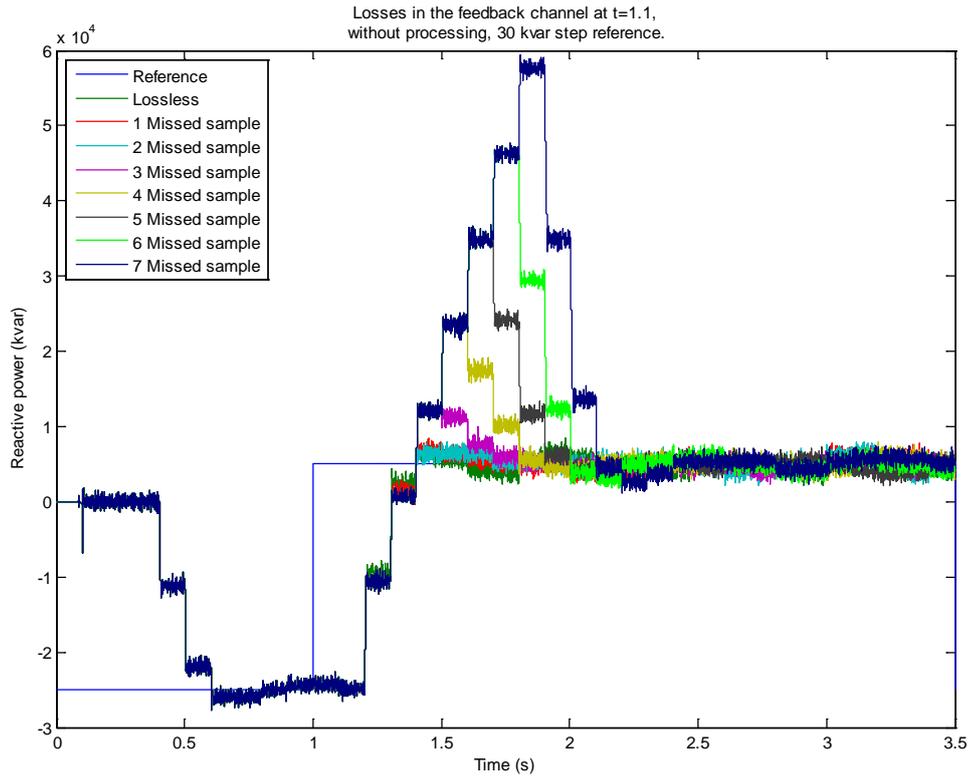


Figura 6.15 Evolución de la potencia reactiva con salto de referencia de 30 kVAr y pérdidas en la señal de realimentación

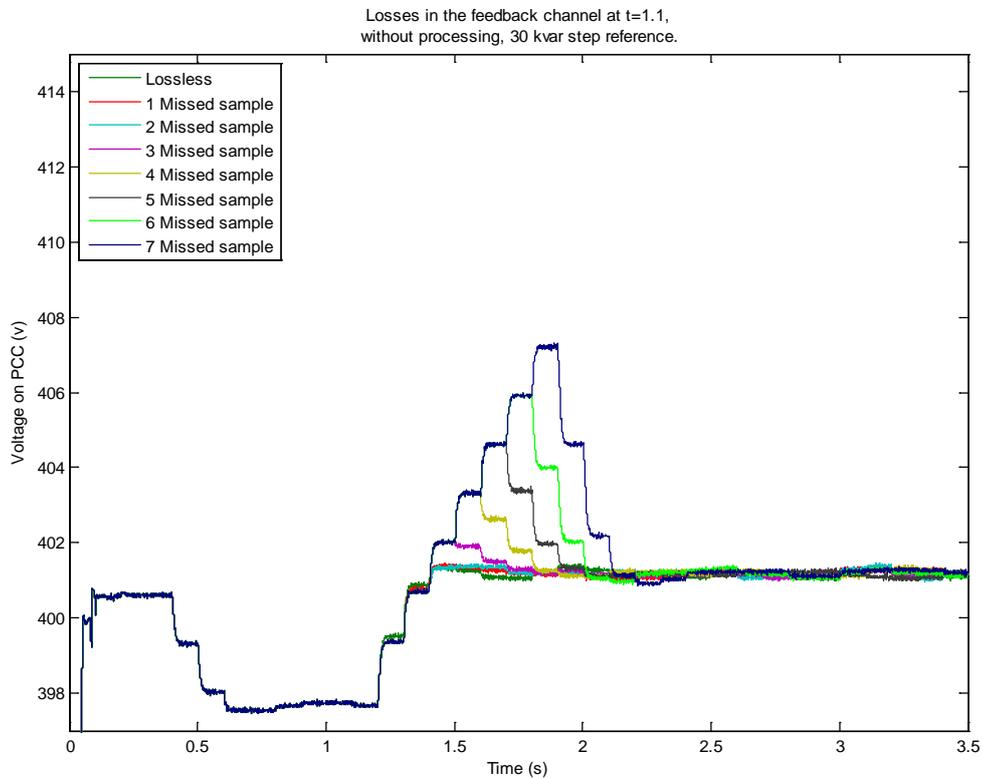


Figura 6.16 Evolución de la tensión en el PCC con salto de referencia de 30 kVAr y pérdidas en la señal de realimentación

En este caso, el sobreimpulso para 7 periodos perdidos es del 280%, igualmente elevado. Hay que tener en cuenta que toda la potencia reactiva influirá en la red eléctrica incrementando la tensión, como se puede observar en la Figura 6.16. Por lo tanto, en este caso, aunque el sobreimpulso es menor, el efecto producido aporta más energía a la red.

Al aplicar la saturación del controlador propuesta, este sobreimpulso debe desaparecer, al haberse mantenido estática la parte del integrador. En este caso, se mantendrá un nivel inferior al referenciado hasta que se recuperen las comunicaciones, produciéndose una pequeña oscilación al tener un cambio brusco en el error. En la Figura 6.17 se muestra la evolución de la potencia reactiva y en la Figura 6.18 la evolución de la tensión en el PCC.

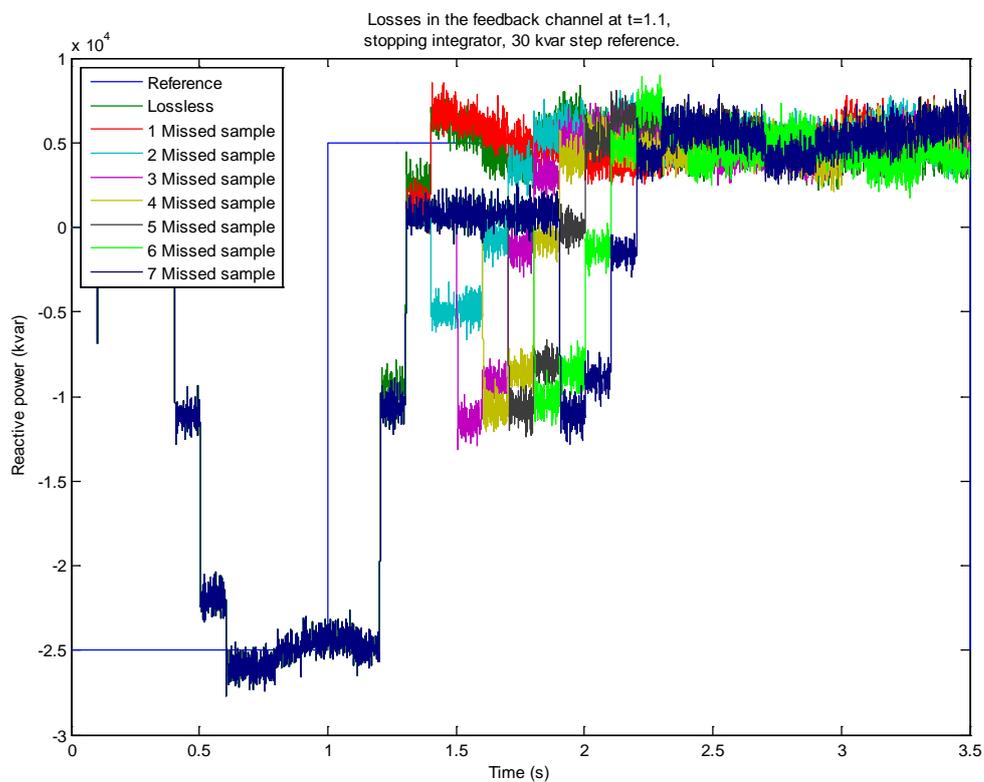


Figura 6.17 Evolución de la potencia reactiva con salto de referencia de 30 kVAr y pérdidas en la señal de realimentación, aplicando la solución propuesta

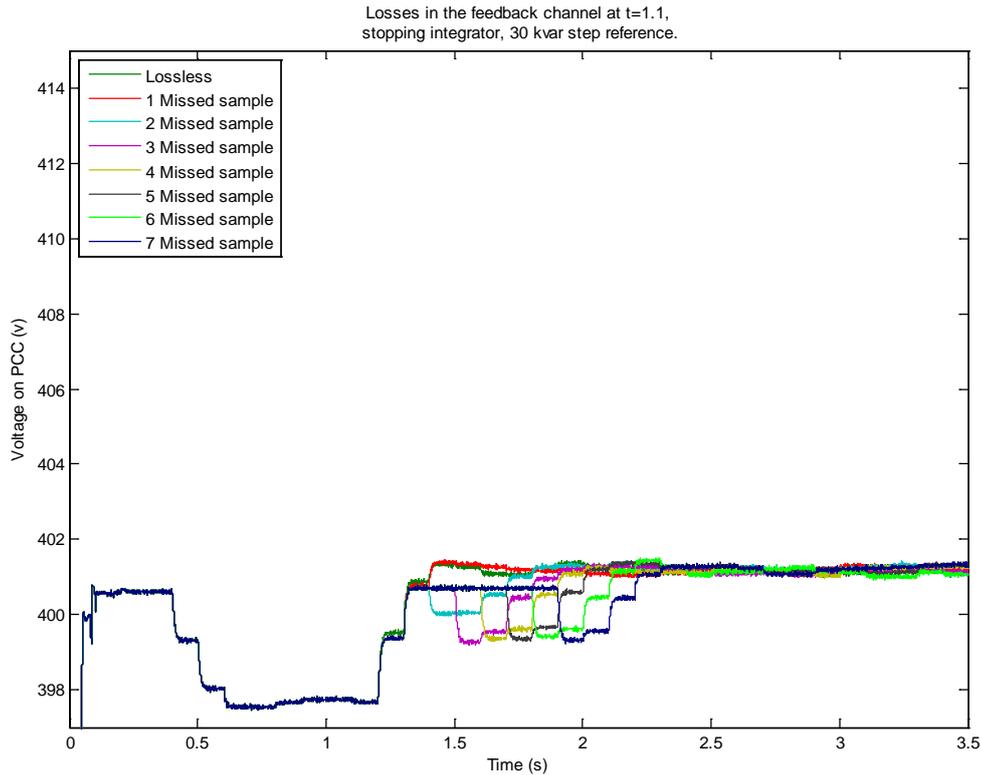


Figura 6.18 Evolución de la tensión en el PCC con salto de referencia de 30 kVAr y pérdidas en la señal de realimentación, aplicando la solución propuesta

Se puede observar como el sobreimpulso desaparece, y la tensión en el PCC se estabiliza a 401 V, siempre con el retardo producido por la pérdida de comunicaciones. La diferencia en este caso es que se mantiene con un valor intermedio entre el anterior al escalón y el valor final. Se puede apreciar cómo apenas existe diferencia en el caso de perder una muestra. Esto se debe a que el propio sistema de detección empezaría a actuar en el siguiente periodo, pero coincide con la recuperación de las comunicaciones, por lo que no se observa variación apenas. Sí que se observa que a partir de la tercera muestra perdida, el efecto es siempre igual, exceptuando el retardo introducido.

En la Figura 6.19 se muestra una comparativa entre el sistema sin pérdidas, con 7 periodos de señal perdidos, y con 7 periodos de señal perdidos y la solución propuesta. En la parte superior se puede ver la evolución de la potencia reactiva y en la parte inferior, la representación de la tensión en el PCC.

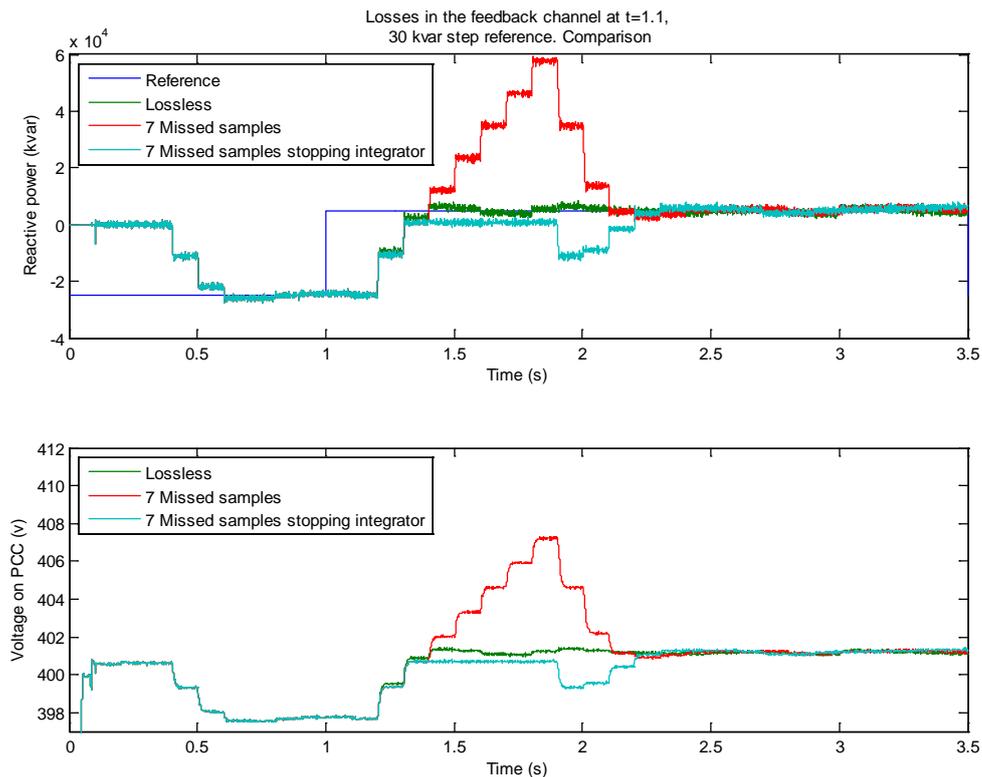


Figura 6.19 Comparativa de la evolución de la potencia reactiva y tensión en el PCC con salto de referencia de 30 kVAr y pérdidas en la señal de actuación al aplicar la solución propuesta

Al comparar los resultados, se observa cómo tanto la tensión del PCC como la potencia que maneja el convertidor se aproximan bastante al caso sin problemas en la comunicación, exceptuando la oscilación en el momento de recuperar las comunicaciones.

6.4.2.2.5 Respuesta al escalón con pérdidas simultáneas en ambos canales

Cuando la pérdida se produce en ambos canales simultáneamente, el comportamiento es idéntico a la pérdida de comunicaciones en la actuación. Esto se debe a que el hecho de que no llegue la señal de salida del controlador a la planta, por lo que la planta no cambia su actuación. Sin embargo, el canal de realimentación entregó una muestra en un periodo anterior, por lo que el error en el lazo de control se mantendrá con un valor de magnitud suficiente para afectar al controlador de manera significativa.

En las siguientes figuras se representan los resultados de la simulación introduciendo hasta 7 periodos de pérdida en este canal. En la Figura 6.20 se muestra la potencia reactiva y en la Figura 6.21 la tensión en el PCC.

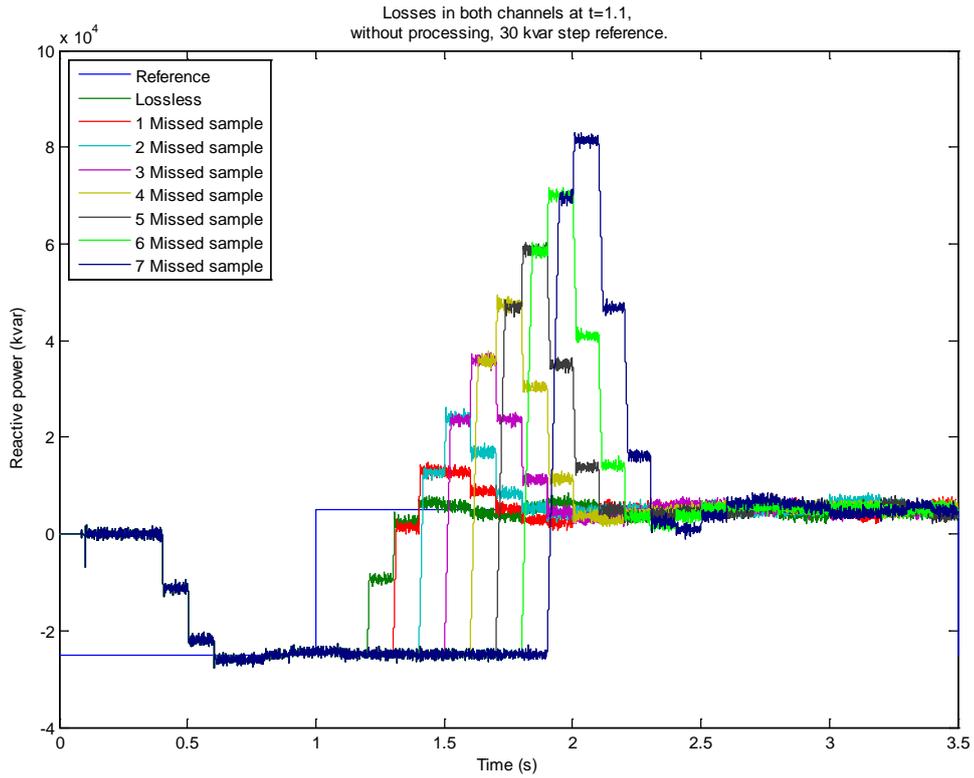


Figura 6.20 Evolución de la potencia reactiva con salto de referencia de 30 kVAr y pérdidas en ambas señales simultáneamente

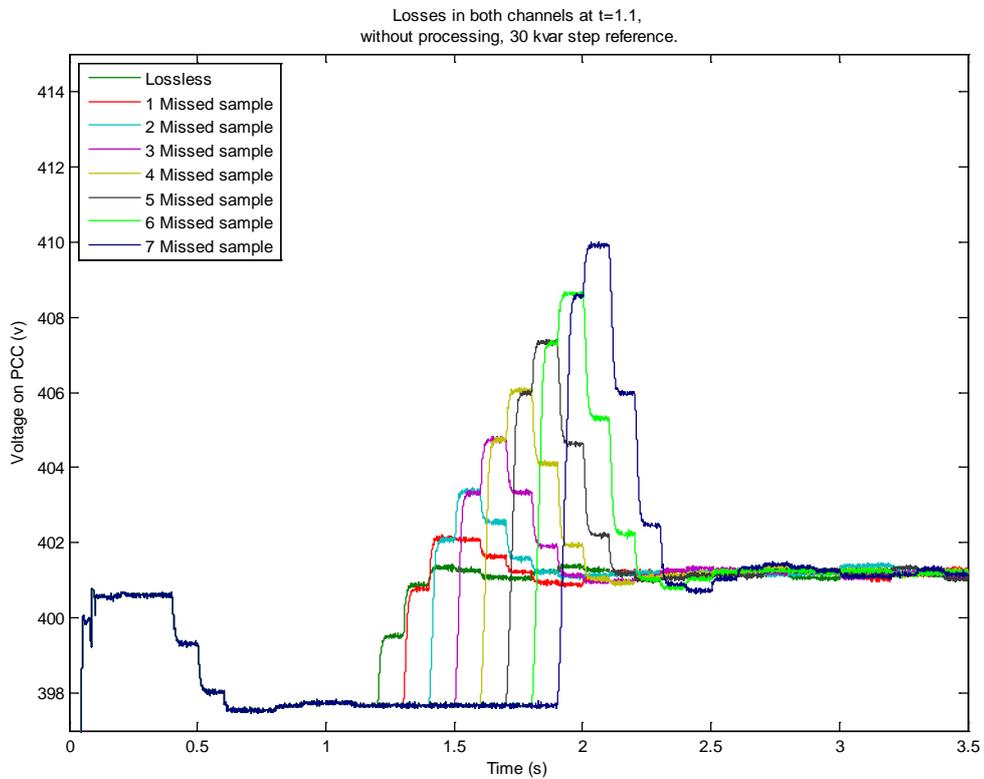


Figura 6.21 Evolución de la tensión en el PCC con salto de referencia de 30 kVAr y pérdidas en ambas señales simultáneamente

Se puede observar la similitud entre los dos casos mencionados, comparando las salidas en las figuras de este caso con el caso de la pérdida de la señal de actuación.

Al aplicar la solución propuesta, el comportamiento será igual también al comportamiento del sistema ante una pérdida en la actuación. En la Figura 6.22 se muestra la evolución de la potencia reactiva y en la Figura 6.23 la evolución de la tensión en el PCC.

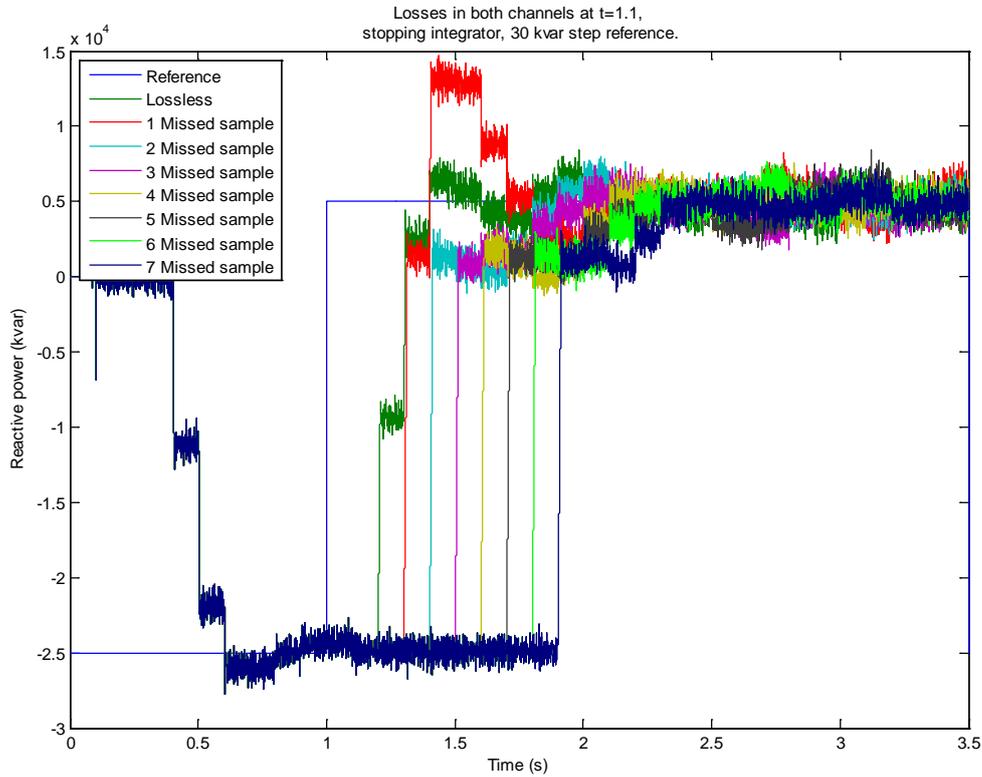


Figura 6.22 Evolución de la potencia reactiva con salto de referencia de 30 kVAr y pérdidas en ambas señales simultáneamente, aplicando la solución propuesta

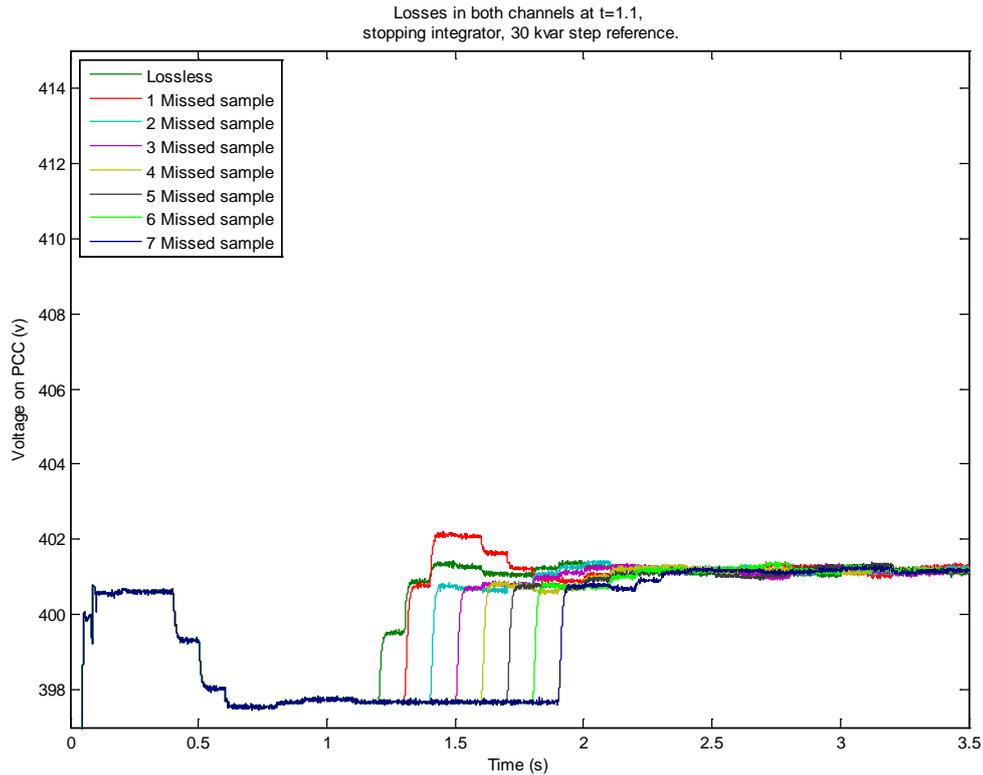


Figura 6.23 Evolución de la tensión en el PCC con salto de referencia de 30 kVAr y pérdidas en ambas señales simultáneamente, aplicando la solución propuesta

Se puede observar cómo el sobreimpulso desaparece, y la tensión en el PCC se estabiliza a 401 V, siempre con el retardo producido por la pérdida de comunicaciones.

En la Figura 6.24 se muestra una comparativa entre el sistema sin pérdidas, con 7 periodos de señal perdidos, y con 7 periodos de señal perdidos y la solución propuesta. En la parte superior se puede ver la evolución de la potencia reactiva y en la parte inferior, la representación de la tensión en el PCC.

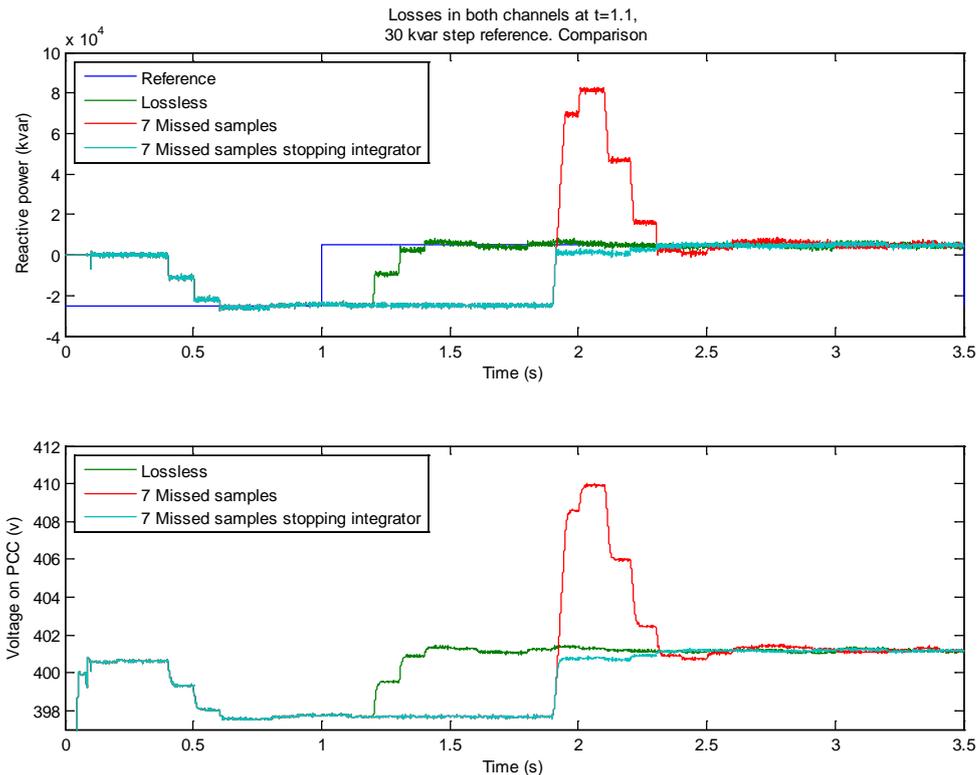


Figura 6.24 Comparativa de la evolución de la potencia reactiva y tensión en el PCC con salto de referencia de 30 kVAR y pérdidas en ambas señales simultáneamente al aplicar la solución propuesta

Se puede observar cómo la solución propuesta en este caso funciona igual que en el caso de tener pérdidas en la actuación únicamente.

6.4.2.2.6 Respuesta al escalón con pérdidas en el canal de realimentación y posteriormente en ambos canales

Si las pérdidas del canal de realimentación y del canal de actuación se producen desfasadas una o varias muestras, el comportamiento varía.

En el caso de perder antes el canal de realimentación, el error en el controlador permanecerá constante, y sin evolución, por lo que el integrador crecerá hasta la saturación. Al perder el canal de actuación, acto seguido, la planta dejará de recibir esta señal, por lo que dejará de crecer la salida del sistema. La recuperación de las comunicaciones tiene una alta probabilidad de suceder simultáneamente en ambos canales, por lo que en la salida del sistema se producirá la misma oscilación que en el caso de perder únicamente las comunicaciones en el canal de realimentación.

En las siguientes figuras se representan los resultados de la simulación introduciendo hasta 7 periodos de diferencia en la pérdida del canal de actuación. En la Figura 6.25 se muestra la potencia reactiva y en la Figura 6.26 la tensión en el PCC.

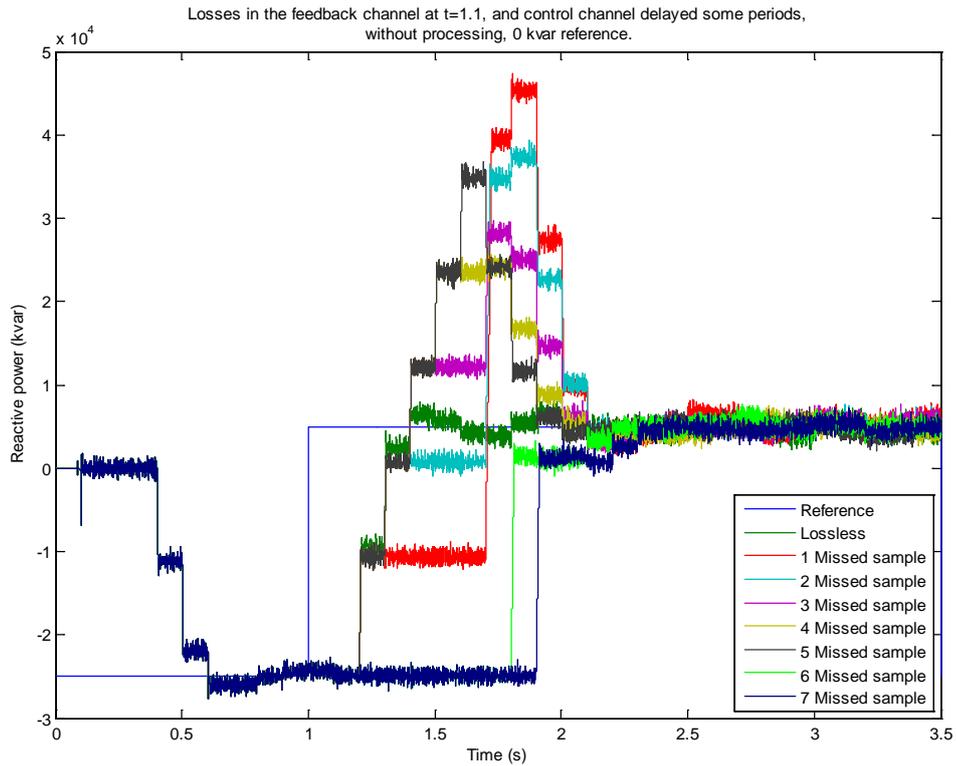


Figura 6.25 Evolución de la potencia reactiva con salto de referencia de 30 kVAr y pérdidas, primero en realimentación, después en actuación, en función de la diferencia de periodos entre ambas.

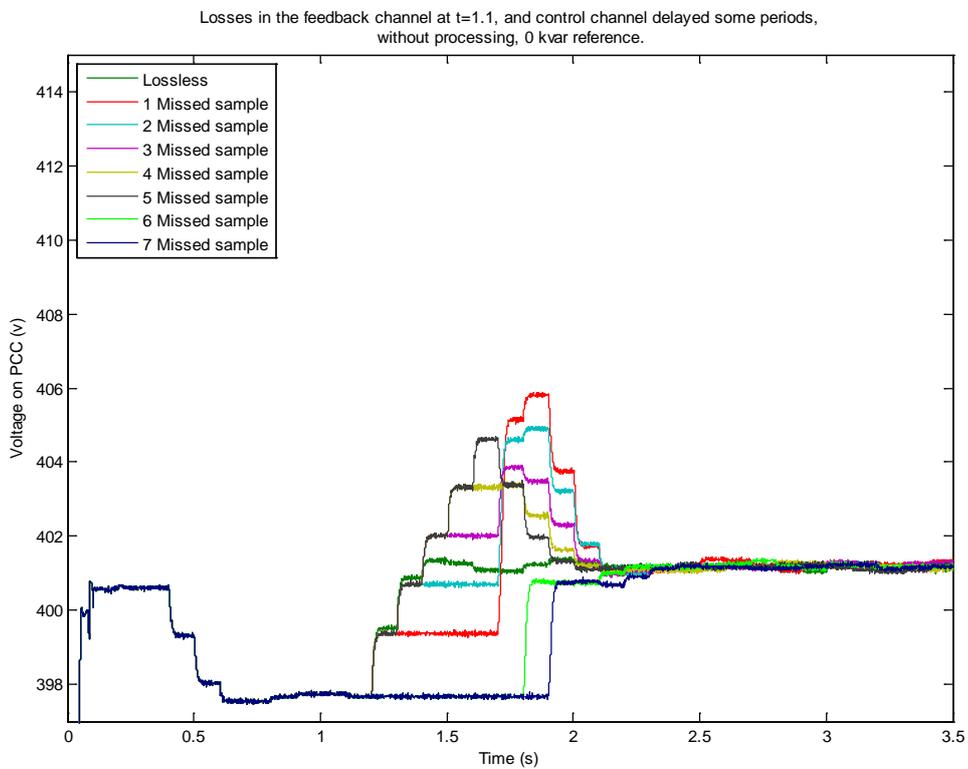


Figura 6.26 Evolución de la tensión en el PCC con salto de referencia de 30 kVAr y pérdidas, primero en realimentación, después en actuación, en función de la diferencia de periodos entre ambas.

Se puede observar cómo el comportamiento empeora cuanto mayor es la diferencia entre ambas pérdidas; sin embargo, el sobreimpulso es mayor cuanto menor es la diferencia. Para 7 muestras de diferencia, es el caso particular en el que hay 0 pérdidas en la actuación, por lo que el comportamiento es el del caso de tener 7 muestras perdidas en el canal de realimentación.

Al aplicar la solución propuesta, la salida se limitará en el momento de la detección, por lo que no tendrá una salida por encima de la referencia, y en la restauración de las comunicaciones, el sobreimpulso será muy inferior debido a que el error estará acotado también. La oscilación que se produce al recuperar el canal de realimentación se mantendrá. En la Figura 6.27 se muestra la evolución de la potencia reactiva y en la Figura 6.28 la evolución de la tensión en el PCC.

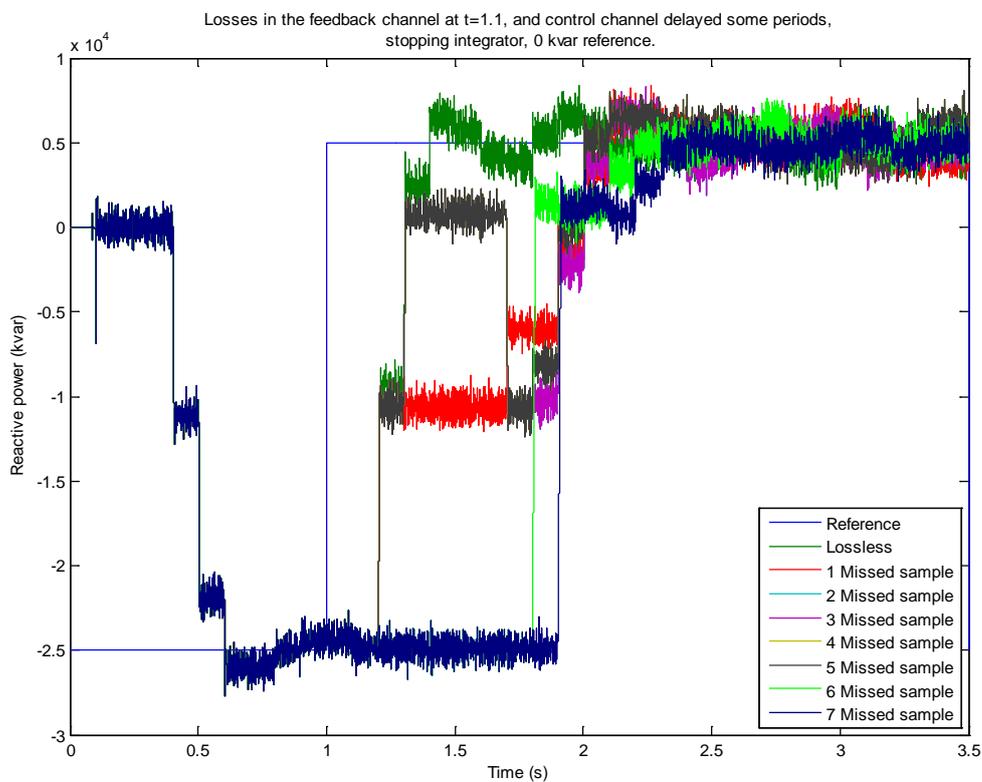


Figura 6.27 Evolución de la potencia reactiva con salto de referencia de 30 kVAr y pérdidas, primero en realimentación, después en actuación, aplicando la solución propuesta

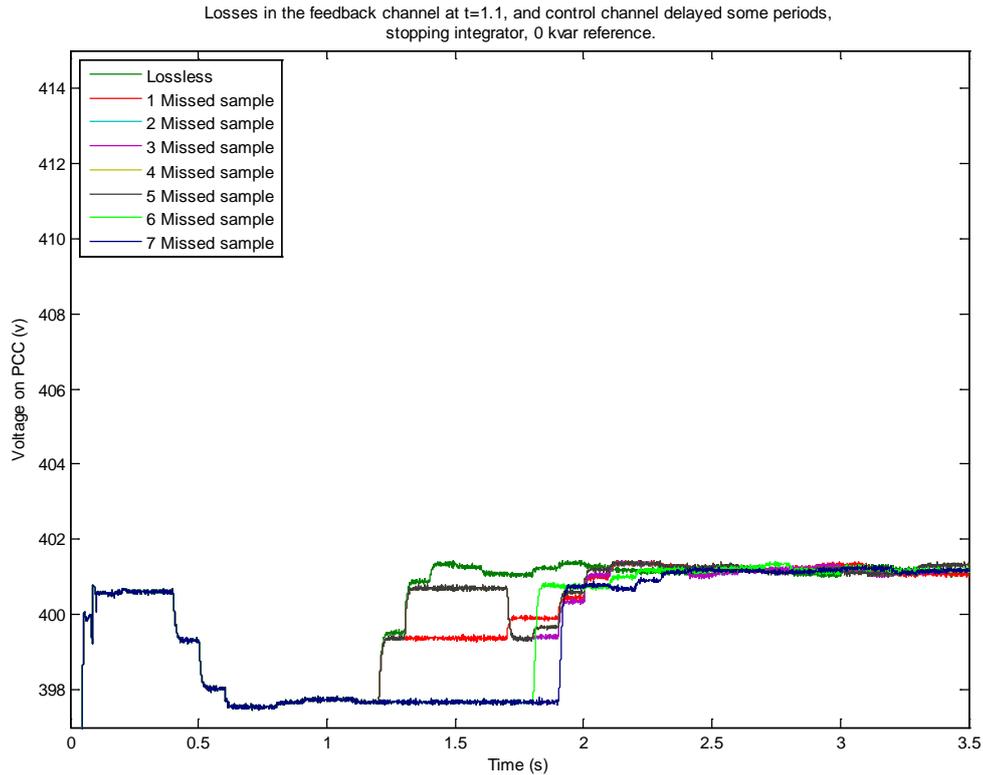


Figura 6.28 Evolución de la tensión en el PCC con salto de referencia de 30 kVAr y pérdidas, primero en realimentación, después en actuación, aplicando la solución propuesta

Se puede observar cómo el sobreimpulso desaparece, y la tensión en el PCC se estabiliza a 401 V, siempre con el retardo producido por la pérdida de comunicaciones. También se puede observar cómo a partir de 2 muestras de diferencia entre las pérdidas, el comportamiento es igual, debido a la parada del integrador en el controlador.

En la Figura 6.29 se muestra una comparativa entre el sistema sin pérdidas, con 7 periodos perdidos en el canal de realimentación desde $t = 1.1$ s y 4 periodos perdidos en el canal de actuación desde $t = 1.4$ s, y con este último caso y aplicando la solución propuesta. En la parte superior se puede ver la evolución de la potencia reactiva y en la parte inferior, la representación de la tensión en el PCC.

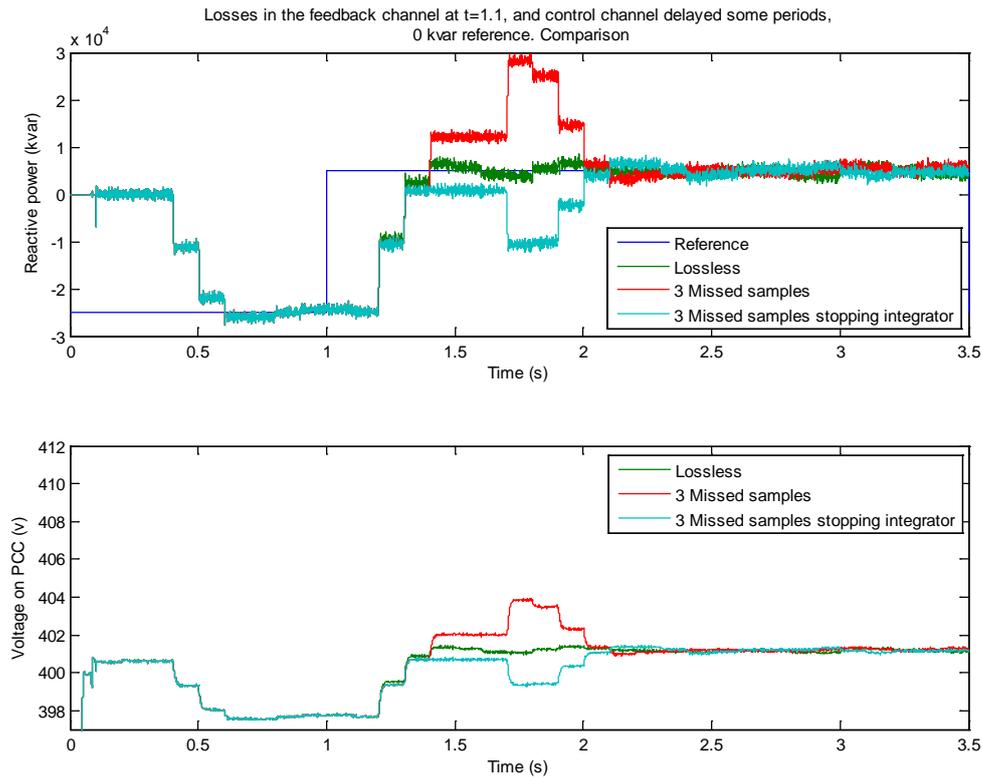


Figura 6.29 Comparativa de la evolución de la potencia reactiva y tensión en el PCC con salto de referencia de 30 kVAR y pérdidas en ambas señales con una diferencia de 6 muestras entre ambas perdiendo primero el canal de realimentación, al aplicar la solución propuesta

Se puede ver cómo los resultados al aplicar la solución corrigen la señal evitando el sobreimpulso al recuperar las comunicaciones y reduciendo la salida durante la pérdida de estas.

6.4.2.2.7 Respuesta al escalón con pérdidas en el canal de actuación y posteriormente en ambos canales

En el caso de perder antes el canal de actuación, la salida se mantendrá idéntica a la anterior, y el comportamiento será muy similar al caso de perder solo el canal de actuación. La recuperación de las comunicaciones provocará, al ser de forma simultánea, un sobreimpulso en la salida igual que en el caso de la pérdida de actuación.

En las siguientes figuras se representan los resultados de la simulación introduciendo hasta 7 periodos de diferencia en la pérdida del canal de actuación. En la Figura 6.30 se muestra la potencia reactiva y en la Figura 6.31 la tensión en el PCC.

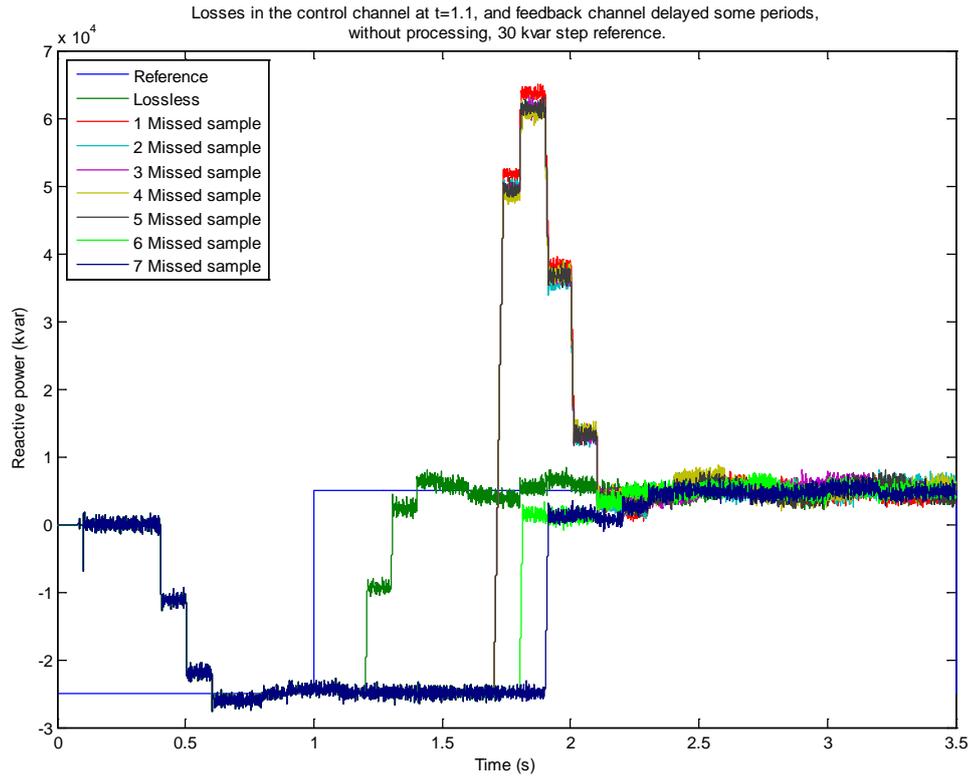


Figura 6.30 Evolución de la potencia reactiva con salto de referencia de 30 kVAR y pérdidas, primero en actuación, después en realimentación, en función de la diferencia de periodos entre ambas.

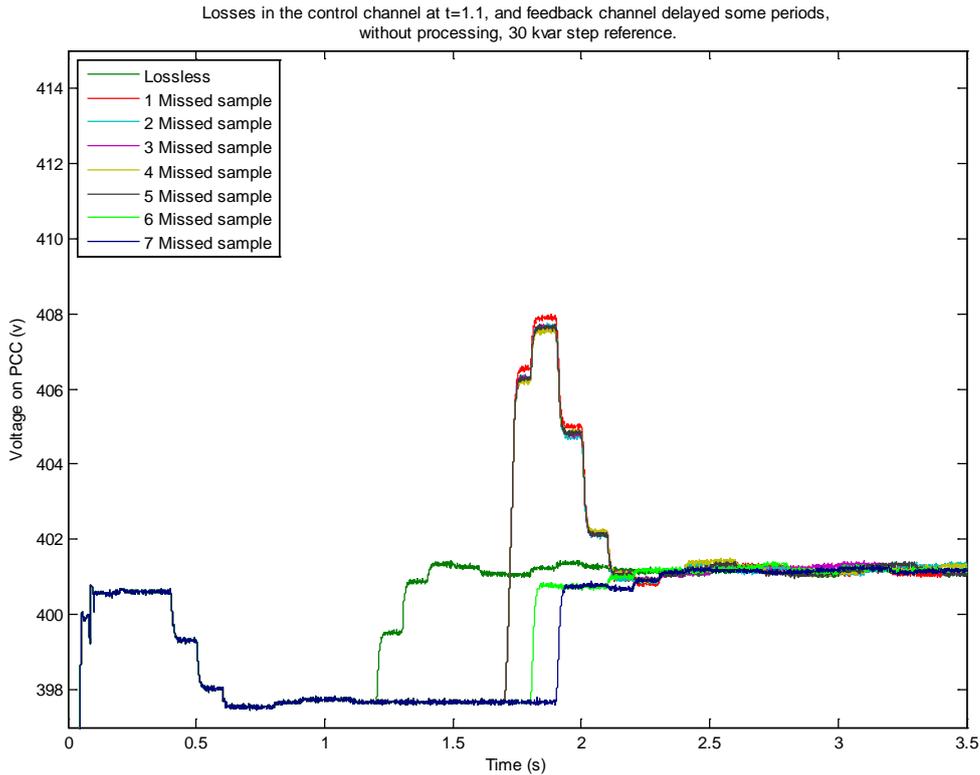


Figura 6.31 Evolución de la tensión en el PCC con salto de referencia de 30 kVAr y pérdidas, primero en actuación, después en realimentación, en función de la diferencia de periodos entre ambas

Se puede observar cómo el comportamiento es prácticamente el mismo que en el caso de perder solo el canal de actuación, sin existir apenas diferencia entre los distintos casos de desfase en la pérdida de las comunicaciones de ambos canales.

Al aplicar la solución propuesta, se eliminará el sobreimpulso, exactamente como sucede en el caso de pérdidas en la actuación únicamente. En la Figura 6.32 se muestra la evolución de la potencia reactiva y en la Figura 6.33 la evolución de la tensión en el PCC.

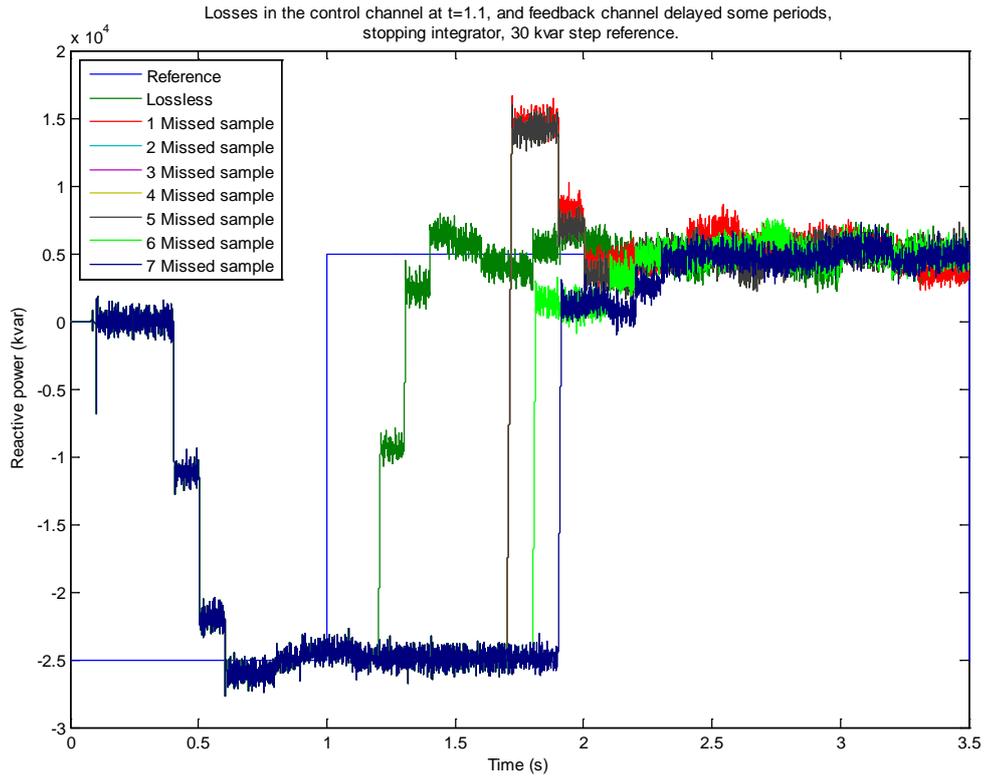


Figura 6.32 Evolución de la potencia reactiva con salto de referencia de 30 kVAr y pérdidas, primero en actuación, después en realimentación, aplicando la solución propuesta

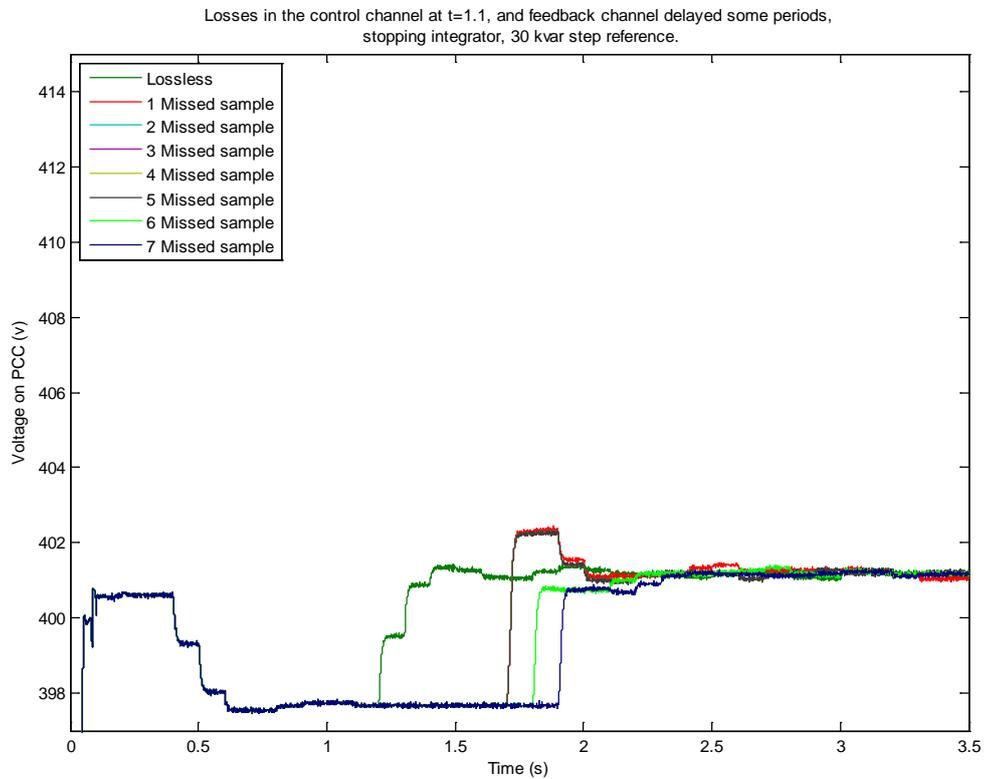


Figura 6.33 Evolución de la tensión en el PCC con salto de referencia de 30 kVAr y pérdidas, primero en actuación, después en realimentación, aplicando la solución propuesta

Se puede observar cómo el sobreimpulso desaparece, y la tensión en el PCC se estabiliza a 401 V, siempre con el retardo producido por la pérdida de comunicaciones. El comportamiento es el mismo que en el caso de perder únicamente el canal de actuación.

En la Figura 6.34 se muestra una comparativa entre el sistema sin pérdidas, con 7 periodos perdidos en el canal de actuación desde $t = 1.1$ s y 4 periodos perdidos en el canal de realimentación desde $t = 1.4$ s, y con este último caso y aplicando la solución propuesta. En la parte superior se puede ver la evolución de la potencia reactiva y en la parte inferior, la representación de la tensión en el PCC.

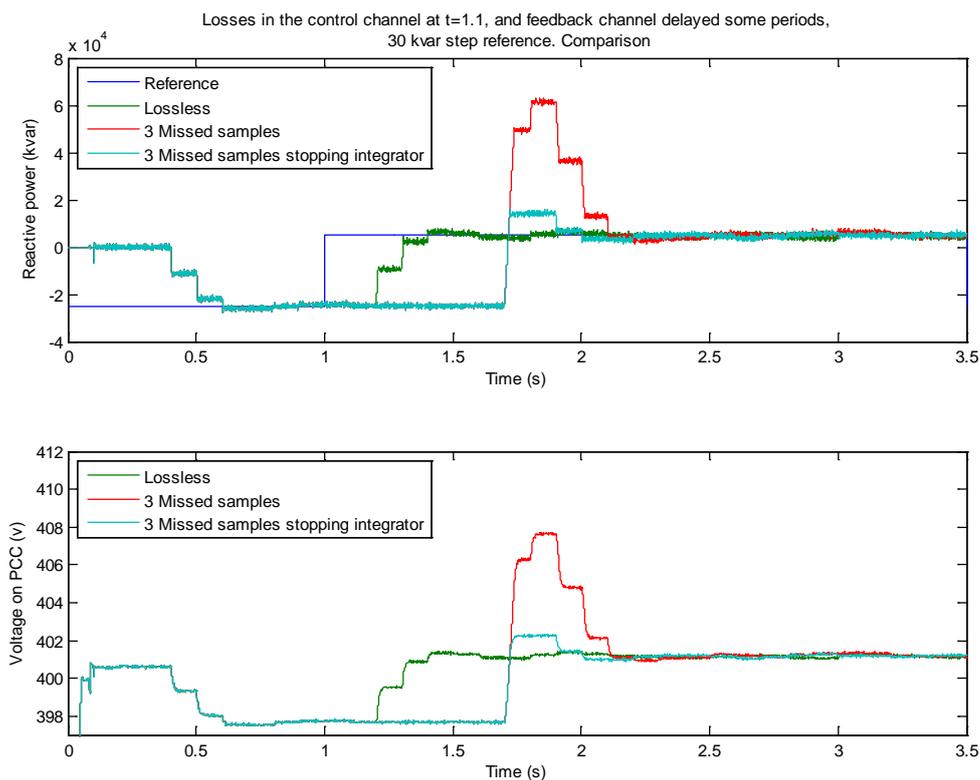


Figura 6.34 Comparativa de la evolución de la potencia reactiva y tensión en el PCC con salto de referencia de 30 kVAr y pérdidas en ambas señales con una diferencia de 6 muestras entre ambas perdiendo primero el canal de actuación, al aplicar la solución propuesta

Se puede ver cómo no hay diferencia entre este caso y el caso de la pérdida del canal de actuación, como era de esperar.

6.4.3 Experimentación en entorno real

La comprobación de los efectos de los diferentes tipos de pérdidas de comunicación se experimentará en los ensayos que se describen a continuación en un entorno real. Con la configuración experimental descrita en el apartado 3.3 se ha evaluado el comportamiento del sistema funcionando como dispositivo de soporte de red, y el efecto de las soluciones propuestas.

Estas pruebas demuestran la correlación entre la simulación y un sistema real.

Se propone realizar una serie de experimentos con la plataforma descrita, introduciendo retardos en las comunicaciones para poder observar el efecto sobre la red.

Estos experimentos se dividen en cuatro grupos

1. Sin pérdidas
2. Con pérdidas en el envío de la actuación
3. Con pérdidas en la recepción de la medida
4. Con pérdidas en ambos segmentos desfasadas entre ellas

Para cada grupo, se ha realizado una batería de experimentos, atendiendo a la referencia aplicada al control secundario. Se han aplicado tres tipos de referencia:

1. Un escalón de -25 kVAr a 5 kVAr en $t = 0.4$ s
2. Un escalón de -25 kVAr a 15 kVAr en $t = 0.4$ s y a 5 kVAr en $t = 0.7$ s
3. Un escalón de -25 kVAr a -15 kVAr en $t = 0.4$ s y a 5 kVAr en $t = 0.7$ s

Con el objetivo de simular los efectos que las pérdidas de comunicación podrán ocasionar en un sistema completo real, dado que las pérdidas tienen carácter estocástico no reproducible a voluntad, se han emulado las pérdidas en las comunicaciones introduciendo una serie de retardos en la aplicación. Así se comprueba el comportamiento de peor caso.

En el caso de tener pérdidas en uno solo de los canales, se introducen 5 muestras de retardo coincidiendo con el primer cambio de referencia. En el caso de pérdidas en ambos canales, se simula una pérdida de comunicación en el canal de realimentación de tres periodos, y a continuación la pérdida de ambos canales durante dos periodos más. En el caso de que se perdieran antes las comunicaciones en el canal de actuación, o de forma simultánea en ambos canales, los resultados serían iguales a los que se obtienen al perder únicamente el canal de actuación, tal y como se pudo comprobar en las simulaciones en los apartados 6.4.2.2.5 y 6.4.2.2.7 respectivamente.

6.4.3.1 Resultados experimentales

En comparación con los resultados de la simulación y en base a sus resultados, se han obviado las pruebas con referencia 0 kVAr, dada su escasa relevancia.

Al aplicar cada tipo de referencia sin pérdidas en ningún canal se establece una base para la comparación de los resultados en los diferentes casos y con las diferentes soluciones propuestas.

6.4.3.1.1 Resultados con pérdidas en el canal de actuación

Cuando se produce un corte en el canal de envío de la señal de actuación a la planta, el sistema mantiene el último valor recibido, por lo que no habrá variación durante la pérdida, pero al recuperar

el funcionamiento normal, el integrador habrá crecido provocando un sobreimpulso proporcional al tiempo de recuperación. Además, se producirá un retardo en la respuesta del sistema inherente a la propia pérdida de comunicaciones.

Con la parada del integrador, este sobreimpulso debe desaparecer, al haberse mantenido estática la parte del integrador, pero se produce una pequeña oscilación al recuperar las comunicaciones por el retardo de una muestra en el sistema de detección de pérdidas. En cambio, al acelerar la aplicación de las muestras, el sobreimpulso se mantiene pero la derivada de la señal disminuye, haciendo menos abrupto el cambio de potencia. Al combinar ambas soluciones, se consigue reducir tanto el sobreimpulso como el retardo producido por la pérdida de comunicaciones.

En la Figura 6.35 se representan los resultados de la simulación introduciendo 7 periodos de pérdida en el canal de actuación, con un salto de referencia en $t = 0.4$ s.

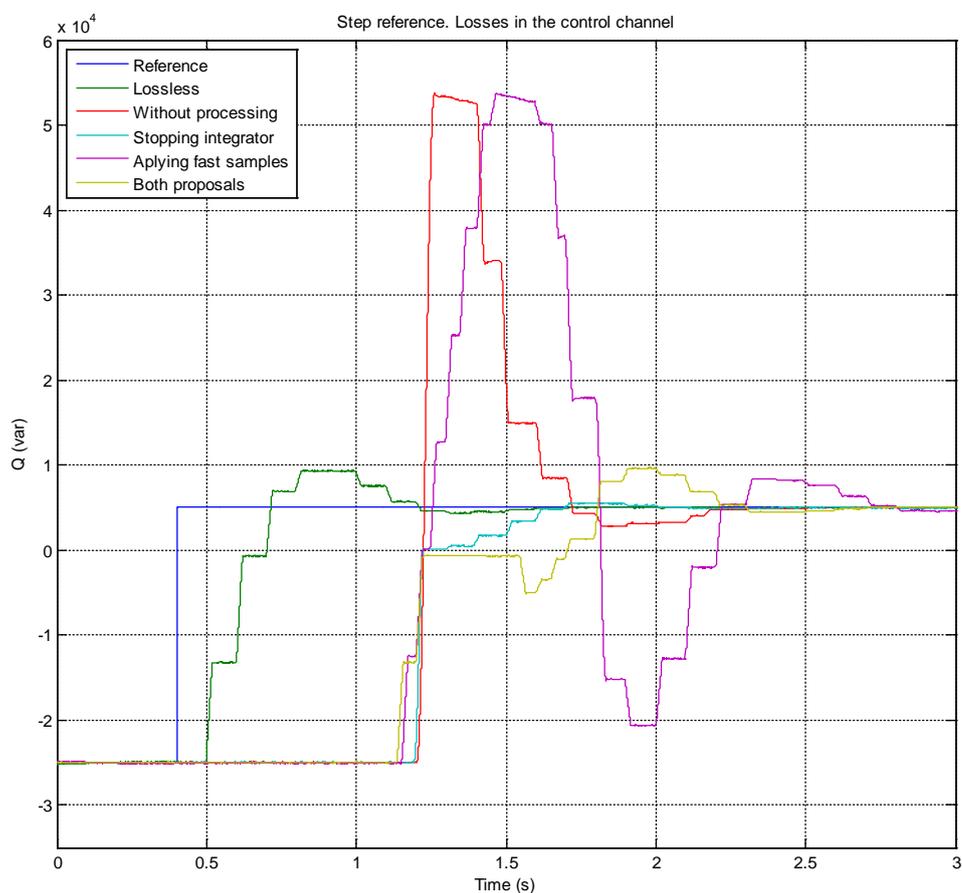


Figura 6.35 Evolución de la potencia reactiva con un salto de referencia de 30 kVAr en $t = 0.4$ s y pérdidas en la señal de actuación aplicando las soluciones propuestas

Se puede observar como con 7 muestras perdidas, el sobreimpulso llega a saturar la salida del convertidor en 50 kVAr, lo que podría hacer que el sistema se volviese inestable si se produjese repetidamente.

Al detener el integrador se produce una oscilación en el momento de recuperar las comunicaciones debido al retardo de una muestra en la detección, lo que implica que no se ha integrado el último valor por estar desactivado, tal y como se vio en las simulaciones.

Con la aceleración de las muestras se observa como disminuye la pendiente en la potencia reactiva, aumenta el tiempo de establecimiento y el sobreimpulso crece ligeramente.

Al mezclar ambas soluciones, se obtiene una respuesta similar a la obtenida al parar el integrador, pero se puede observar como: a) la señal tiene un punto intermedio limitando la velocidad de variación de potencia, y b) tarda algo más de tiempo en producirse la oscilación debido a la aplicación de las muestras almacenadas, aumentando también el tiempo de establecimiento. Al comparar los resultados, se observa cómo la potencia que maneja el convertidor es prácticamente igual a los resultados en el caso de que no hubiera existido el corte en las comunicaciones, exceptuando el retardo introducido por la comunicación.

En la Figura 6.36 se representan los resultados del experimento introduciendo 7 periodos de pérdida en el canal de actuación con dos saltos de referencia, el primero a 15 kVAr en $t = 0.4$ s y el segundo a 5 kVAr en $t = 0.7$ s.

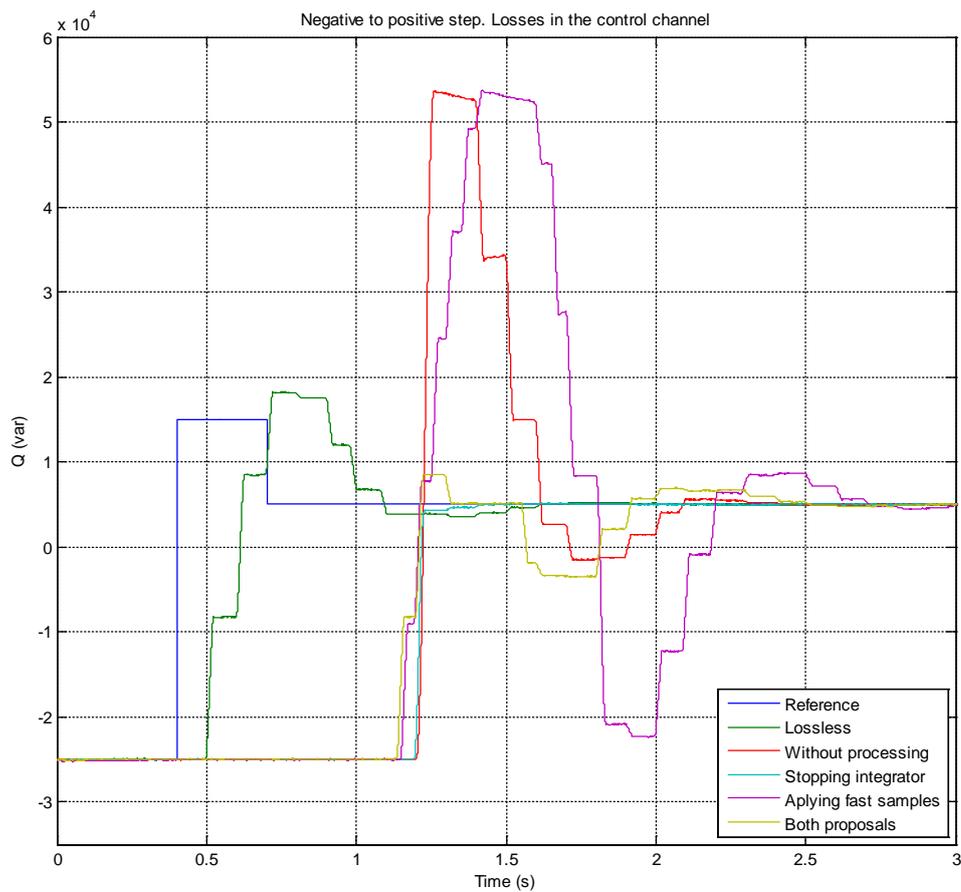


Figura 6.36 Evolución de la potencia reactiva con dos cambios de referencia a 15 kVAr en $t = 0.4$ s y a 5 kVAr en $t = 0.7$ s, y pérdidas en la señal de actuación aplicando las soluciones propuestas

Al introducir un doble escalón, con una referencia final de 5 kVAr, pasando por 15 kVAr, la respuesta en el caso de no aplicar ninguna solución es igual que la anterior, dado que ya estaba saturada y en este caso el escalón es mayor.

Pero al aplicar la parada del integrador se observa que el resultado en este caso no tiene ningún tipo de sobreimpulso. Esto es así porque coincide la salida de actuación tras una muestra perdida, con la referencia.

Por el contrario, se puede observar cómo al aplicar las muestras más rápido hasta recuperar todas las muestras, se produce una oscilación de gran amplitud, y se aumenta significativamente el tiempo de establecimiento.

Al mezclar ambas soluciones, el sobreimpulso es muy pequeño, y el tiempo de establecimiento se reduce debido a esto. La diferencia con la parada del integrador en este caso, no es significativa, ya que coincide la muestra inicial prácticamente con la referencia, por lo que la respuesta es prácticamente ideal por coincidencia.

En la Figura 6.37 se representan los resultados introduciendo 7 periodos de pérdida en el canal de actuación con dos saltos de referencia, el primero a -15 kVAr en $t = 0.4$ s y el segundo a 5 kVAr en $t = 0.7$ s.

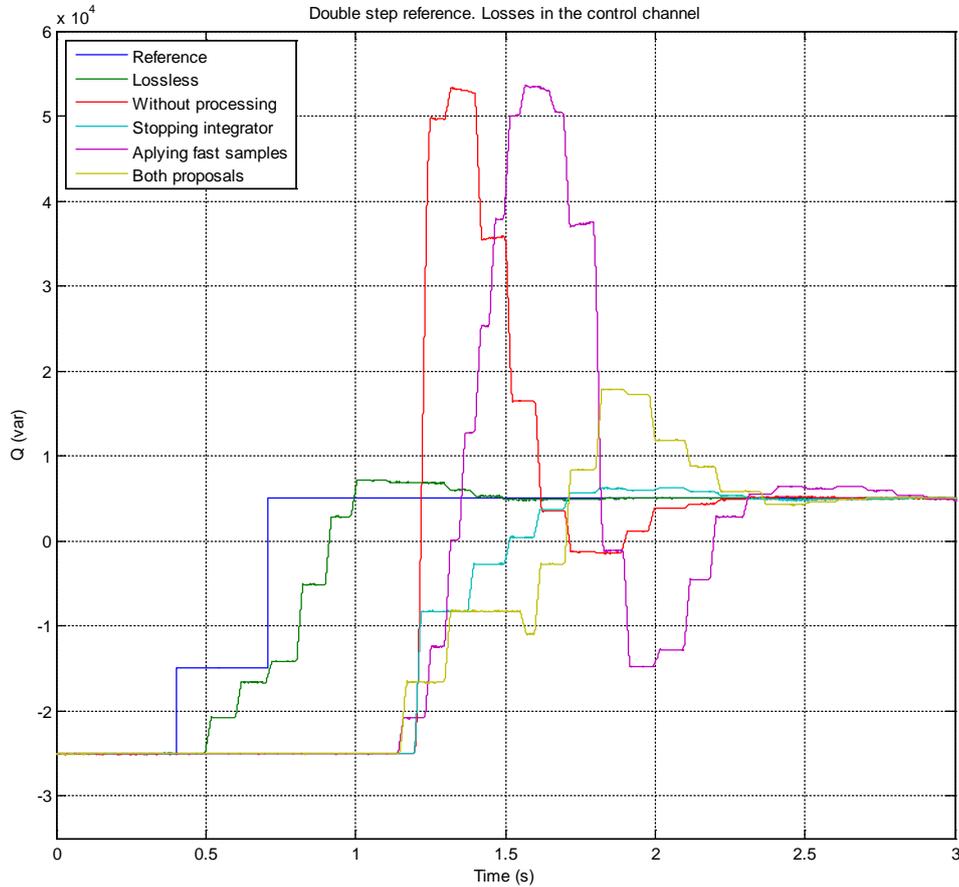


Figura 6.37 Evolución de la potencia reactiva con dos cambios de referencia, primero a -15 kVAr en $t = 0.4$ s y a 5 kVAr en $t = 0.7$ s, y pérdidas en la señal de actuación aplicando las soluciones propuestas

En este caso podemos ver que al suavizar el escalón de referencia, la salida sin aplicar ningún tipo de solución no satura de entrada como en los casos anteriores.

Se puede observar cómo al parar el integrador la respuesta se asemeja al caso sin pérdidas, pero retardado el mismo tiempo que se ha perdido las comunicaciones.

En el caso de acelerar las muestras, el sobreimpulso es similar al producido sin aplicar ninguna corrección, y produce una oscilación mayor.

Al mezclar ambas, tampoco se observa mejoría con respecto a la parada del integrador, dado que al retardo se le suma un sobreimpulso apreciable.

6.4.3.1.2 Resultados con pérdidas en el canal de realimentación

Para el retardo introducido en la realimentación, se producirá un crecimiento lineal de manera proporcional al error al inicio de la pérdida, hasta que se recuperen las comunicaciones, como se muestra en la Figura 6.38, ya que el error en el controlador seguirá constante hasta que reciba una nueva medida del sistema.

Con la parada del integrador, este sobreimpulso debe desaparecer, al haberse mantenido estática la parte del integrador, y aplicarse durante la pérdida una señal intermedia entre la anterior y la referencia. Al recuperar las comunicaciones se produce una pequeña oscilación por el retardo de una muestra en el sistema de detección de pérdidas; se comportará como si se hubiera cambiado la referencia en ese punto, por lo que el sobreimpulso será menor, proporcional al tamaño del nuevo escalón.

En este caso, acelerar las muestras no tiene sentido, dado que la respuesta no obedece al controlador, en cambio, al acelerar la aplicación de las muestras, el sobreimpulso se mantiene, pero la derivada de la señal disminuye, haciendo menos abrupto el cambio de potencia. Al combinar ambas soluciones, se consigue reducir tanto el sobreimpulso como el retardo producido por la pérdida de comunicaciones.

En la Figura 6.38 se representan los resultados de la simulación introduciendo 7 periodos de pérdida en el canal de realimentación con un salto de referencia en $t = 0.4$ s.

Se puede observar cómo con 7 muestras perdidas, el sobreimpulso llega a saturar la salida del convertidor en 50 kVAr, lo que, igual que en el caso del canal de actuación, podría hacer que el sistema se volviese inestable si se produjese repetidamente.

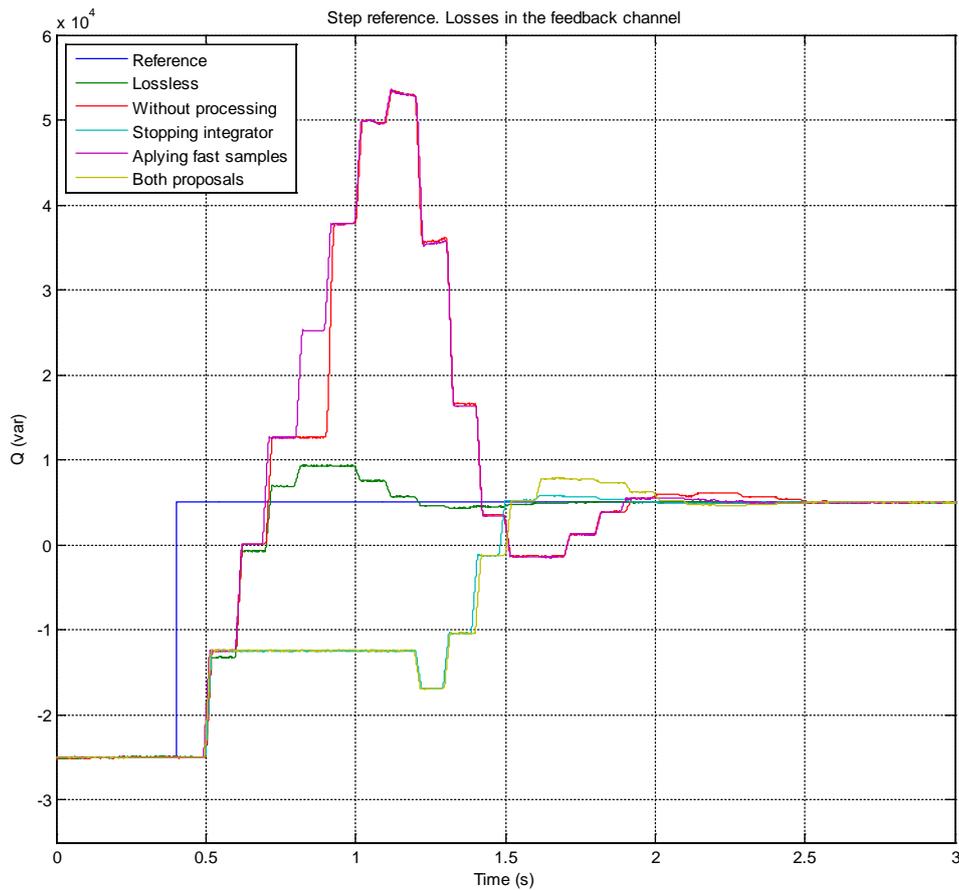


Figura 6.38 Evolución de la potencia reactiva con un salto de referencia de 30 kVAR en $t = 0.4$ s y pérdidas en la señal de realimentación aplicando las soluciones propuestas

Al detener el integrador se produce una oscilación en el momento de recuperar las comunicaciones debido al retardo de una muestra en la detección, lo que implica que no se ha integrado el último valor por estar desactivado, tal y como se vio en las simulaciones.

Con la aceleración de las muestras, al no aplicarse en este caso, se puede ver que la salida es igual que la obtenida en el caso de no aplicar ninguna corrección.

En la Figura 6.39 se representan los resultados introduciendo 7 periodos de pérdida en el canal de realimentación con dos saltos de referencia, el primero a 15 kVAR en $t = 0.4$ s y el segundo a 5 kVAR en $t = 0.7$ s.

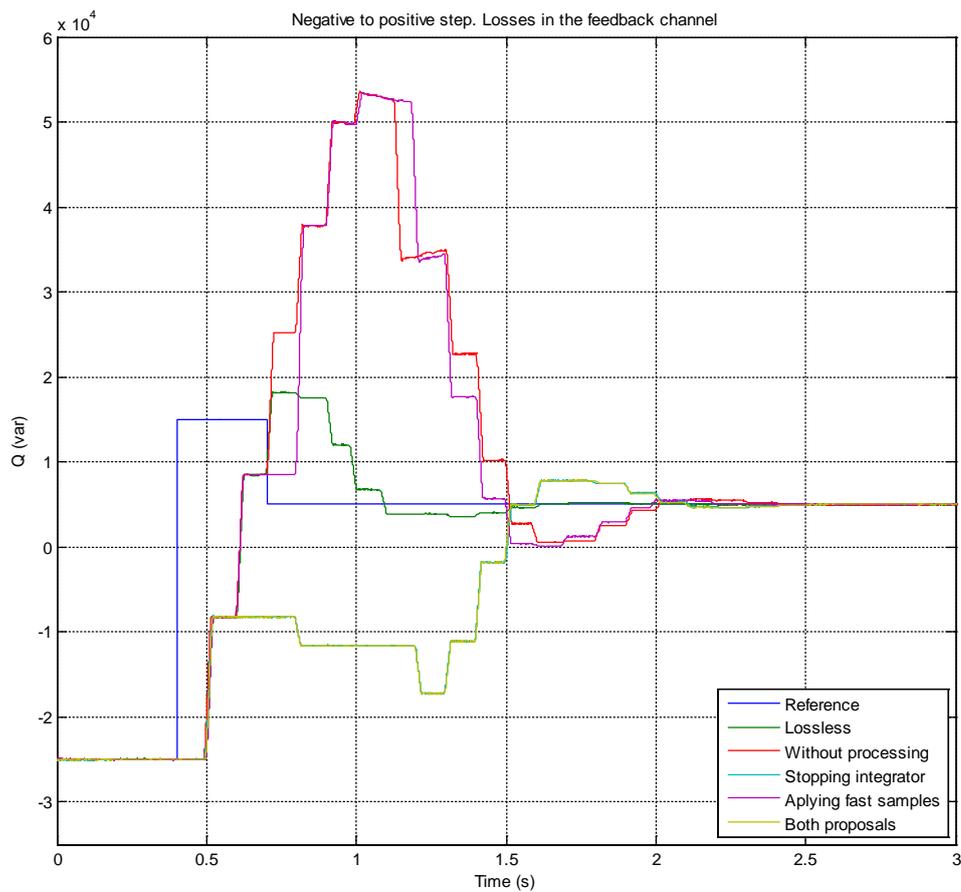


Figura 6.39 Evolución de la potencia reactiva con dos cambios de referencia a 15 kVAr en $t = 0.4$ s y a 5 kVAr en $t = 0.7$ s, y pérdidas en la señal de realimentación aplicando las soluciones propuestas

Al introducir un doble escalón, con una referencia final de 5 kVAr, pasando por 15 kVAr, la respuesta en el caso de no aplicar ninguna solución es igual que en el caso de un solo escalón, dado que ya estaba saturada y en este caso el escalón es mayor.

Pero al aplicar la parada del integrador se observa que el resultado varía junto a la referencia, siempre con un periodo de retardo. Esto se debe a que, al no haber realimentación, no se actúa sobre el lazo de control, teniendo un error proporcional a la diferencia entre la referencia anterior y la actual.

En el caso de aplicar las muestras almacenadas con un periodo menor, aunque no debería haber ninguna diferencia, igual que en el caso anterior, se observa un corte en el canal de actuación en $t = 0.7$ s. En este caso el corte se produce al realizar el experimento con la solución de muestras almacenadas, lo que implica una variación en $t = 1.1$ s por la aplicación de la última muestra.

En la Figura 6.40 se representan los resultados de la simulación introduciendo 7 periodos de pérdida en el canal de realimentación con dos saltos de referencia, el primero a -15 kVAr en $t = 0.4$ s y el segundo a 5 kVAr en $t = 0.7$ s.

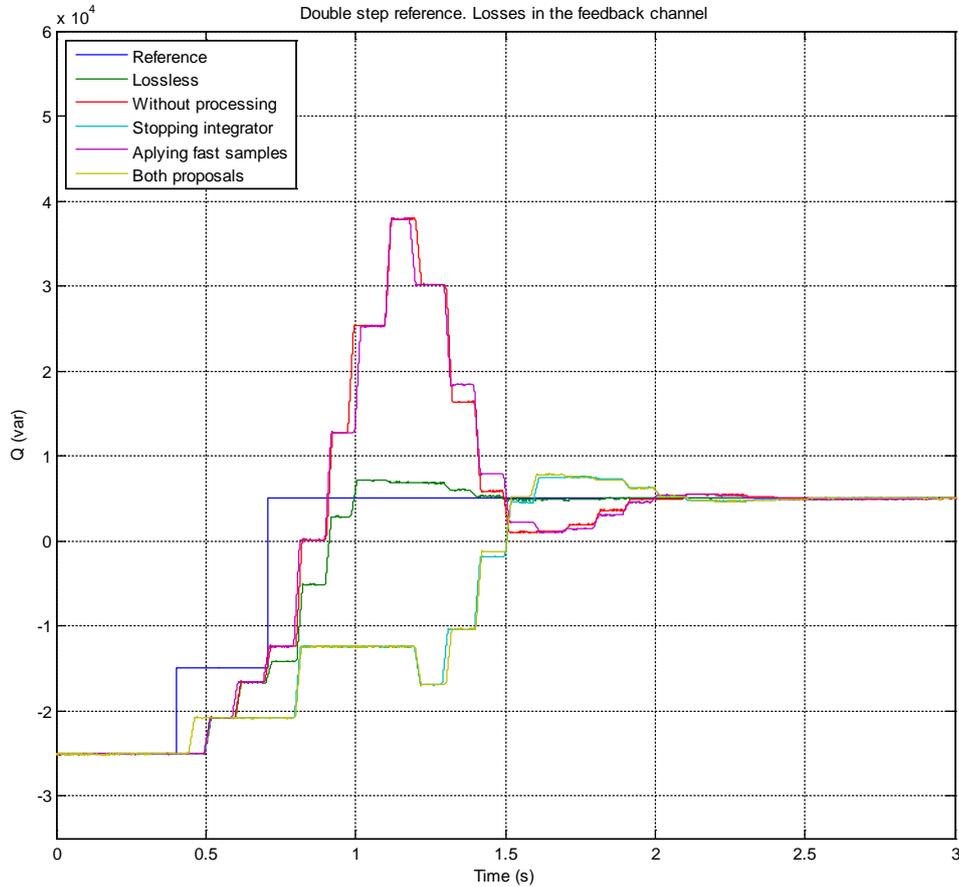


Figura 6.40 Evolución de la potencia reactiva con dos cambios de referencia a -15 kVAr en $t = 0.4$ s y a 5 kVAr en $t = 0.7$ s, y pérdidas en la señal de actuación aplicando las soluciones propuestas

En este caso podemos ver que al suavizar el escalón de referencia, la salida, sin aplicar ningún tipo de solución, no satura de entrada como en los casos anteriores.

Se puede observar cómo al parar el integrador la respuesta se asemeja al caso sin pérdidas, pero retardado el mismo tiempo que se ha perdido las comunicaciones y con una pequeña oscilación al recuperar la comunicación.

En el caso de acelerar las muestras y de aplicar ambas soluciones, como en los dos casos anteriores, no hay diferencia ya que no se puede aplicar la solución de acelerar las muestras. Pero en este caso no existe ninguna pérdida en el canal de actuación durante los experimentos.

6.4.3.1.3 Resultados con pérdidas en ambos canales

Tal y como se observó en las simulaciones, en el caso de perder ambos canales simultáneamente, los resultados son iguales que en el caso de perder el canal de actuación únicamente. Por lo que los experimentos se han hecho simulando una pérdida en el canal de realimentación en $t = 0.4$ s y añadir la pérdida del canal de actuación en $t = 0.7$ s.

De este modo, se observará en los resultados una composición de los dos casos anteriores en sus tres experimentos.

En la Figura 6.41 se representan los resultados introduciendo 7 periodos de pérdida en el canal de realimentación y 4 en el canal de actuación; con un salto de referencia en $t = 0.4$ s.

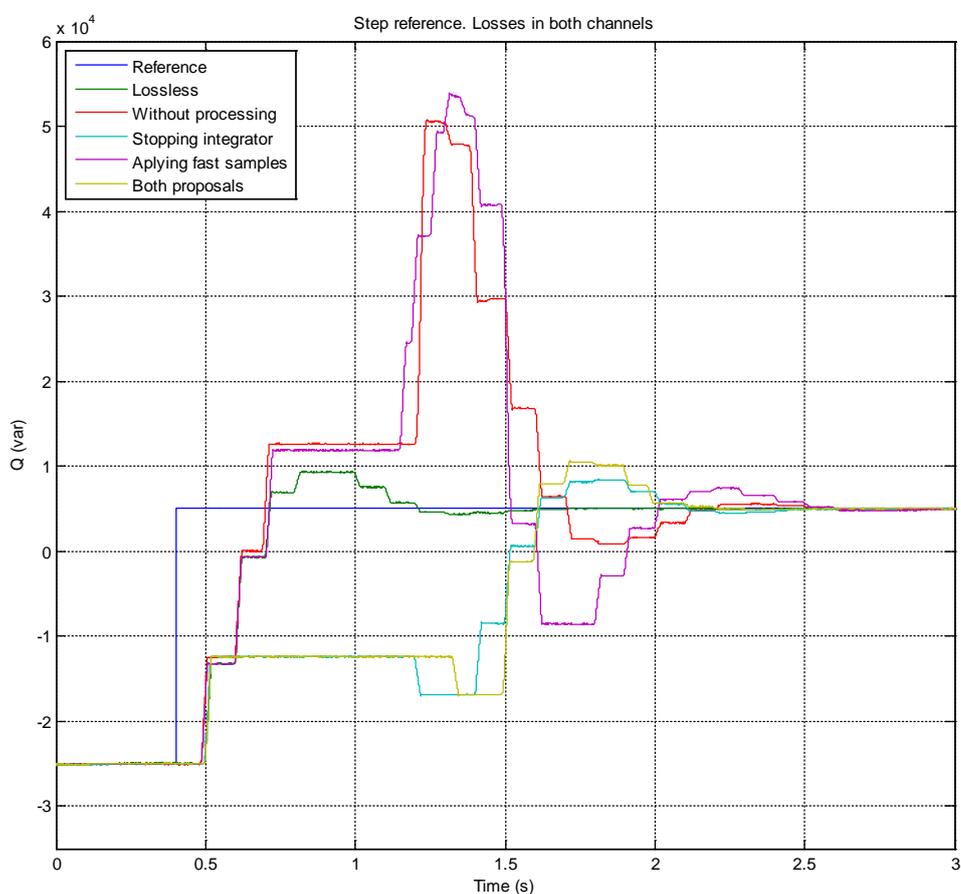


Figura 6.41 Evolución de la potencia reactiva con un salto de referencia de 30 kVAR en $t = 0.4$ s y pérdidas en ambos canales aplicando las soluciones propuestas

Se puede observar cómo se comporta igual que en el caso de pérdida en el canal de realimentación hasta $t = 0.7$ s, y a partir de ahí, mantiene el último valor. De modo que en el caso de aplicar las muestras almacenadas durante la pérdida, el sobreimpulso se prolonga y aumenta, llegando a saturar el convertidor. Sin embargo, al parar el integrador, la respuesta tiene un sobreimpulso mucho menor, aunque superior a las pérdidas en los canales por separado. Al juntar ambas soluciones, se

reduce la pequeña oscilación al recuperar las comunicaciones, y, aunque el sobreimpulso es mayor, se estabiliza antes que en el caso de la parada del integrador.

En la Figura 6.42 se representan los resultados introduciendo 7 periodos de pérdida en el canal de realimentación y 4 en el canal de actuación; con dos saltos de referencia, el primero a 15 kVAr en $t = 0.4$ s y el segundo a 5 kVAr en $t = 0.7$ s.

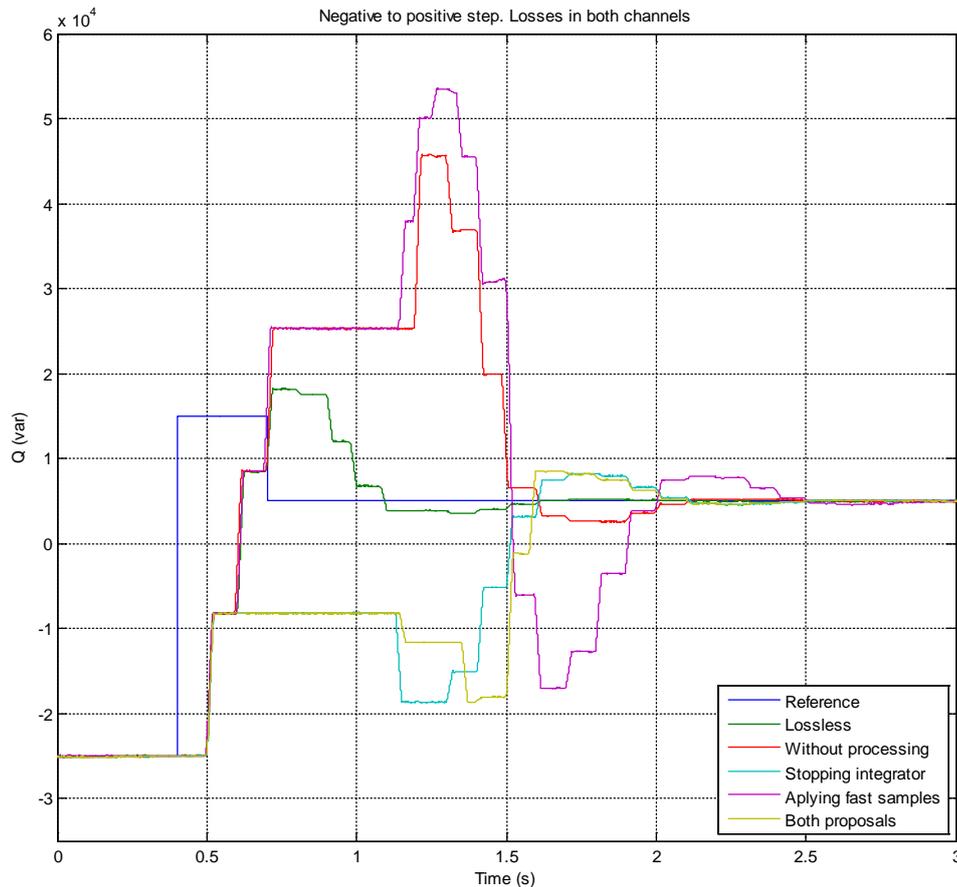


Figura 6.42 Evolución de la potencia reactiva con dos cambios de referencia a 15 kVAr en $t = 0.4$ s y a 5 kVAr en $t = 0.7$ s, y pérdidas en la señal de actuación aplicando las soluciones propuestas

En este caso, se observa mejor la diferencia entre parar el integrador y aplicar ambas soluciones. En el caso de aplicar las muestras almacenadas durante la pérdida reduciendo el periodo de aplicación, se observa una oscilación mayor que en el caso anterior.

En la Figura 6.43 se representan los resultados introduciendo 7 periodos de pérdida en el canal de realimentación y 4 en el canal de actuación; con dos saltos de referencia, el primero a -15 kVAr en $t = 0.4$ s y el segundo a 5 kVAr en $t = 0.7$ s.

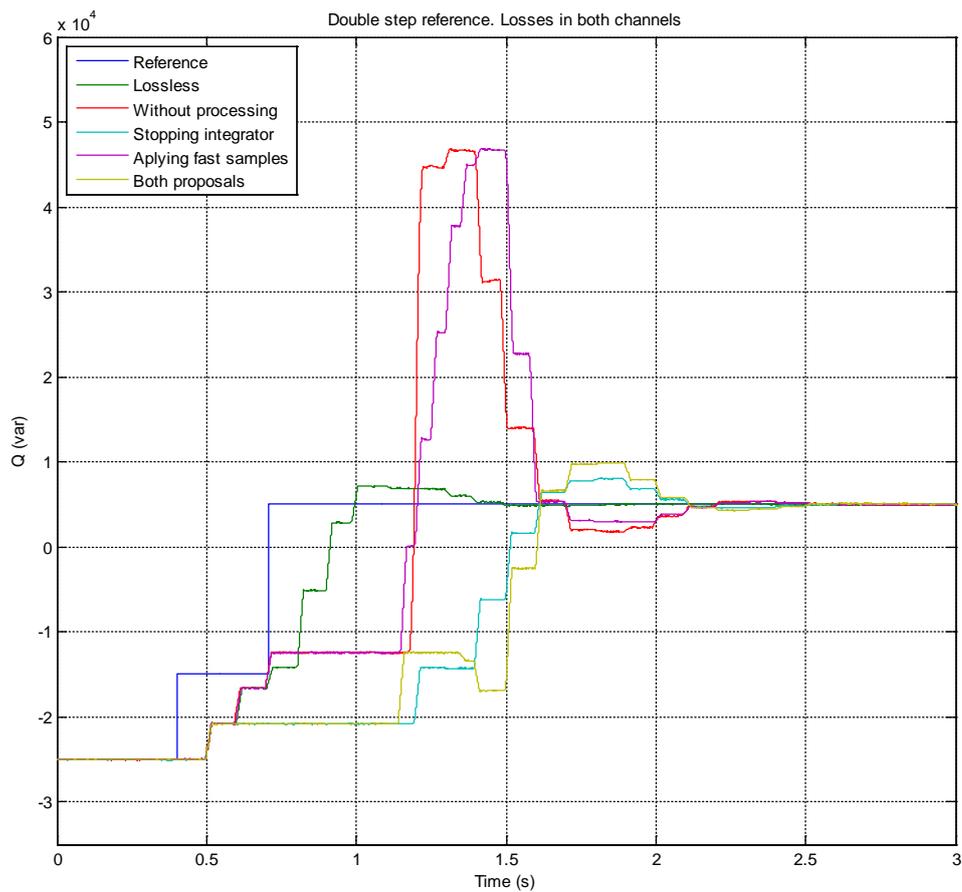


Figura 6.43 Evolución de la potencia reactiva con dos cambios de referencia a -15 kVAR en $t = 0.4 \text{ s}$ y a 5 kVAR en $t = 0.7 \text{ s}$, y pérdidas en la señal de actuación aplicando las soluciones propuestas

En este caso podemos ver que al suavizar el escalón de referencia, la salida se suaviza en todos los casos, dado que el error inicial que produce el aumento del integrador durante el tiempo sin conexión es menor que en los otros casos.

6.4.3.2 Comparativa de las soluciones mediante los índices IAE, ISE, ITAE e ITSE

Para establecer una comparación entre las soluciones propuestas, se han calculado los índices descritos en el apartado 6.3.1. De este modo se pueden comparar en las diferentes situaciones, tanto valorando los tiempos de establecimiento, pequeñas oscilaciones y grandes desviaciones.

En las siguientes figuras se pueden ver las comparaciones para cada índice.

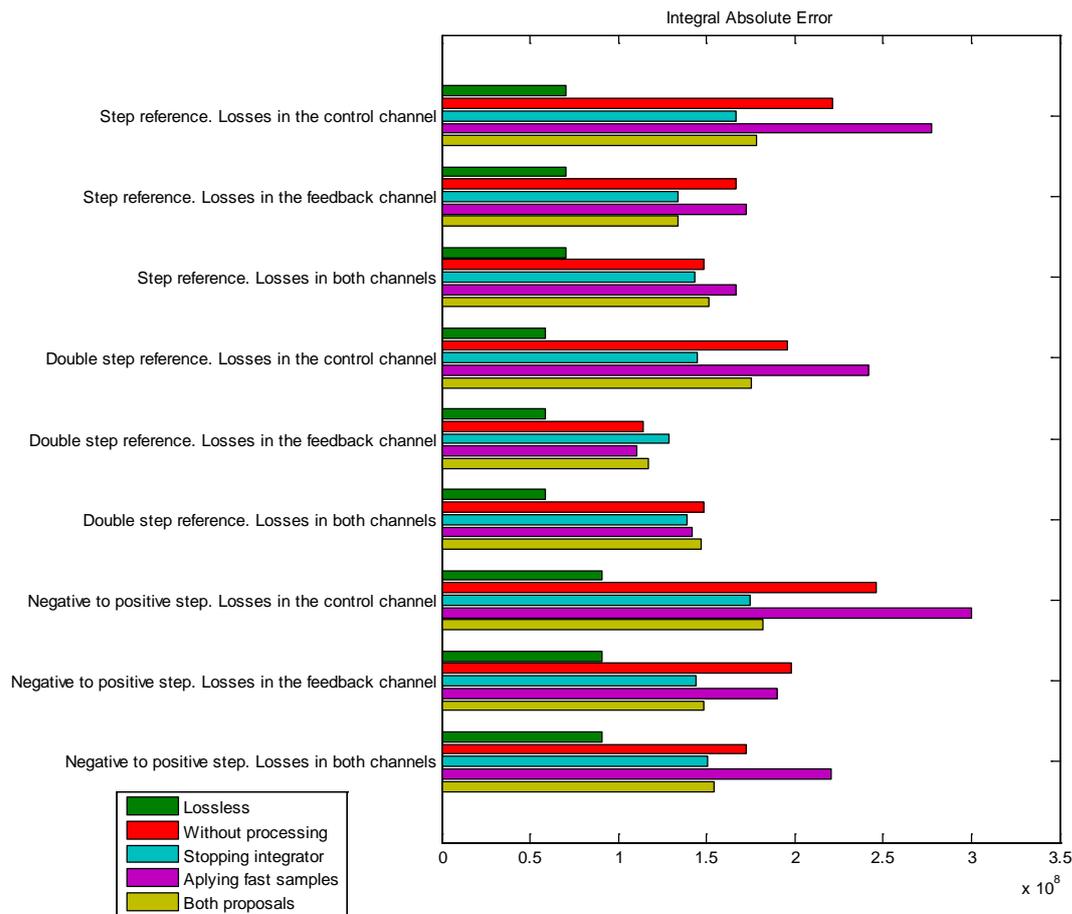


Figura 6.44 Comparativa del IAE de los casos presentados.

Este índice aporta información sobre el error de forma proporcional e independiente a lo largo del experimento.

Para las pérdidas del canal de actuación, la solución de parar el integrador mejora en aproximadamente un 30% la respuesta independientemente de la referencia aplicada. Se observa también que la solución de aplicar las muestras perdidas al recuperar la comunicación empeora con respecto a no hacer nada y que aplicar ambas soluciones es algo peor que parar el integrador.

En el caso de las pérdidas del canal de realimentación, la diferencia entre no aplicar solución y aplicar las muestras rápido, se debe a las pérdidas explicadas a lo largo del apartado 6.4.3.1.2. En el caso de dos saltos de referencia se observa el único caso en el que empeora la parada del integrador sobre no hacer nada, y esta diferencia no es significativa.

En el caso de las pérdidas en ambos canales, no hay diferencia significativa que destacar entre las soluciones y no aplicar procesamiento.

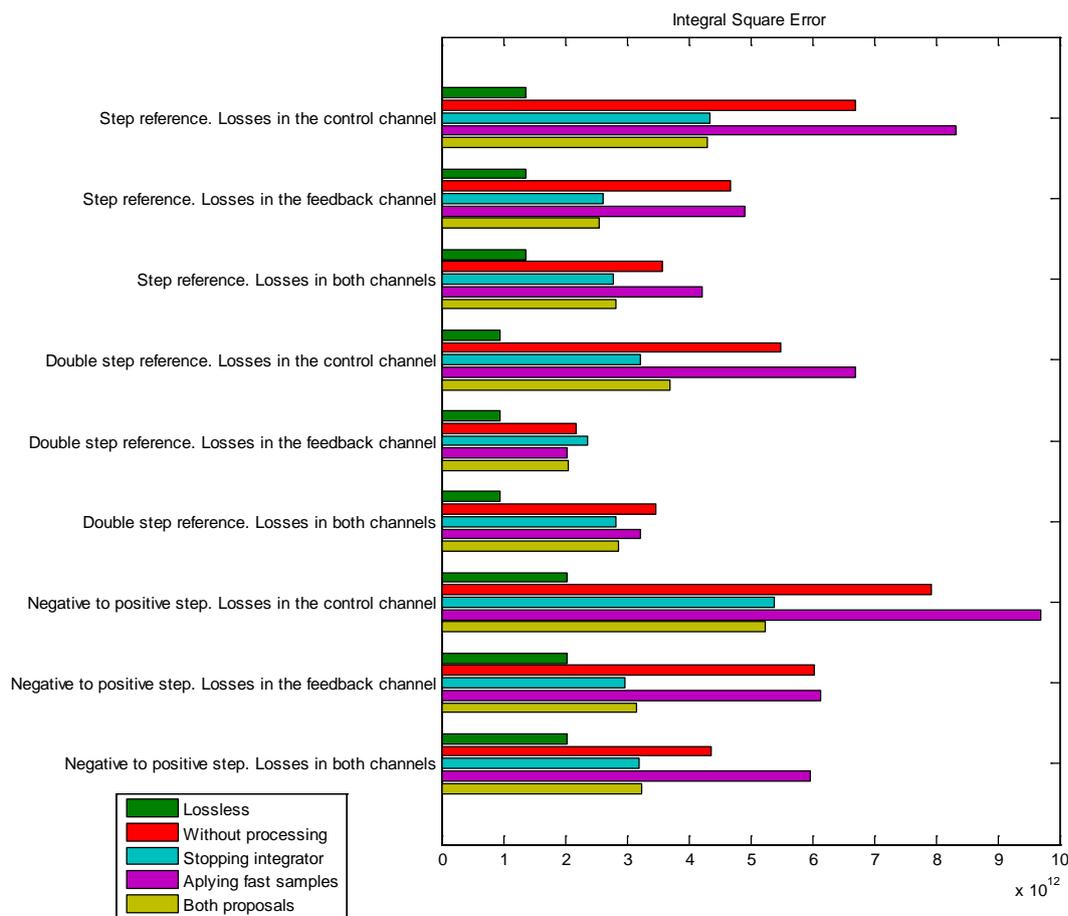


Figura 6.45 Comparativa del ISE de los casos presentados.

Este índice aporta información sobre el error, teniendo en cuenta en mayor medida las oscilaciones grandes y despreciando los pequeños errores.

Para las pérdidas del canal de actuación, la solución de parar el integrador mejora en aproximadamente un 30% la respuesta independientemente de la referencia aplicada. Se observa también que la solución de aplicar las muestras perdidas al recuperar la comunicación empeora con respecto a no hacer nada y que aplicar ambas soluciones es algo peor que parar el integrador.

En el caso de las pérdidas del canal de realimentación, la diferencia entre no aplicar solución y aplicar las muestras rápido, se debe a las pérdidas explicadas a lo largo del apartado 6.4.3.1.2. En el caso de dos saltos de referencia se observa el único caso en el que empeora la parada del integrador sobre no hacer nada, y esta diferencia no es significativa.

En el caso de las pérdidas en ambos canales, no hay diferencia significativa que destacar entre las soluciones y no aplicar procesamiento.

En resumen, potencia las diferencias grandes entre los valores con respecto al IAE y reduce las pequeñas.

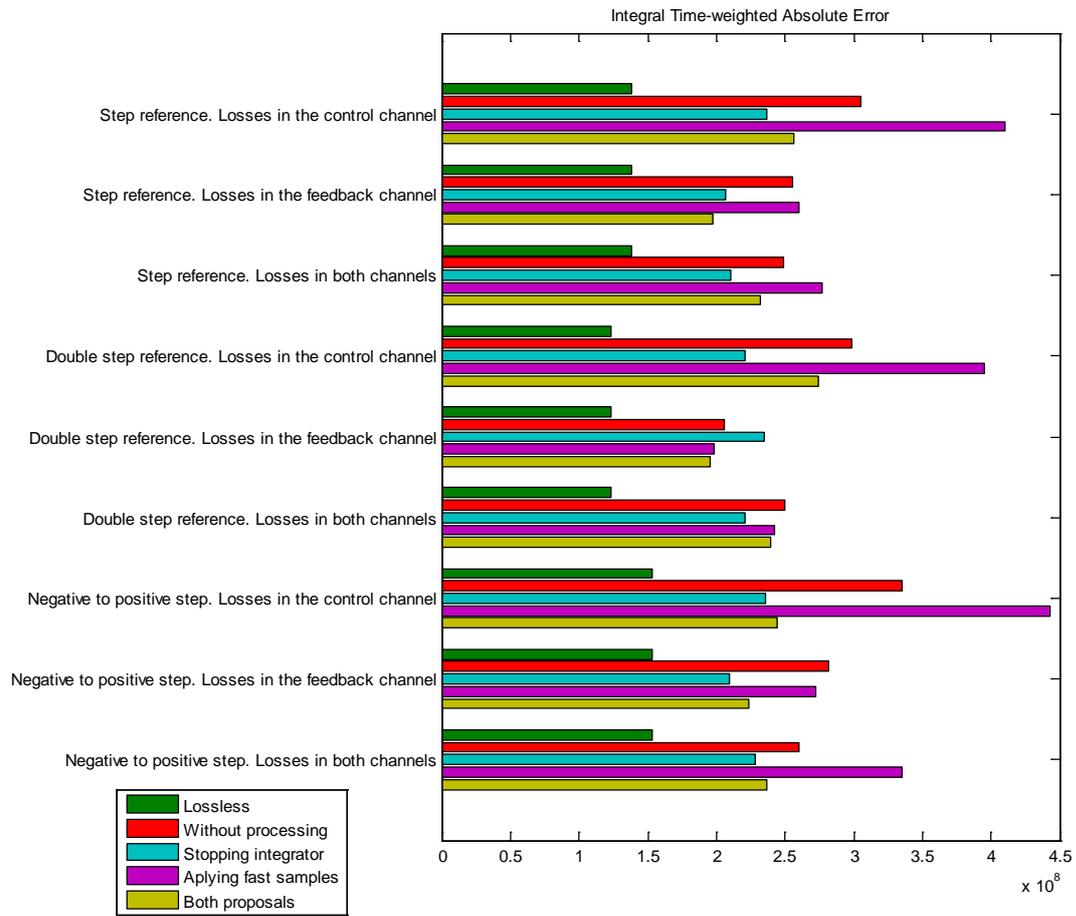


Figura 6.46 Comparativa del ITAE de los casos presentados.

Este índice aporta información sobre el error de forma proporcional, pero dependiente del tiempo, mostrando información sobre la duración de los transitorios.

Las diferencias con el IAE, son mínimas.

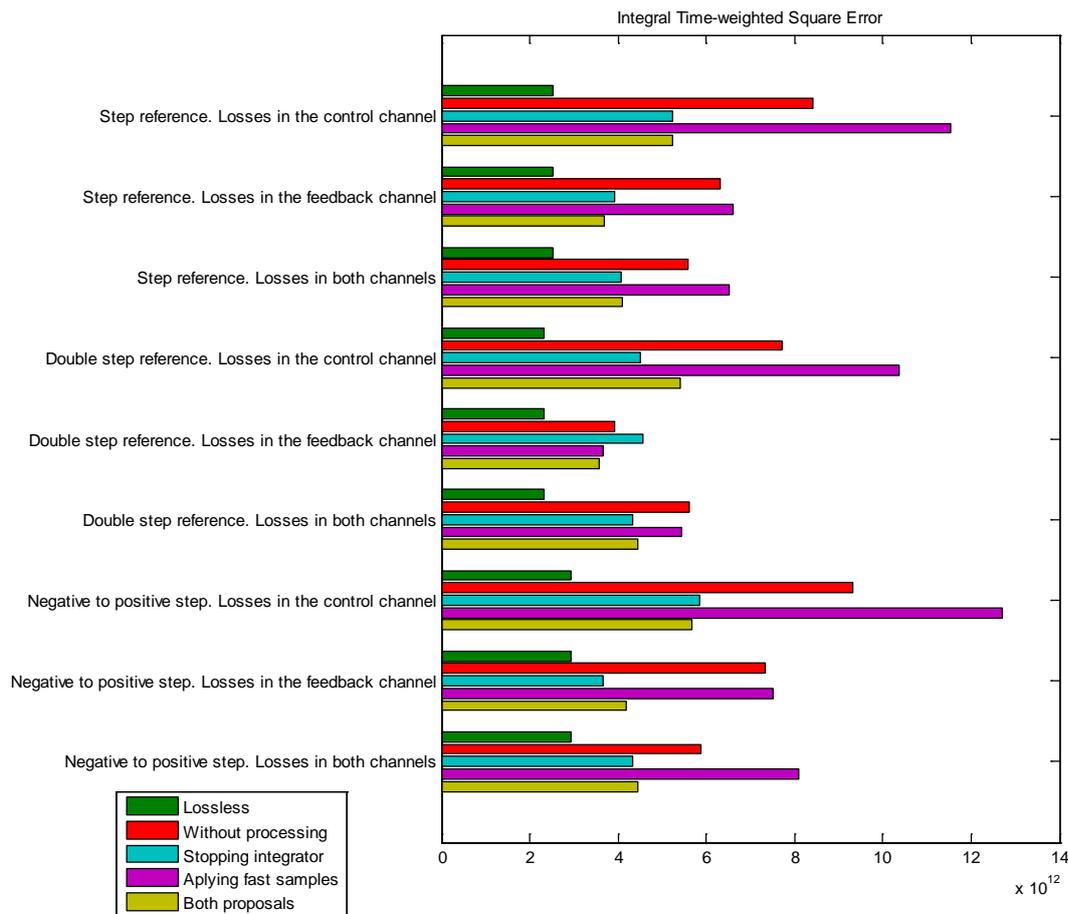


Figura 6.47 Comparativa del ITSE de los casos presentados.

Este índice aporta información sobre el error, teniendo en cuenta en mayor medida las oscilaciones grandes y despreciando los pequeños errores, pero dependiente del tiempo, mostrando información sobre la duración de los transitorios.

Las diferencias con el ITSE, son mínimas.

Por lo tanto, se puede extraer que según los índices calculados a partir de los experimentos realizados, la solución de parar el integrador durante las pérdidas de comunicación es la propuesta que mejores resultados obtiene. También se puede observar que el cálculo de los índices teniendo en cuenta el tiempo no aporta mayor información.

6.5 Conclusiones

En este capítulo se ha analizado el comportamiento de las comunicaciones en un sistema de control de tres niveles, habitual en WACS. El caso presentado se corresponde con la aplicación de un convertidor funcionando en modo STATCOM para dar soporte de tensión a la red eléctrica.

Se ha analizado el comportamiento de los retardos producidos por las componentes estocásticas de las redes de datos no dedicadas en los lazos de control y se han propuesto dos métodos para paliar los efectos producidos, logrando reducir el sobreimpulso y el retraso de la señal eléctrica debidos a los retardos y pérdidas de comunicaciones.

Se demuestra cómo introduciendo pequeñas mejoras que tienen en cuenta la naturaleza estocástica del comportamiento de los canales de comunicación, se puede conseguir un aumento en la robustez del sistema. Esta robustez implica una tolerancia a la pérdida puntual de comunicaciones mientras se conserva el servicio proporcionado por el sistema en el soporte de red. El aumento de la tolerancia en los retardos en el lazo de control que se consigue incrementa el máximo retardo admisible antes de hacer el sistema inestable.

En simulación se ha probado la solución propuesta de saturar el controlador atendiendo a la pérdida de comunicación. Con esta propuesta se ha reducido en todos los casos el sobreimpulso en la respuesta, de valores en torno al 300%, a valores que van desde un 0% de sobreimpulso, semejante al caso de referencia sin pérdida de comunicaciones, a casos extremos de pérdidas en el canal de actuación donde al recuperar la comunicación tras siete muestras perdidas, se ha obtenido un sobreimpulso del 30%. Además, al aplicar esta propuesta, el sistema se mantiene estable de forma indefinida, con error constante, en el ámbito del controlador secundario.

En los resultados experimentales se corroboran las simulaciones. Además, se ha aplicado la propuesta de la recuperación de tramas y se ha aplicado una solución que combina ambas propuestas.

En el caso de recuperar únicamente las tramas y aplicarlas con un periodo menor, se observa que, aunque el sobreimpulso y el retardo de la estabilización del sistema se mantienen, el escalón producido en el sobreimpulso tiene una derivada menor. Y al unir ambas propuestas, mejora esta derivada y el tiempo de establecimiento se reduce respecto al caso de aplicar solo la saturación del controlador. Usando como métrica de comparación los índices de integración del error, se puede observar que en el caso de aplicar dos cambios de referencia durante la pérdida del canal de realimentación, es mejor aplicar la propuesta de recuperación de tramas, pero en el resto de los casos, saturar el controlador obtendrá mejores resultados. La aplicación de ambas simultáneamente no mejora en ningún caso a ambas propuestas por separado.

Capítulo 7.

Conclusiones y trabajos futuros

7.1 Conclusiones

En esta Tesis se ha analizado la influencia de las TICs en las redes inteligentes.

Se han propuesto una serie de experimentos para la caracterización de los principales canales de comunicación utilizados en la red eléctrica de distribución y de canales para el uso en aplicaciones de control de red.

Se ha propuesto e implementado un entorno de pruebas para la experimentación con lazos de control incluyendo distintos canales de comunicaciones. Este entorno está operativo en el laboratorio del Grupo GEISER de la Universidad de Alcalá. Con este entorno se han realizado las pruebas en el convertidor descritas en esta Tesis. Este entorno ha sido el objeto de las publicaciones [F. J. Rodríguez, et al. 2009] y [Bueno, et al. 2009].

Utilizando como punto de partida el modelado este sistema, se han propuesto una serie de mejoras al modelo para incluir la detección de pérdidas del canal de comunicaciones, de forma que se pueda realizar un análisis completo previo de los efectos de las comunicaciones en un entorno real.

Se han definido y analizado los parámetros a considerar de los canales de comunicación para su aplicación en sistemas de medida y control de área extensa. Estos parámetros son la latencia, ancho de banda, disponibilidad y variación de la latencia a lo largo del tiempo.

Se ha definido un procedimiento para calcular la latencia de forma estadística, utilizando modelos de Markov, aproximando los valores de latencia en función de la ocupación de la red de comunicaciones. También se ha analizado el comportamiento estadístico de la disponibilidad a partir de la fiabilidad del sistema.

Asimismo, se ha propuesto un método de análisis de los resultados de las medidas de la latencia. Con este método también se puede extrapolar el parámetro de disponibilidad a partir de los tiempos máximos permisibles en cada controlador.

Con este método se han analizado los canales comúnmente utilizados en los dos casos de uso que se estudian en esta Tesis, elegidos por ser paradigmáticos dentro de las redes inteligentes de energía. Estos son los canales móviles GPRS y 3G, y los canales de tierra por cable ADSL y Ethernet, observando resultados aplicables a los casos de uso que se han estudiado.

En el caso de Ethernet se ha contrastado el resultado obtenido con el resultado medido, obteniendo una confirmación del método.

En los dos casos de uso, se analiza la influencia de las comunicaciones en la calidad de servicio proporcionada por el sistema de distribución de la red eléctrica y sobre un lazo de control en red aplicado a RRII para el control de la tensión en un punto de acoplamiento común.

En el caso de la calidad de servicio, se ha hecho una comprobación de los indicadores obtenidos al aplicar los resultados obtenidos sobre los canales de comunicación, obteniendo una variación que puede llegar al 22% sobre la estimación, en el escenario en el que se aplique autocalibración a la red eléctrica.

Finalmente, ante las propuestas de soluciones a las interrupciones y retardos en las comunicaciones de saturar el controlador en base a la detección de las pérdidas de comunicación y de la aplicación de las tramas recuperadas, se ha concluido que con estas técnicas se consigue una reducción en el sobreimpulso de la respuesta del sistema que puede llegar a bajar de un 350% en el caso de aplicar el controlador sin ningún tipo de detección, a un 30% en el peor de los casos, y a ser anulado en gran parte de los ensayos. Esta reducción dota al sistema de una robustez añadida que permite las mejoras intrínsecas a las comunicaciones, limitando los daños que se pueden llegar a producir en el caso de que estas fallen.

7.2 Trabajos futuros

Se proponen las siguientes líneas como trabajos futuros:

En la línea del entorno de pruebas sobre el STATCOM, el control colaborativo entre varios convertidores con cargas variables supondría un incremento cualitativo. Se propone la implementación de dicho entorno utilizando las comunicaciones locales para simular un controlador de tercer nivel. Para generalizar al entorno completo de una micro red, también se deberían añadir cargas variables programables.

Las comunicaciones dentro del control de convertidores electrónicos de potencia cada vez van a tener más presencia. Estas comunicaciones pueden ser incluidas en los lazos de alto nivel, que tienen requerimientos de tiempos de establecimiento poco estrictos, y en lazos de control de primer

nivel, donde los tiempos de muestreo son muy críticos, alrededor de 100 μ s, y por tanto los tiempos de las comunicaciones dentro de estos slots de control debe suponer un 10 o un 20%. Esto último sería empleado en el control distribuido de convertidores de media tensión. Se propone como trabajo futuro realizar un análisis de los sistemas de comunicación desarrollados en esta Tesis y analizar cómo aplicarlo en este tipo de aplicaciones.

También, en la línea del controlador secundario, se puede analizar la posibilidad de introducir la detección de pérdidas de comunicación como parámetro en un lazo de control borroso, modificando las constantes del controlador en base a dichas pérdidas.

En la línea de la influencia en los índices de calidad, proponer un método para estudiar el control distribuido de los algoritmos de self-healing de la red, teniendo en cuenta la influencia de las comunicaciones.

Apéndice A.

Descripción de un STATCOM

A.1 Introducción a los STATCOM

Un STATCOM (STATic COMpensator) es un dispositivo de compensación estático, cuyo funcionamiento se basa en un convertidor que modula una fuente de tensión en la amplitud, fase y frecuencia deseada. A través del control del convertidor, esta fuente se construye de manera que genera o consume la potencia reactiva requerida.

La Figura A.1 muestra el esquema más simple de un STATCOM. Consta de un convertidor conectado entre la red y una etapa de corriente continua. El sistema de control mide las tensiones y corrientes alternas en la red para regular el intercambio de reactiva, y la tensión en la etapa de continua para mantenerla a un nivel constante y estable.

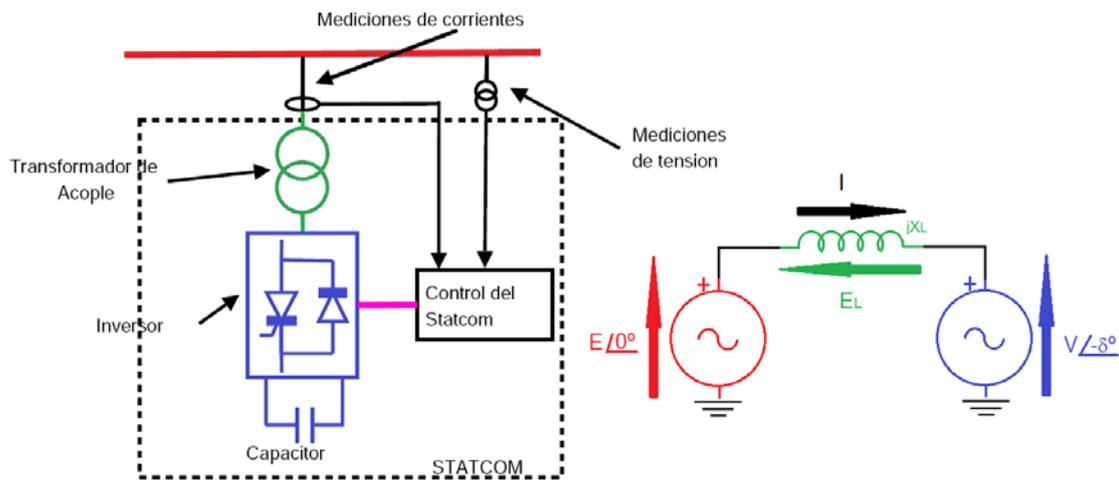


Figura A.1. Esquema general de un STATCOM y el circuito unifilar simplificado.

La Figura A.2 representa la operación de un STATCOM, de acuerdo al esquema unifilar simplificado representado en la Figura A.1. La tensión V representa la referencia de tensión aplicada al generador PWM del convertidor, y por tanto el armónico fundamental de la tensión en los pines de salida del convertidor, antes de las inductancias del filtro de red, mientras que E es la tensión en el punto de acoplamiento del PCC y δ es el desfase entre las tensiones E y V . Como se puede comprobar, en función del modo de operación del STATCOM, la magnitud de la tensión E cambia considerablemente. Esto hay que tenerlo en cuenta, porque la tensión del DC-bus tendrá que tener

un valor tal que asegure la correcta operación del convertidor, de forma que nunca entren en conducción los diodos de libre circulación del convertidor, durante la normal operación del convertidor, lo cual es especialmente crítico en modo capacitivo, que es cuando la tensión E es más elevada, y también V , en el caso de tener una impedancia de línea elevada. Pero, por otro lado, cuando el convertidor está operando en modo inductivo, puede ocurrir que el índice de modulación tome valores bajos, debido a que E toma un valor bastante más bajo que en modo capacitivo, lo que empeora el THD de la corriente que se entrega a la red. Con objeto de atender estas dos situaciones, se recomienda el uso de referencias de DC-bus variables, para asegurar correcta operación en modo capacitivo, y además un THD dentro de especificaciones en modo inductivo.

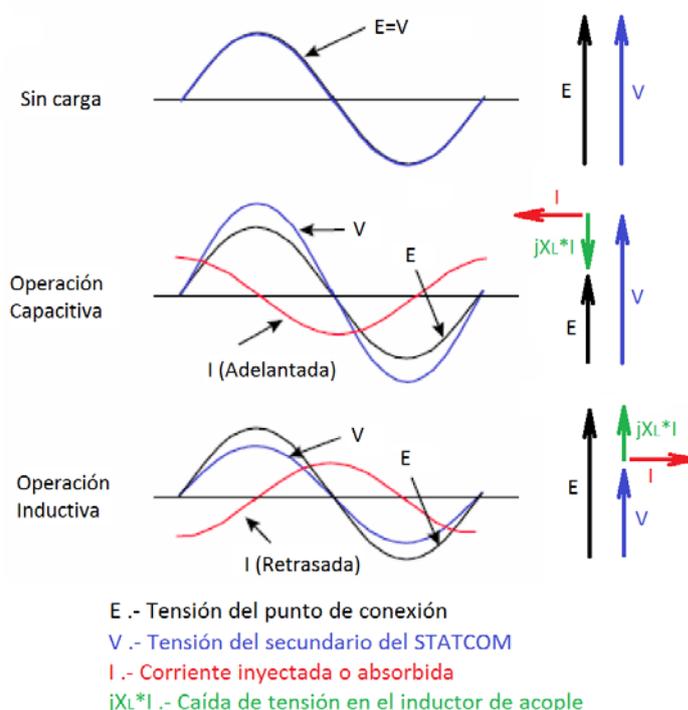


Figura A.2. Formas de onda de un STATCOM.

Así, el STATCOM es un dispositivo capaz de aportar corriente reactiva, dentro de los límites térmicos de los semiconductores, independientemente del nivel de tensión en la red, salvo excepciones. La Figura A.3 muestra la característica tensión-corriente típica de un STATCOM. Puede observarse que, al contrario que los compensadores tradicionales, un STATCOM es capaz de aportar corriente reactiva a tensiones muy bajas. Idealmente debería llegar a cero, pero aproximadamente a 0.2 pu de la tensión nominal, es el umbral que se fija para que pase a comportarse como una resistencia, y esto es debido a las pérdidas propias del convertidor.

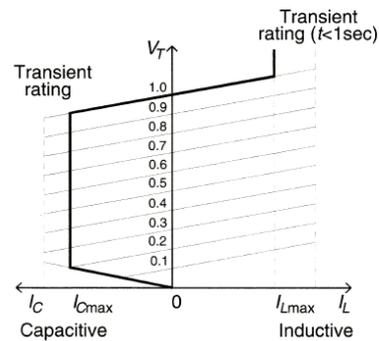


Figura A.3. Característica tensión-corriente de un STATCOM.

Los semiconductores utilizados suelen ser IGBTs y GTOs, dependiendo de la aplicación. La modulación de la onda de tensión puede ejecutarse de varias formas. Lo normal es utilizar una modulación por ancho de pulso (PWM). Este tipo de modulación exige, para construir una onda con pocos armónicos a bajas frecuencias, conmutaciones muy rápidas de los semiconductores. Por esta razón, y por las elevadas tensiones a soportar, en aplicaciones para la red de transporte se aplican otros esquemas de modulación más complejos que reparten el trabajo entre un elevado número de semiconductores, por ejemplo, los basados en topologías multinivel.

Para profundizar más en la operación y aplicaciones de los STATCOM y los dispositivos FACTS en general, se recomienda revisar la referencia [Hingorani, N., Gyugyi, L. 2000].

A.2 Generalidades del sistema de control

La Figura A.4 representa el diagrama de bloques de la propuesta de controlador que se va a implementar en el STATCOM. El sistema de control se basa en una estructura de controladores SISO conectados en cascada, con dos lazos internos de controladores de corriente y dos lazos de control superior, uno para potencia activa y otro para potencia reactiva. El ajuste de las constantes del controlador se basa en hacer siempre los controladores internos 10 veces más rápidos que los externos, de forma que al sintonizar los externos, no se toma en cuenta la dinámica de los lazos de control internos. Esto facilita mucho el ajuste de los parámetros de los controladores, pero tiene como inconveniente que es necesario emplear períodos de muestreo como máximo de alrededor de 200 μs , para que el lazo de control completo tenga tiempos de establecimiento, como máximo, de las centenas de ms.

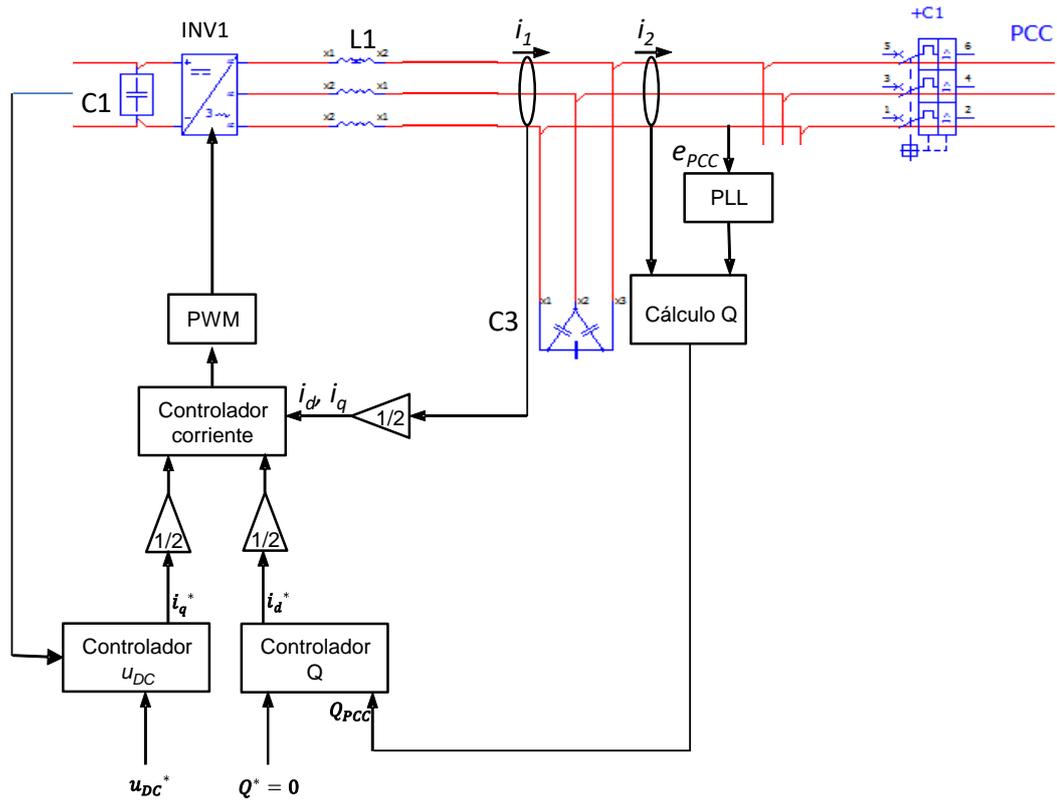


Figura A.4. Diagrama de bloques del controlador del STATCOM

Todas las transformaciones de ejes abc a ejes dq , que se van a emplear en el proyecto, son invariantes en potencia (ver apéndice A de [Bueno, E. J. 2005]), y tienen las siguientes expresiones:

$$\bar{s}_{\alpha\beta\gamma}(t) = T_{abc \rightarrow \alpha\beta\gamma} \cdot \bar{s}_{abc}(t) = \begin{bmatrix} s_{\alpha}(t) \\ s_{\beta}(t) \\ s_{\gamma}(t) \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} s_a(t) \\ s_b(t) \\ s_c(t) \end{bmatrix} \quad (A.1)$$

$$\bar{s}_{abc}(t) = \begin{bmatrix} s_a(t) \\ s_b(t) \\ s_c(t) \end{bmatrix} = T_{\alpha\beta\gamma \rightarrow abc} \cdot \bar{s}_{\alpha\beta\gamma}(t) = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} s_{\alpha}(t) \\ s_{\beta}(t) \\ s_{\gamma}(t) \end{bmatrix} \quad (A.2)$$

$$\bar{s}_{dq0}(t) = T_{\alpha\beta\gamma \rightarrow dq0} \cdot \bar{s}_{\alpha\beta\gamma}(t) = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} s_{\alpha}(t) \\ s_{\beta}(t) \\ s_{\gamma}(t) \end{bmatrix} \quad (A.3)$$

$$\vec{s}_{\alpha\beta\gamma}(t) = T_{dq0 \rightarrow \alpha\beta\gamma} \cdot \vec{s}_{dq0}(t) = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} s_d(t) \\ s_q(t) \\ s_0(t) \end{bmatrix} \quad (A.4)$$

El PLL es el dispositivo encargado de monitorizar y sincronizar el convertidor con la red eléctrica proporcionando al control la información de la tensión en el PCC, la frecuencia y la fase. El PLL se configura de tal forma que la tensión de red se ubica en el eje q , es decir:

$$\begin{aligned} e_{dPCC} &= 0 \\ e_{qPCC} &= |\vec{e}_{PCC}| \end{aligned} \quad (A.5)$$

Lo que a su vez implica que:

$$\begin{aligned} P_{PCC} &= e_{qPCC} \cdot i_{2q} \\ Q_{PCC} &= e_{qPCC} \cdot i_{2d} \end{aligned} \quad (A.6)$$

Es decir, la potencia activa depende de la corriente por el eje q , y la potencia reactiva de la corriente por el eje d . De esta forma se consigue un control desacoplado de las potencias activa y reactiva, que es lo que se representa en la Figura A.5, exactamente igual que en el control vectorial de máquinas eléctricas.

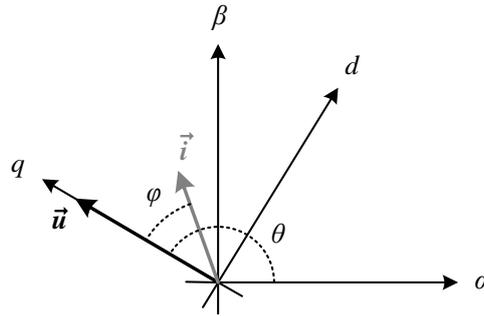


Figura A.5. Ubicación del vector de la tensión en el PCC en los ejes de referencia dq .

Los algoritmos de control se van a programar con un retardo de una muestra, siguiendo el diagrama de flujo y temporal que se muestra en la Figura A.6. La consigna que se aplica al generador PWM en el instante k , se calcula a partir de datos medidos en $k-1$. Esto en Matlab se modela como un retardo computacional, que habrá que tener en cuenta en el diseño del controlador de corriente si el tiempo de establecimiento es inferior a entre 5 y 10 veces el período de muestreo (T_s). En caso contrario, no se tendrá que tener en cuenta.

A modo de resumen, la Tabla A.1, muestra las señales de entrada, salida, tiempos de establecimiento, expresiones matemáticas de los bloques más importantes de la Figura A.4. En [Kuo, B. C. 1996] se muestran las expresiones más destacables del análisis en el dominio de la frecuencia de sistemas de segundo orden.

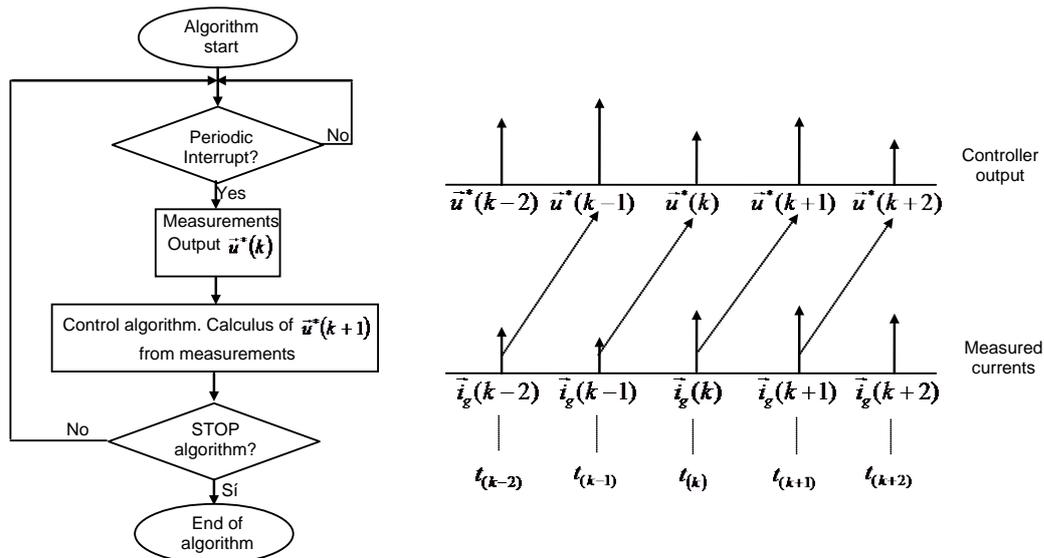


Figura A.6. Diagrama de flujo y temporal del proceso de implementación.

Como se analizó detalladamente en el apartado 3.4.2, en un STATCOM el control de potencia reactiva puede estar formado por tres bloques diferentes:

- Control de Q
- Control de V
- Control de PF (factor de potencia).

Cada uno de los controles representa una funcionalidad de operación del STATCOM. Como los tres actúan sobre el mismo parámetro en el PCC (es decir modifican la potencia reactiva en el PCC, que a su vez modifica la tensión en dicho punto y el factor de potencia), sólo uno de ellos es seleccionable en cada caso. En la última columna de la Tabla A.1 se hace un análisis del control de Q, que es extensible a los otros dos controladores de potencia reactiva.

Los componentes más significativos empleados en el convertidor son, a modo de resumen:

- $L_1 = L_2 = 0.15 \text{ mH}$, con una resistencia de pérdidas de $0.55 \text{ m}\Omega$. Como hay dos convertidores conectados en paralelo, tal como muestra la Figura A.4, la inductancia equivalente será $75 \text{ }\mu\text{H}$.
- $C_3 = 500 \text{ }\mu\text{F}$
- $C_{DC} = \frac{C_1 * C_2}{C_1 + C_2} = 32 \text{ mF}$
- El convertidor se conecta directamente a la red eléctrica de 400 V de tensión eficaz de línea, sin transformador.

Tabla A.1. Descripción de los bloques más característicos de la Figura A.4.

Bloque	Entradas	Salidas	Parámetros de control	Observaciones
PLL	Tensiones de red medidas 400 V	Tensión de red en los ejes $\alpha\beta$ y dq , fase y frecuencia de la tensión de red		En general, la dinámica del PLL no interviene en la dinámica del resto del sistema
Cálculo P, Q	i_d, i_q, e_d y e_q	P y Q en el PCC		Las ecuaciones implementadas son: <ul style="list-style-type: none"> • $P_{PCC} = e_d \cdot i_d + e_q \cdot i_q$ • $Q_{PCC} = -e_d \cdot i_q + e_q \cdot i_d$
Controlador de corriente	Referencias: i_d^*, i_q^* (corrientes de cada inversor) Señales realimentadas: $i_d/2, i_q/2$ (i_d, i_q son corrientes medidas donde se indica en la Figura A.4.)	u_d^*, u_q^* (entradas al bloque generador PWM)	$\xi = 0.707$ (coeficiente de amortiguamiento) $t_s > 10 T_s$ (tiempo de establecimiento)	Teniendo en cuenta que el período de muestreo del control es 200 μ s, se propone emplear un $t_s = 5$ ms
Controlador de u_{DC}	Referencias: u_{DC}^* Señal realimentada: u_{DC}	i_q^* (corriente de los tres inversores)	$\xi = 0.707$ $t_s > 10 t_{scc}$	Se propone emplear un t_s de 50 ms. Este controlador tiene como objetivo mantener la tensión del DC-bus al nivel de la tensión de referencia, compensando posibles pérdidas.
Controlador de Q	Referencias: Q^* Señales realimentadas: Q en el lado de 400 V	i_d^* (corriente de los tres inversores)	$\xi = 0.707$ $t_s > 10 t_{scc}$	Se propone emplear un t_s de 50 ms. Este controlador tiene como objetivo que la red eléctrica vea un DPF = 1.0

A.3 Controladores de corriente

A.3.1 Modelo de la planta

Como se indicó en el Capítulo 3, el filtro de red elegido, es un filtro LC, que realmente se puede analizar como un filtro LCL (Figura A.7), siendo la L_2 del lado de red el equivalente de todas las inductancias de pérdidas (inductancia de cortocircuito) en el punto de conexión del convertidor. La Figura A.8 compara el filtro diagrama de Bode para una fase $\frac{L_2}{u}$, para un filtro L , con un equivalente $L_1 + L_2$ y un filtro LCL.

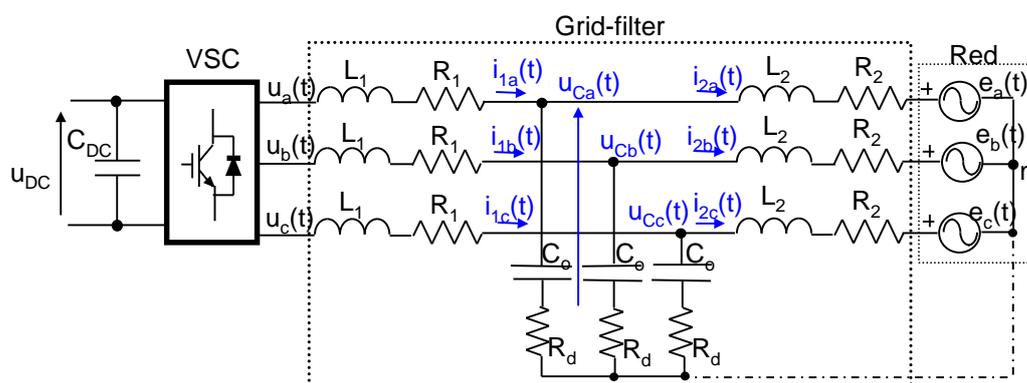
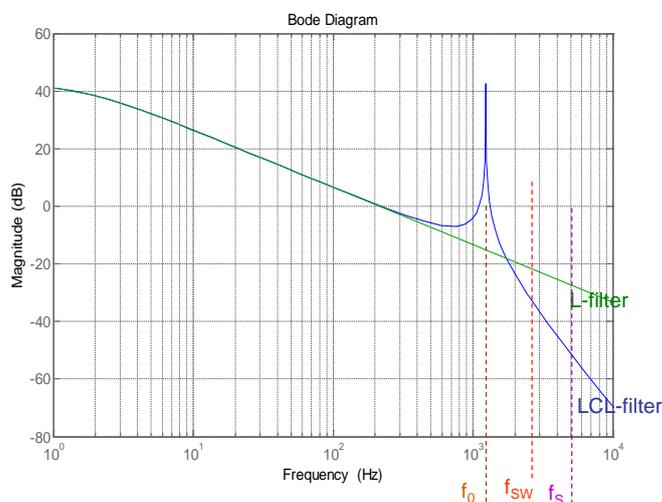


Figura A.7. VSC conectado a la red eléctrica mediante filtro LCL.



L-filter $\frac{i_{gk}(s)}{u_k} = \frac{1}{R_1 + sL_1}$

LCL-filter $\frac{i_{2k}}{u_k} = \frac{1}{C_o L_1 L_2 s^3 + C_o (L_2 R_1 + L_1 R_2) s^2 + (L_1 + L_2 + R_1 R_2 C_o) s + R_1 + R_2}$

Figura A.8. Diagramas de Bode comparativo para filtros L y LCL .

Como se puede comprobar en la Figura A.8, hasta la frecuencia de conmutación, ambos diagramas de Bode son exactamente iguales, por tanto si se diseña un controlador con un ancho de banda inferior a la frecuencia de resonancia se podría considerar que todo el filtro, desde el punto de vista del controlador de corriente, es un filtro L . Además, como en este caso concreto, L_2 es la suma de inductancias de pérdidas a partir del PCC, y por tanto L_1 va a ser considerablemente mayor que L_2 ,

LCL characteristics

- » Third order
- » For low frequencies, the LCL filter behaviour is similar to the L-filter
- » For high frequencies, the Bode magnitude falls with a -60dB/dec slope

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{L_1 + L_2}{L_1 L_2 C_o}}$$

$$10\omega_{base} \leq \omega_0 \leq \frac{\omega_{sw}}{2}$$

$$\omega_s = 2 \cdot \omega_{sw}$$

desde el punto de vista del controlador de corriente, se puede considerar como modelo de la planta de cada uno de los tres convertidores que conforman el convertidor de la Figura A.4, una inductancia de valor L_1 . De forma aclaratoria, y como se indicará más adelante, el controlador de corriente se diseña para cada uno de los dos inversores que conforman el STATCOM. El BW aproximado es 1300 Hz, mientras que la frecuencia de resonancia del sistema está situada en 1451.6 Hz. De esta forma se puede diseñar el controlador de corriente, aproximando el filtro LCL a un filtro tipo L, con inductancia equivalente L_1 .

Según se muestra en la Figura A.4, el controlador de corriente se diseña tomando como modelo uno de los tres convertidores, por esa razón tanto la medida de las corrientes d y q , como las referencias son divididas por 1/2 en la Figura A.4.

Para obtener las expresiones matemáticas en el dominio Z que define la planta para el control de corriente de uno de los tres VSCs representados en la Figura A.4, se parte del supuesto de que el convertidor es ideal, lo que implica que las tensiones de fase de salida del convertidor $u_a(t)$, $u_b(t)$ y $u_c(t)$ son sinusoidales puras, y que su representación vectorial es igual que la consigna vectorial que se aplica a la entrada del generador PWM, $\vec{u}^*(t)$. Con estas premisas, la planta se describe en el espacio continuo y ejes rotatorios dq con la siguiente ecuación vectorial:

$$\vec{u}^*(t) = R_1 \vec{i}_g(t) + L_1 \frac{d\vec{i}_g(t)}{dt} + j\omega_1 L_1 \vec{i}_g(t) + \vec{e}_g(t) \quad (A.7)$$

donde:

- $\vec{u}^*(t)$ es el vector que representa las tres tensiones de referencia que se entregan a la entrada del bloque PWM.
- L_1 es el valor de la inductancia de línea.
- R_1 es la resistencia de la inductancia L_1 .
- $\vec{i}_g(t)$ es el vector de las corrientes de fase de la red.
- $\vec{e}_g(t)$ es el vector de las tensiones de la red.
- ω_1 es la velocidad de rotación del vector \vec{e}_g medida por el bloque PLL de la Figura

$$A.4, \theta_1 = \int_0^t \omega_1 dt .$$

La función de transferencia vectorial de la planta en el plano s y para los ejes de referencia rotatorios, y considerando \vec{e}_g como una perturbación del sistema, es:

$$\bar{T}(s) = \frac{\bar{i}_g}{\bar{u}} = \frac{1}{R_1 + sL_1 + j\omega_1 L_1} \quad (A.8)$$

El primer paso en el diseño del controlador consiste en cancelar el acoplamiento cruzado entre las corrientes de los ejes d y q , debido al término $j\omega_1 L_1$. Un método para eliminar este acoplamiento consiste en añadir un lazo de realimentación negativa interno con una ganancia $-j\omega_1 \hat{L}_1$, como muestra la Figura A.9. El resultado es una nueva función de transferencia $\bar{T}'(s)$, cuyo valor es:

$$\bar{T}'(s) = \frac{\bar{i}_g}{\bar{u}'} = \frac{\bar{T}(s)}{1 - \bar{T}(s)j\omega_1 \hat{L}_1} = \frac{1}{R_1 + sL_1 + j\omega_1 L_1} \frac{1}{1 - \frac{j\omega_1 \hat{L}_1}{R_1 + sL_1 + j\omega_1 L_1}} = \frac{1}{R_1 + sL_1 + j\omega_1 (L_1 - \hat{L}_1)} \quad (A.9)$$

Si $L_1 - \hat{L}_1 = 0$, entonces $\bar{T}'(s)$ toma el valor:

$$\bar{T}'(s) = \frac{\bar{i}_g}{\bar{u}'} = \frac{1}{R_1 + sL_1} \quad (A.10)$$

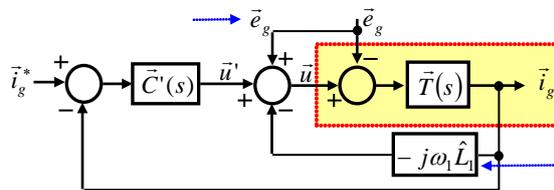


Figura A.9. Sistema de control vectorial del filtro L. Desacoplamiento de las corrientes de los ejes d y q y compensación 'feedforward' de \bar{e}_g .

Las variables con el símbolo $\hat{}$ son valores nominales o medidos de los componentes antes de la puesta en marcha del convertidor. Durante el funcionamiento de éste, estos valores pueden sufrir variaciones. La diferencia entre las mismas variables con el símbolo $\hat{}$ y sin el símbolo, es que las primeras son valores empleados en las ecuaciones del controlador, mientras que las segundas son los elementos de la planta.

El segundo paso consiste en cancelar el efecto de la tensión de la red (\bar{e}_g) sobre el controlador mediante una compensación 'feedforward' como muestra la Figura A.9. Esto se puede realizar porque la dinámica de \bar{e}_g es muy lenta comparada con la corriente de la red \bar{i}_g , y por tanto puede ser tratada como una perturbación del sistema de control. Además esta compensación 'feedforward' evita, idealmente, que cualquier perturbación que suceda en la red eléctrica afecte a la respuesta del

sistema en lazo cerrado, lo cual mejora la dinámica del sistema. Así, se expresa la ecuación del controlador en el dominio del tiempo continuo como:

$$\vec{u}(t) = \vec{u}'(t) + j\omega_1 \hat{L}_1 \vec{i}_g(t) + \vec{e}_g(t) \quad (A.11)$$

donde:

- $\vec{u}'(t)$ es la salida del controlador $\vec{C}'(s)$;
- $j\omega_1 \hat{L}_1 \vec{i}_g(t)$ es el término de desacoplamiento de los ejes de la corriente de la red; y
- $\vec{e}_g(t)$ es el término 'feedforward'.

La Figura A.10.a es la representación en coordenadas escalares dq del diagrama de control vectorial de la Figura A.9. Si $L_1 - \hat{L}_1 = 0$ se realiza una compensación 'feedforward' ideal, y se obtiene el diagrama de bloques de la Figura A.10.b, donde no hay ningún acoplamiento entre ejes y ha desaparecido de la dinámica del sistema la tensión de la red eléctrica. Según se observa en la Figura A.10.b, el análisis del sistema en lazo cerrado del eje d es exactamente igual que para el eje q , y basta con estudiar uno de los dos ejes para obtener las funciones de transferencia de $C'_d(s)$ y $C'_q(s)$. Por tanto, el estudio del sistema de control vectorial se reduce al estudio del sistema de control escalar mostrado en la Figura A.10.c. La función de transferencia vectorial de la ecuación (A.8), $\vec{T}'(s)$, se ha transformado en una función de transferencia escalar de primer orden, de la forma:

$$T'(s) = \frac{i_g}{u'} = \frac{1}{R_1 + sL_1} \quad (A.12)$$

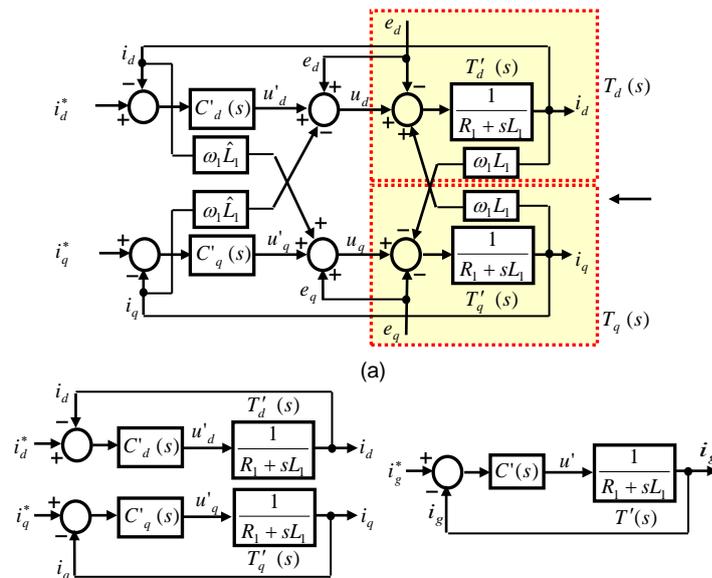


Figura A.10. a) Diagrama de bloques del modelo del filtro y del controlador en los ejes dq. b) Esquema resultante para un desacoplamiento de ejes y compensación 'feedforward' ideales. c) Diagrama de bloques de uno de los ejes del sistema. Sistema de control escalar.

A.3.2 Discretización del modelo

El siguiente paso en el diseño del controlador consiste en discretizar el modelo de la planta $T'(s)$ (ecuación (A.12)). $u'(s)$ es una señal PWM, pero se parte del supuesto de que se trata de una señal sinusoidal, con lo que se puede suponer constante durante un período de muestreo. Con esta suposición, y aplicando el método de discretización ZOH, se obtiene la siguiente planta discreta:

$$T'(z) = (1 - z^{-1}) \mathcal{Z} \left[\frac{T'(s)}{s} \right] = \frac{1}{R_1} \left(\frac{1 - e^{-R_1 T_s / L_1}}{1 - e^{-R_1 T_s / L_1} z^{-1}} \right) z^{-1} = \frac{a z^{-1}}{1 - b z^{-1}} \quad (A.13)$$

A.3.3 Discretización de los términos de desacoplamiento

Los términos de desacoplamiento de la ecuación (A.11) ($j\omega_1 \hat{L}_1$) deben ser discretizados para poder diseñar un controlador digital. Sin embargo esto no es trivial, debido a que un término de desacoplamiento digital no cancela perfectamente la naturaleza analógica del acoplamiento cruzado entre i_d e i_q en el dominio del tiempo continuo. [Ottersten, R. 2003] propone aproximar \vec{i}_g en un período de muestreo por el siguiente valor medio:

$$\vec{i}_g^{ave} [k, k+1] \approx \frac{1}{2} (\vec{i}_g^*(k+1) + \vec{i}_g^*(k)) = \frac{1}{2} (\vec{i}_g^*(k) + \vec{i}_g^*(k)) \quad (A.14)$$

donde $\vec{i}_g(k+1) = \vec{i}_g^*(k)$. La anterior igualdad supone que el sistema alcanza el valor de referencia en un período de muestreo. Una aproximación similar se puede realizar para el caso de que el sistema alcance el valor de referencia en dos períodos de muestreo:

$$\vec{i}_g^{ave}[k, k+2] \approx \frac{1}{2}(\vec{i}_g(k+2) + \vec{i}_g(k)) = \frac{1}{2}(\vec{i}_g^*(k) + \vec{i}_g(k)) \quad (A.15)$$

Así, la forma discreta de la ecuación (A.11) puede ser aproximada por:

$$\vec{u}(k) = \vec{u}'(k) + j\omega_1 L_1 \frac{\vec{i}_g^*(k) + \vec{i}_g(k)}{2} + \vec{e}_g(k) \quad (A.16)$$

independientemente de que el algoritmo de control sea diseñado para alcanzar el régimen permanente en una o dos muestras.

A.3.4 Diseño del controlador

A partir de los análisis de los apartados anteriores, se obtiene el diagrama de bloques del controlador de corriente representado en la Figura A.11. Se ha añadido el limitado, el antiwindup, el retardo computacional, el bloque ZOH y la planta en el dominio continuo.

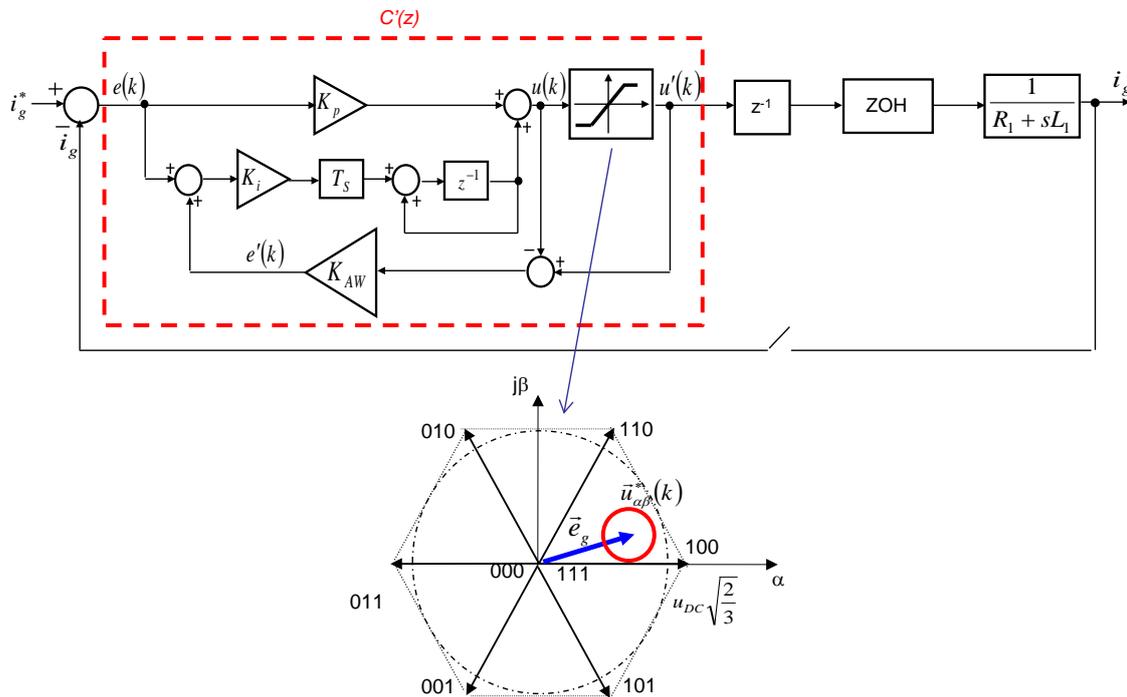


Figura A.11. Estructura del controlador de corriente.

Para suponer que la planta tiene la expresión de la ecuación (A.17), es decir, no se toma en cuenta el retardo computacional, el tiempo de establecimiento (t_s) del controlador se debe definir entre 5 y 10 veces mayor que el período de muestreo (T_s).

$$T'(z) = (1 - z^{-1}) \mathcal{Z} \left[\frac{T'(s)}{s} \right] = \frac{\frac{1}{R_1} \left(1 - e^{-R_1 T_s / L_1} \right) z^{-1}}{1 - e^{-R_1 T_s / L_1} z^{-1}} = \frac{b z^{-1}}{1 - a z^{-1}} = \frac{b}{z - a} \quad (A.17)$$

Además, al diagrama de bloques de la Figura A.11 habrá que añadirle el feedforward y el desacoplamiento cruzado, de forma que la tensión que se aplica al generador PWM, tiene la expresión:

$$\bar{u}(k) = \bar{u}'(k) + j\omega_1 L_1 \frac{\bar{i}_g^*(k) + \bar{i}_g(k)}{2} + \bar{e}_g(k) \quad (A.18)$$

Y el controlador tiene la expresión:

$$C'(z) = k_p + k_i \frac{T_s}{z - 1} = k_p \frac{z - \alpha}{z - 1} \quad (A.19)$$

De esta forma, la ganancia de lazo, $T'(z) \cdot C'(z)$, tiene dos polos localizados en $p_1=1$ y $p_2=a$, muy cerca de 1, y un cero localizado en $z = \alpha$, como muestra la Figura A.12. Dependiendo de la ganancia del controlador, el sistema de lazo cerrado puede tener dos polos complejos conjugados. En este caso, la forma general del denominador de la función de transferencia en lazo cerrado tendrá la forma:

$$D(z) = (z - \rho e^{j\vartheta})(z - \rho e^{-j\vartheta}) = z^2 - (2\rho \cos \vartheta)z + \rho^2 \quad (A.20)$$

Donde $\rho = e^{-(\xi\omega_n T_s)}$ y $\vartheta = \omega_n T_s \sqrt{1 - \xi^2}$.

Por tanto, $k_p = \frac{1 + a - 2\rho \cos \vartheta}{b}$, $\alpha = \frac{a - \rho^2}{1 + a - 2\rho \cos \vartheta}$ y $k_i = \frac{k_p}{T_s}(1 - \alpha)$.

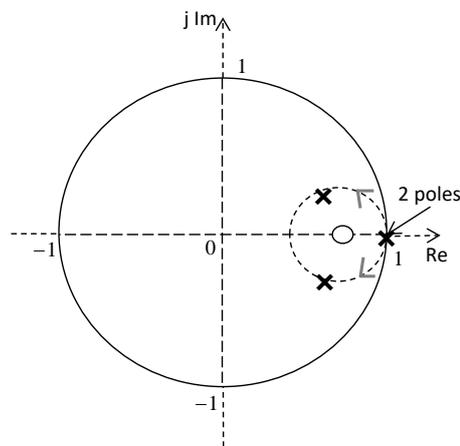


Figura A.12. Lugar de las raíces de la ganancia de lazo $T'(z) \cdot C'(z)$.

Para el ajuste del controlador de corriente de este proyecto, teniendo en cuenta la ubicación de la frecuencia de resonancia del filtro LCL, y que $T_s = 200 \mu\text{s}$, se propone un $t_s = 4 \text{ ms}$, y un coeficiente de amortiguamiento $\xi = 0.707$. La relación aproximada entre t_s y ω_n es:

$$t_s \approx \frac{4.6}{\xi \cdot \omega_n} \quad (A.21)$$

Respecto a la ganancia antiwindup, K_{AW} , generalmente se le asigna un valor igual al inverso de la ganancia proporcional. Desde un punto de vista práctico se recomienda no activar el controlador hasta que no se conecte el convertidor, para evitar operaciones no esperadas tanto del integrador como del antiwindup, que pueden ocasionar elevados picos de corriente en la conexión inicial del convertidor, hasta que se estabiliza la operación.

A.4 Controlador de potencia activa

En un convertidor conectado a la red eléctrica, que tiene que controlar la tensión del DC-bus, el controlador de potencia activa se hace mediante un control de la tensión del DC-bus. Este control, que indirectamente hace el control de potencia activa marcará la referencia de corriente activa al control de corriente. En el caso de un STATCOM, dado que no hay elementos generadores de energía, solamente condensadores, la potencia activa puesta en juego es muy baja, sólo las pérdidas del sistema, y esa es la función del controlador del DC-bus, mantener la tensión en el bus de continua constante, compensando las pérdidas del convertidor.

Existen diversas referencias técnicas sobre los controladores de tensión del DC-bus para VSC, tanto lineales [Blasko, V., et al. 1998], [Ottersten, R. 2003], como no lineales [Cecati, C., et al. 2003]. Para los algoritmos de control usados en esta Tesis se han utilizado las propuestas de implementación de controladores del DC-bus presentadas en [Bueno, E. J. 2005].

A.4.1 Modelo del DC-bus

El DC-bus se modela como un condensador ideal, representándose en la Figura A.13 su circuito equivalente dinámico, donde

- C_{DC} es el condensador del DC-bus, supuesto ideal.
- u_{DC} es la tensión del DC-bus.
- $i_{C_{DC}}$ es la corriente por C_{DC} .
- i_{DC1} es la corriente del DC-bus en el lado de la red.
- i_{DC2} es la corriente del DC-bus en el lado de la carga.
- P_g es la potencia activa de la red.

- P_L es la potencia activa de la carga.

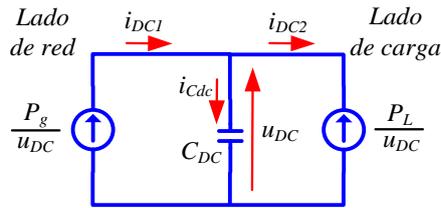


Figura A.13. Circuito equivalente dinámico del DC-bus.

En [Bueno, E. J. 2005] se presentan dos modelos del DC-bus y se desarrollan los respectivos controladores basados en tales modelos. Uno de los modelos se basa en el balance de potencias del DC-bus, mientras que el otro se basa en la energía almacenada en el condensador del DC-bus.

La deriva temporal de la energía almacenada en el condensador es igual a la resta instantánea de las potencias de la red y de la carga con los signos de transferencia de energía representados en la Figura A.13. De forma que

$$\frac{1}{2} C_{DC} \frac{d u_{DC}^2}{dt} = P_g - P_L = e_q i_q - P_L \quad (A.22)$$

Definiendo $W = u_{DC}^2$ [Ottersten, R. 2003], (A.22) puede expresarse como el sistema de primer orden

$$\frac{1}{2} C_{DC} \frac{dW}{dt} = e_q i_q - P_L \quad (A.23)$$

Linealizando (A.23) mediante un modelo de pequeña señal, así como despreciando las perturbaciones de segundo orden y considerando que en régimen permanente $e_q i_q = P_L$, se obtiene

$$\frac{1}{2} C_{DC} \frac{d\tilde{W}}{dt} = e_q \tilde{i}_q + \tilde{e}_q i_q - \tilde{P}_L \quad (A.24)$$

En este caso, la función de transferencia a obtener es \tilde{W} / \tilde{i}_q . El resto de perturbaciones se consideran nulas excepto \tilde{P}_L , ya que es función de \tilde{W} y del tipo de carga en el DC-bus. Así, (A.24) queda de la forma

$$\frac{1}{2} C_{DC} \frac{d\tilde{W}}{dt} = e_q \tilde{i}_q - \tilde{P}_L \quad (A.25)$$

A partir de (A.25) y suponiendo que $\tilde{P}_L = \frac{\tilde{W}}{R_L}$ (siendo R_L la resistencia de carga del lado carga), la

relación entre \tilde{i}_q y \tilde{W} se expresa en el dominio de Laplace como

$$\frac{\tilde{W}}{\tilde{i}_q}(s) = \frac{e_q R_L}{\frac{C_{DC} R_L}{2} s + 1} \quad (A.26)$$

Si se cumple que $R_L C_{DC} \geq 40T_s$, que es lo más típico, la Ecuación (A.26) se puede aproximar como

$$\frac{\tilde{W}}{\tilde{i}_q}(s) = \frac{2e_q}{sC_{DC}} \quad (A.27)$$

de forma que las constantes del controlador tomarán valores independientes de R_L . Además, la función de transferencia anterior se puede independizar de la tensión de red, que puede sufrir variaciones, con la siguiente transformación:

$$\frac{\tilde{W}}{\tilde{P}_g}(s) = \frac{2}{sC_{DC}} \quad (A.28)$$

A.4.2 Diseño del controlador del DC-bus

La Figura A.14 representa mediante diagramas de bloques la función de transferencia (ecuación (A.28)), considerando \tilde{P}_L como una perturbación del sistema, y se puede expresar como:

$$G(s) = \frac{2}{sC_{DC}} \quad (A.29)$$

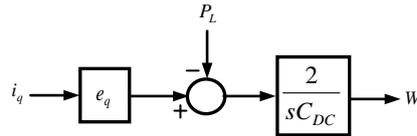


Figura A.14. Modelo aproximado de (A.26) independiente del valor de R_L .

El lazo de control de u_{DC} se representa en la Figura A.15.a. Previo al modelo del DC-bus se añade un bloque ZOH, ya que las propuestas de control se realizan en el dominio discreto. Delante del bloque ZOH se incluye el controlador de corriente. La función de transferencia del controlador PI de la Figura A.15.a es:

$$\frac{P_g^*}{u_{DC}^* - u_{DC}} = k_{pDC} \frac{z - \alpha_{DC}}{z - 1} \quad (A.30)$$

Siendo k_{pDC} y α_{DC} las constantes de diseño del controlador PI de tensión del DC bus. Si el controlador de tensión u_{DC} y el controlador de corriente están perfectamente desacoplados, el diagrama de bloques de la Figura A.15.a se simplifica al mostrado en la Figura A.15.b. Para que ambos controladores estén desacoplados el tiempo de establecimiento del controlador del DC-bus debe ser 10 veces mayor que el tiempo de establecimiento del controlador de corriente. Además, se establece que $\zeta \geq 1/\sqrt{2}$ para evitar que u_{DC} tenga elevadas sobretensiones. Bajo estas condiciones, se obtienen las constantes k_{pDC} y α_{DC} .

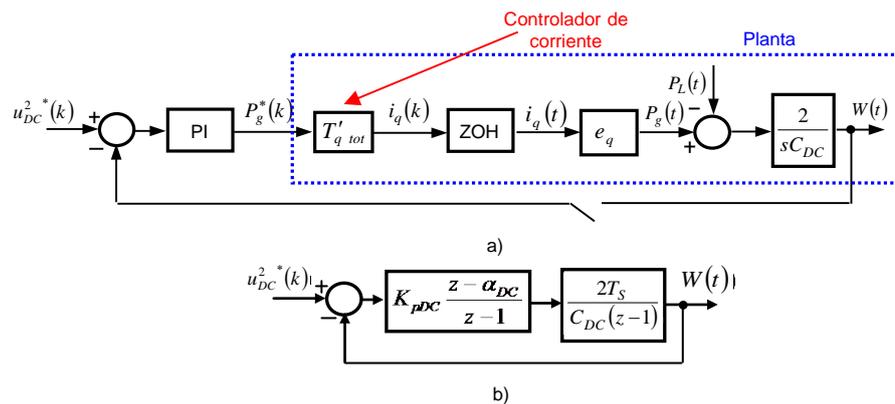


Figura A.15. Lazo de control de u_{DC} en el dominio Z usando la energía del condensador como variable de control.

A.4.3 Referencias del DC-bus

Como se mostraba en la Figura A.2, debido a que un STATCOM intercambia potencia reactiva con la red eléctrica, las variaciones de consignas de potencia reactiva, implican variaciones del armónico fundamental de la tensión V_t , representada en la Figura A.16. Cuando el VSC se comporta de forma capacitiva la amplitud de V_t tomará un valor mayor que V_s , y por tanto, si se emplea modulación escalar con secuencia cero, para el convertidor de dos niveles habrá que asegurar que $\hat{V}_t(t) \leq \frac{u_{DC}}{2} \cdot 1.154 = \frac{u_{DC}}{\sqrt{3}}$; por otro lado, cuando el convertidor se comporta de forma inductiva, entonces la amplitud de V_t será menor que la de V_s , por lo que si se mantiene constante u_{DC} , el índice de modulación de amplitud se va a reducir considerablemente lo que afecta al contenido armónico como se muestra en la Figura A.17.

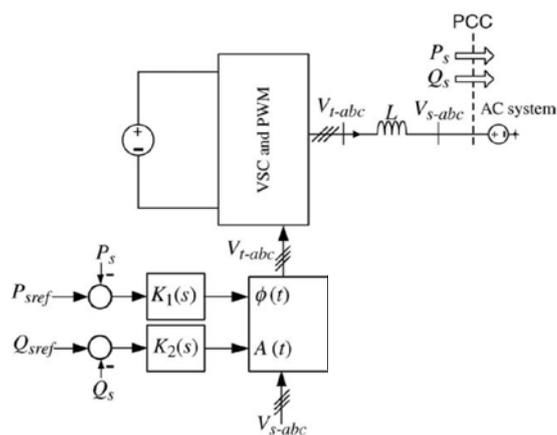


Figura A.16. Diagrama de bloques del STATCOM donde se ubican las variables empleadas para determinar el valor del DC-bus [Yazdani, A., Iravani, R. 2010]

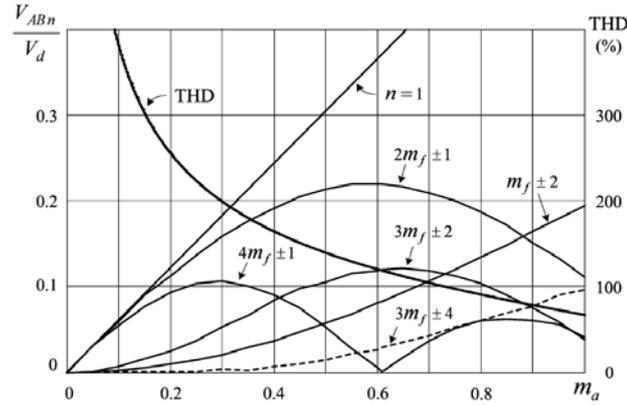


Figura A.17. Contenido armónico de la tensión de línea para un inversor trifásico de dos niveles [Bin, W. 2006].

El objetivo es cuantificar el valor de V_t tanto en régimen permanente como en régimen transitorio, de forma que se establezca un valor de u_{DC} que asegure una correcta operación del convertidor y además un índice de modulación alrededor de 0.9, lo cual hace que el contenido armónico de la corriente de red sea más o menos igual operando en los modos capacitivo e inductivo.

[Yazdani, A., Iravani, R. 2010] en la ecuación (7.31), establece el valor de pico $V_t(t)$ para condiciones de régimen permanente (P_S y Q_S) y régimen transitorio ($\frac{dP_S}{dt}$ y $\frac{dQ_S}{dt}$) de las potencias activa y reactiva, tomando el valor:

$$\begin{aligned} \hat{V}_t(t) = & \left\{ \hat{V}_S^2 + \frac{4}{9} \left(\frac{L\omega_1}{\hat{V}_S} \right)^2 (P_S^2 + Q_S^2) + \left(\frac{4L\omega_1}{3} \right) Q_S + \frac{4}{9} \left(\frac{L\omega_1}{\hat{V}_S} \right)^2 \left[\left(\frac{1}{\omega_1} \frac{dP_S}{dt} \right)^2 + \left(\frac{1}{\omega_1} \frac{dQ_S}{dt} \right)^2 \right] + \right. \\ & \left. + \left[\frac{4L\omega_1}{3} + \frac{8}{9} \left(\frac{L\omega_1}{\hat{V}_S} \right)^2 Q_S \right] \left(\frac{1}{\omega_1} \frac{dP_S}{dt} \right) + \left[-\frac{8}{9} \left(\frac{L\omega_1}{\hat{V}_S} \right)^2 P_S \right] \left(\frac{1}{\omega_1} \frac{dQ_S}{dt} \right) \right\}^{\frac{1}{2}} \end{aligned} \quad (A.31)$$

Como se indicó al comienzo de este apartado, por tratarse de un convertidor trifásico de dos niveles, se debería asegurar la siguiente inecuación:

$$\hat{V}_t(t) \leq \frac{u_{DC}}{2} \cdot 1.154 = \frac{u_{DC}}{\sqrt{3}} \quad (A.32)$$

Para fijar un valor de $\hat{V}_t(t)$ en régimen permanente fácilmente implementable en software, se simplifica la ecuación (A.31), obteniendo la ecuación que se muestra a continuación. A partir de este valor, se puede establecer la referencia de la tensión del DC-bus como una función de la referencia de la potencia reactiva.

$$\hat{V}_t(t) = \sqrt{\hat{V}_S^2 + \frac{4}{9} \left(\frac{L\omega_1}{\hat{V}_S} \right)^2 (P_S^2 + Q_S^2) + \left(\frac{4L\omega_1}{3} \right) Q_S} \approx \sqrt{\hat{V}_S^2 + \left(\frac{4L\omega_1}{3} \right) Q_S} \quad (A.33)$$

Además, a la ecuación (A.33) se le añaden los términos de régimen transitorio más significativos, obteniendo la siguiente expresión:

$$\hat{V}_t(t) \approx \sqrt{\hat{V}_S^2 + \left(\frac{4L\omega_1}{3} \right) Q_S + \left(\frac{4L}{3} \right) \frac{dP_S}{dt}} \quad (A.34)$$

(Las ecuación (A.31), ecuación (A.32), ecuación (A.33) y ecuación (A.34) son desarrolladas para transformaciones invariantes en amplitud).

En la práctica, se propone incluir el cálculo de la referencia, dentro del bloque limitador de la salida del controlador de corriente de la siguiente forma:

```
function [ud,uq,sat, udcref] = fcn(u1, u2)

% This block supports an embeddable subset of the MATLAB language.
% See the help menu for details.

ud_c=u1(1);
uq_c=u1(2);
ed=u1(3);
eq=u1(4);
udc=u1(5);
t=u1(6);

udcrect=u2;
SM=50;

theta=atan2(uq_c,ud_c);

if t <= 0.2
    ud=ud_c;
    uq=uq_c;
    sat=0;
    udcref=udcrect;
else
    if sqrt(ud_c^2+uq_c^2) > udc/sqrt(2)
        ud = (udc/sqrt(2))*cos(theta); % ud
        uq = (udc/sqrt(2))*sin(theta); % uq
        sat=1;
    else
        ud=ud_c;
        uq=uq_c;
        sat=0;
    end
    udcref=( sqrt(ud^2+uq^2)*sqrt(2))+SM;
end
```

ud_c y uq_c son las tensiones de salida del controlador de corriente, que se corresponden con la tensión $V_t(t)$ de la ecuación (A.31). SM , es un margen de seguridad de tensión para el DC-bus que asegura una correcta operación ante cualquier contingencia, y que se recomienda fijar en alrededor de 50 V.

Suponiendo $\hat{v}_s(t) = 400\sqrt{\frac{2}{3}}$, y una impedancia de línea despreciable, entonces para la inductancia del filtro indicada en el apartado A.4, u_{DC} , debe tomar los siguientes valores, aplicando la ecuación (A.33):

- Para $Q^* = 250$ kVAr (comportamiento capacitivo del convertidor), $u_{DC} > 636$ V (incluyendo un margen de seguridad de 50 V).
- Para $Q^* = -250$ kVAr (comportamiento inductivo del convertidor), $u_{DC} > 595$ V (incluyendo un margen de seguridad de 50 V).

En el caso que la red tenga una impedancia de línea no nula comparada con la impedancia del filtro de red, entonces u_{DC} , debería ser mayor en modo capacitivo y menor en modo inductivo. En cualquier caso, si se aplica la ecuación (A.33) durante la operación del convertidor, \hat{V}_s es medida, y en esta medida ya estará incluido el efecto de la impedancia de línea para consignas de Q positivas y negativas. Por lo que, no habrá que incluir términos adicionales en la ecuación (A.33) para calcular u_{DC} en redes débiles.

En el caso de sobretensiones (en STATCOMs comerciales se dan márgenes de operación de $\pm 20\%$ respecto a $V_{nominal}$), la situación es exactamente la misma que para redes débiles. El término \hat{V}_s de la ecuación (A.33) es medido, y el valor obtenido de u_{DC} , incluirá dicha perturbación.

En cuanto a variaciones en la frecuencia (en STATCOMs comerciales se dan márgenes de operación de $\pm 6\%$ respecto a $f_{nominal}$), un incremento de la frecuencia, implica que el valor de u_{DC} en modo capacitivo es mayor, mientras que en modo inductivo es menor que el calculado anteriormente. En cuanto con disminuciones de frecuencia respecto al nominal, u_{DC} en modo capacitivo se reduce, mientras que en modo inductivo aumenta. Para que la frecuencia entre como una variable en el cálculo de u_{DC} a partir de la ecuación (A.33) es necesario medirla. Para esto se debe emplear la salida de frecuencia del PLL que se propone en el apartado siguiente de este documento.

Entonces, en el caso más crítico, teniendo en cuenta una sobretensión del 20% y una sobrefrecuencia del 6%, las referencias del DC-bus tendrían que tomar los valores:

- Para $Q^* = 250$ kVAr (comportamiento capacitivo del convertidor), $u_{DC} > 747$ V (incluyendo un margen de seguridad de 50 V).
- Para $Q^* = -250$ KVar (comportamiento inductivo del convertidor), $u_{DC} > 710$ V (incluyendo un margen de seguridad de 50 V).

Por este motivo, en los ensayos iniciales, donde se fija una u_{DC} constante, se establecerá como valor de referencia final 750 V.

A.5 PLL

El PLL es el bloque que realiza la sincronización y monitorización de las variables eléctricas del PCC. En el EBOP, dado que es un sistema que puede funcionar conectado a red, y en modo isla, es necesario tener dos PLLs, uno aguas arriba del contactor principal y otras aguas abajo. El PLL que se va a describir en este apartado, es el que se va a conectar en el punto PCC de la Figura A.4, es decir, aguas abajo.

El diagrama de bloques del PLL que se va a implementar es el que se muestra en la Figura A.18. Está formado por una transformación de ejes abc a $\alpha\beta$ donde se implementa la ecuación (A.1), a continuación se añade un bloque separador de secuencias $\alpha\beta^+$ y $\alpha\beta^-$, basado en dos SOGI-QSG (Second Order Generalized Integrators-Quadrature Signal Generator) [Rodríguez, A., et al. 2009], [Sáez, V., et al. 2010]. A la salida de estos bloques se realizan las transformaciones $\alpha\beta^+ \rightarrow dq^+$ y $\alpha\beta^- \rightarrow dq^-$. Se detecta cuál es la secuencia predominante, se divide por el módulo de dicha secuencia, y se aplica la componente d a la entrada del detector de fase. Esto es lo que posibilita tener una sincronización como la que se muestra en la Figura A.5, donde el vector de tensión de la tensión en el PCC está en el eje q , de forma que la componente d se hace 0. Por último, y dentro de un sombreado verde aparece un PLL propiamente dicho, basado en un detector de fase, un controlador PI y un VCO.

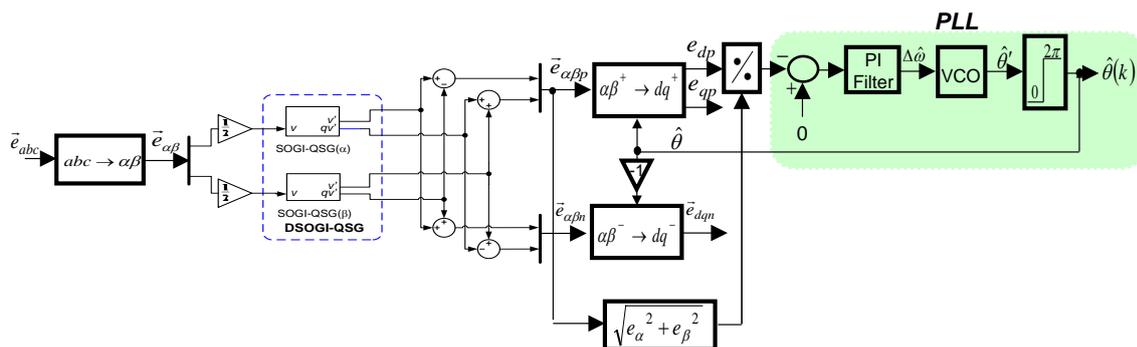


Figura A.18. PLL.

La Figura A.19 muestra el diagrama de bloques de un SOGI-QSG, y los diagramas de Bode de la salida directa v' y en cuadratura qv' . Como se muestra en la figura, la respuesta de v'/v es un filtro paso banda, con ganancia 1 a la frecuencia de sintonización, mientras que la respuesta de qv'/v es un filtro paso bajo. Además para la frecuencia de conmutación se comprueba que entre ambas señales hay un desfase de 90° , por lo que realmente v' y qv' son señales en cuadratura.

Las expresiones de v'/v y qv'/v en el dominio continuo se muestran a continuación:

$$\frac{v'}{v}(s) = \frac{k_S \omega_o s}{s^2 + k_S \omega_o s + \omega_o^2} \quad (A.35)$$

$$\frac{qv'}{v}(s) = \frac{k_S \omega_o^2}{s^2 + k_S \omega_o s + \omega_o^2} \quad (A.36)$$

En los sistemas reales, estas expresiones hay que implementarlas en el dominio discreto. En [Rodríguez, A., et al. 2009], [Sáez, V., et al. 2010], se analizan en detalle posibles métodos de discretización de estas expresiones, pero se recomienda implementar las ecuaciones (A.35) y (A.36) mediante ecuaciones en diferencias de sus equivalente Tustin, y que tienen las siguientes expresiones analíticas:

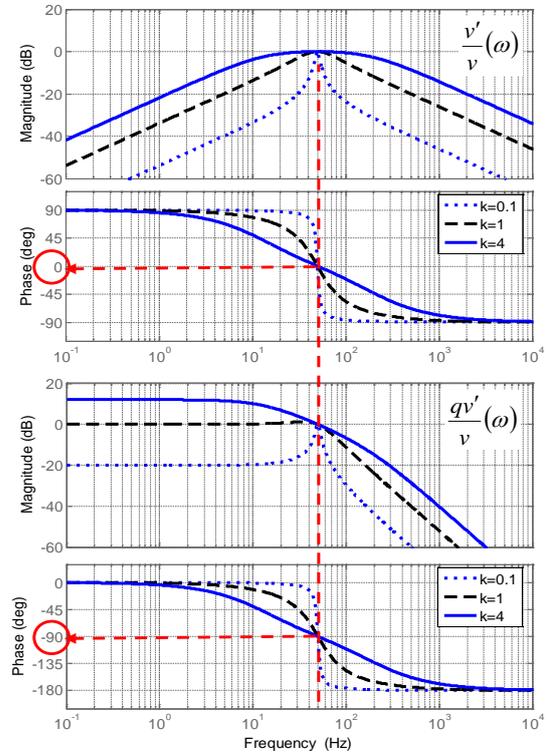
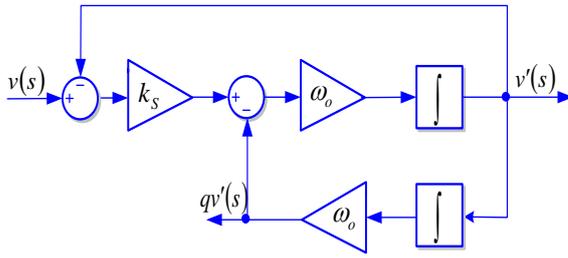


Figura A.19. SOGI-QSG y sus diagramas de Bode.

$$\frac{v'}{v}(z) = \frac{2k_S \omega_o T_S}{4 + 2k_S \omega_o T_S + \omega_o^2 T_S^2} \cdot \frac{z^2 - 1}{z^2 + \frac{2\omega_o^2 T_S^2 - 8}{4 + 2k_S \omega_o T_S + \omega_o^2 T_S^2} z + \frac{4 - 2k_S \omega_o T_S + \omega_o^2 T_S^2}{4 + 2k_S \omega_o T_S + \omega_o^2 T_S^2}} \quad (A.37)$$

$$\frac{qv'}{v}(z) = \frac{k_S \omega_o^2 T_S^2}{4 + 2k_S \omega_o T_S + \omega_o^2 T_S^2} \cdot \frac{z^2 + 2z + 1}{z^2 + \frac{2\omega_o^2 T_S^2 - 8}{4 + 2k_S \omega_o T_S + \omega_o^2 T_S^2} z + \frac{4 - 2k_S \omega_o T_S + \omega_o^2 T_S^2}{4 + 2k_S \omega_o T_S + \omega_o^2 T_S^2}} \quad (A.38)$$

Para ajustar el PI del PLL, es necesario linealizar el sistema de la Figura A.18, donde como resultado el diagrama de control de la Figura A.20. Del proceso de linealización se deduce que la señal de

error tiene el valor $e_{d_pu} = -\sin \delta \approx (\theta + \theta_{inicial} - \hat{\theta})$, donde e_{d_pu} es el valor de la componente d normalizado respecto al valor del módulo de la tensión de red (el objetivo es que esta tensión tome el valor 0), θ es ángulo de la tensión de red, $\theta_{inicial}$ es el ángulo inicial de la tensión de red cuando se conecta el sistema, y $\hat{\theta}$ es la fase a la salida del PLL.

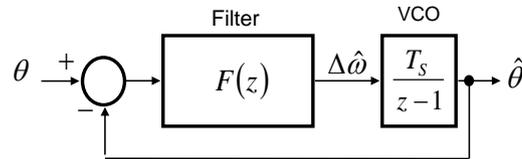


Figura A.20. Modelo linealizado del PLL.

La planta de la Figura A.20 es el PLL, y tiene la expresión:

$$T(z) = \frac{T_s}{z-1} = \frac{b}{z-a} \quad (A.39)$$

Siguiendo con el método propuesto en el apartado A.3.4 para ajustar el controlador de corriente, se pueden obtener los valores de k_p y α , si $F(z)$ es un controlador PI, y toman los valores:

$$k_p = \frac{2}{T_s} \left[1 - e^{-\zeta \omega_n T_s} \cos(\omega_n T_s \sqrt{1-\zeta^2}) \right] \quad (A.40)$$

$$\alpha = \frac{1 - e^{-2\zeta \omega_n T_s}}{2 \left[1 - e^{-\zeta \omega_n T_s} \cos(\omega_n T_s \sqrt{1-\zeta^2}) \right]} \quad (A.41)$$

Para el ajuste del controlador de PLL de este proyecto, se propone un coeficiente de amortiguamiento $\xi = 0.707$ y una $\omega_n = 2\pi 20$ rad/s. Este valor permite tener una fase muy estable, con muy poca influencia de posibles ruidos procedentes de la medida de la señal de red.

Desde el punto de vista de la implementación en C del diagrama de la Figura A.18, se propone poner el retardo computacional donde se muestra en la Figura A.21. Es decir, se parte del error del instante $k-1$, se obtiene el ángulo θ en el instante k , y a partir de las medidas en el instante k , se obtienen las tensiones transformadas en el instante k .

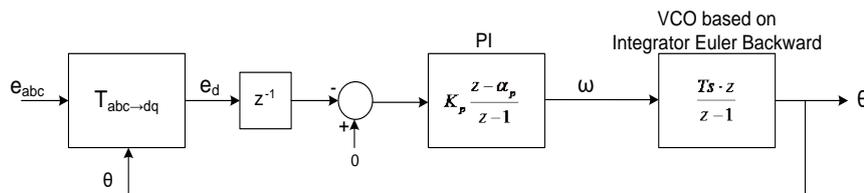


Figura A.21. Propuesta de ubicación del retardo computacional para la descripción secuencial del PLL de la Figura A.18.

A.5.1 Modo de muestreo trabajando con filtro L

Una de las partes fundamental del esquema de control mostrado en la Figura A.22 es el sistema de sincronismo. El ángulo del vector de la tensión en el punto de acoplamiento común (PCC – Point of Common Coupling) se obtiene a partir de esta, cuyo valor coincidiría con el de la tensión de red si esta fuera ideal. Generalmente, la impedancia de red es despreciada en términos de diseño del controlador, considerando la tensión en el PCC, \vec{e}_{pcc} , como la tensión de red del sistema, \vec{e}_g .

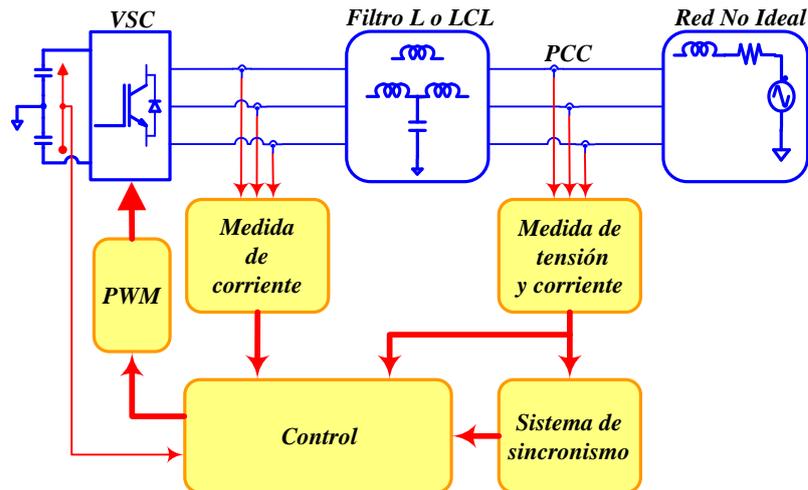


Figura A.22. Esquema general de control de un VSC trifásico conectado a una red no ideal mediante filtro L o LCL.

[Blasko, V., et al. 1998] establecían que los instantes óptimos para muestrear las corrientes son aquellos en que la señal de portadora de la PWM alcanza su valor máximo y mínimo, ya que es en esos instantes cuando el rizado de las corrientes efectúa su paso por cero. Trabajando con filtro LCL ó LC y una red no ideal —en el estudio se ha considerado su equivalente Thevenin como una fuente ideal de tensión y una inductancia, despreciando por tanto la posible resistencia de red—, y muestreando la tensión en el PCC en esos mismos instantes, se obtiene una tensión \vec{e}_{pcc} en ejes dq que se corresponde con el valor real \vec{e}_g . Sin embargo, no ocurre lo mismo con la señal de tensión que se registra en el PCC al trabajar con filtro L y una red no ideal. En este caso, \vec{e}_{pcc} presenta un rizado en el que se pueden observar dos envolventes. Muestreando de forma sincronizada con el periodo de muestreo de las corrientes, que es también el periodo de muestreo del controlador, la tensión \vec{e}_{pcc} que se captura corresponde a una de esas envolventes, obteniendo unos valores de tensión en ejes dq , \vec{e}_{dq} , erróneos respecto al valor real, ver Figura A.24.a.

[Huerta, F., et al. 2010] y [Briz, F., et al. 2010] planteaban dos métodos alternativos al método sugerido por [Blasko, V., et al. 1998] para el muestreo de las corrientes, cuando el convertidor se

conecta a una carga cuya frecuencia natural puede ser próxima a la frecuencia de muestreo. En esos casos, el método basado en los puntos máximos y mínimos de la señal de portadora introduce un error en la frecuencia fundamental de la corriente, así como problemas de aliasing. Los métodos que proponían se basaban en adelantar el instante de muestreo y en el multi-muestreo por periodo de conmutación.

Los métodos aquí estudiados para el muestreo de la tensión en el PCC son similares a los mostrados en [Huerta, F., et al. 2010] y [Briz, F., et al. 2010]. Empleando la configuración del VSC que se lista en la Tabla A.2, se han probado los distintos modos de muestreo de la tensión en el PCC que se exponen en la Figura A.23: el ya comentado muestreo de \vec{e}_{pcc} sincronizado con el muestreo de corriente, donde el periodo de muestreo de la tensión en el PCC y el sincronizador, T_{ss} , es igual a T_s , Figura A.24.a; el muestreo en el punto medio de T_s , con $T_{ss} = T_s/2$ y para el que se obtiene una tensión en ejes dq superior a la real, Figura A.24.b; el muestreo desplazado un tiempo t_{ad} respecto a los instantes de muestreo de la corriente, donde t_{ad} y con el que la tensión sigue siendo errónea, Figura A.24.c; el sobremuestreo de 2 muestras, sincronizado con T_s , donde $T_{ss} = T_s/2$ y para el que la tensión sigue siendo ligeramente errónea, Figura A.24.d; el sobremuestreo de 3 muestras, sincronizado con T_s , donde $T_{ss} = T_s/3$ y para el que la tensión es también ligeramente errónea, Figura A.24.e; y finalmente, el sobremuestreo de 4 muestras, con $T_{ss} = T_s/4$, que obtiene la tensión en ejes dq correcta, Figura A.24.f.

Tabla A.2. Configuración Estudio de Muestreo con Filtro L y Red No Ideal

S_{base}	100 kVA
E_n	398 V
ω_l	$2 \cdot \pi \cdot 50$ Hz
L	$1,5 \cdot 10^{-1}$ pu
R	$2,3 \cdot 10^{-3}$ pu
L_g	$5 \cdot 10^{-2}$ pu
R_g	$6,3 \cdot 10^{-10}$ pu
T_{PWM}	400 μ s
T_s	200 μ s

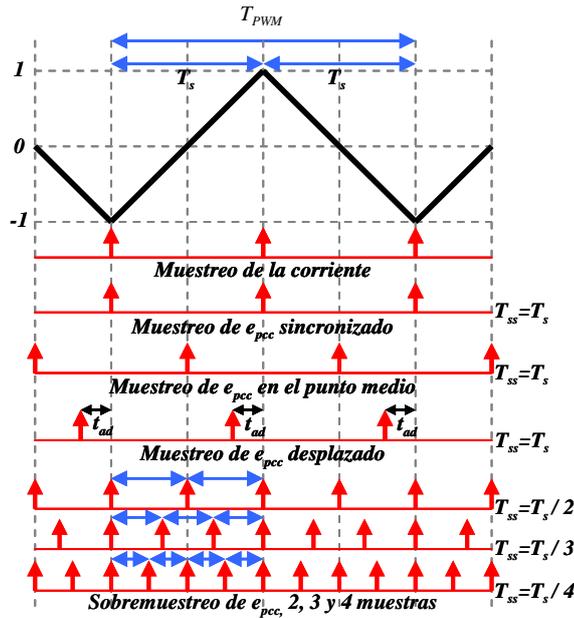


Figura A.23. Modos de muestreo de la tensión en el PCC analizados.

La Figura A.25 muestra el funcionamiento de un convertidor trifásico de tres niveles durante tres ciclos de trabajo de la señal de portadora. La imagen superior muestra la señal portadora y la señal de actuación normalizada de la fase A, \bar{u}_a^* . Muestreando en aquellos instantes donde la portadora alcanza su máximo o mínimo valor, se puede comprobar a través de la imagen inmediatamente inferior, donde se muestra el patrón de conmutación para las tres fases, que en esos momentos se aplican los vectores 000 y 111, respectivamente. La tensión en u_{an} durante esos instantes es 0, mientras que la tensión e_a es positiva, siendo la pendiente de la corriente $\Delta i_a / \Delta t < 0$ —se desprecia el efecto de las resistencias con objeto de simplificar el problema—.

$$\frac{\Delta i_a}{\Delta t} = \frac{-e_a}{L + L_g} \quad (A.42)$$

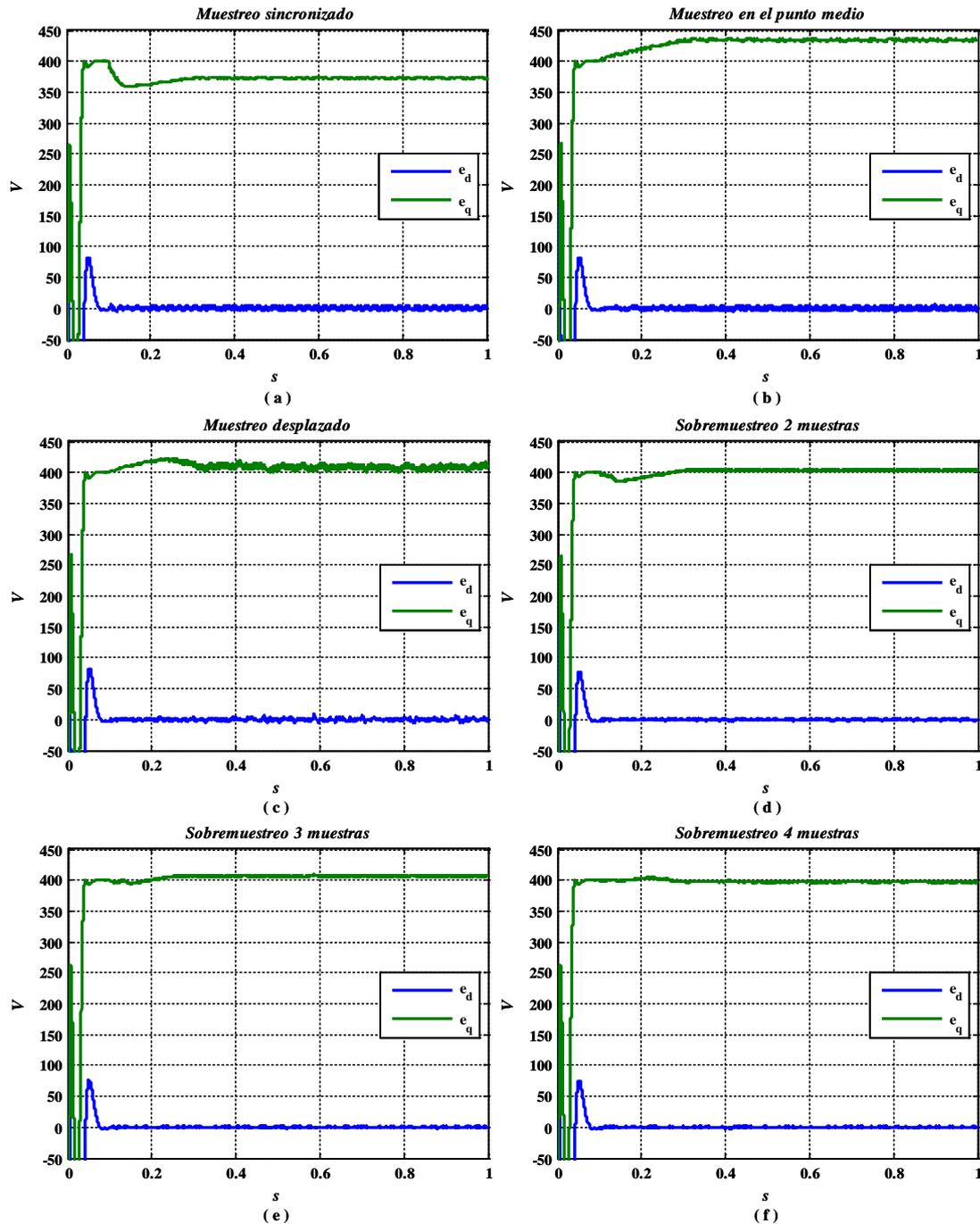


Figura A.24. Tensión edq medida en el PCC con (a) muestreo sincronizado, (b) muestreo en el punto medio, (c) muestreo desplazado, (d) sobremuestreo de 2 muestras, (e) sobremuestreo de 3 muestras y (f) sobremuestreo de 4 muestras.

La tensión en el PCC de la fase A podría expresarse como

$$e_{pcc,a} = -L \frac{\Delta j_a}{\Delta t} = \frac{L}{L + L_g} e_a \quad (A.43)$$

La tensión en el PCC que se registra muestreando su valor en los puntos máximos y mínimos de la portadora es por tanto inferior a su valor medio, tal como se puede observar en la Figura A.25, resultando en un valor incorrecto de la tensión $e_{pcc,dq}$. Esta reducción puede resultar significativa en

el caso de estar trabajando con redes débiles, donde el valor de la inductancia de red, L_g , puede ser comparable al valor de las inductancias del filtro, L .

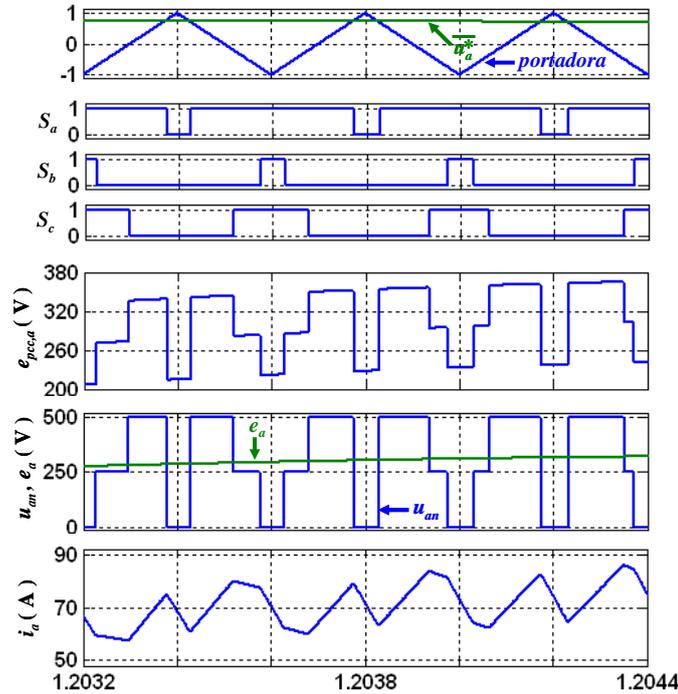


Figura A.25. De arriba a abajo: generación PWM de la fase A —portadora y tensión de actuación normalizada (moduladora); señales de conmutación de las tres fases; tensión de la fase A en el PCC; tensión de red y tensión de salida del convertidor en la fase A; y corriente por la fase A.

Del análisis realizado en la Figura A.24 se concluye que, en el muestreo de la tensión en el PCC, el único modo de muestreo de los estudiados en este apartado, Figura A.23, que garantiza el correcto funcionamiento del sincronizador, y por ende del controlador, es un sobremuestreo de 4 muestras respecto al muestreo de la corriente y del controlador, de forma que el módulo de la tensión en el PCC que se obtiene se corresponde con el valor real.

A.5.2 Conclusiones sobre el multimuestreo

La conclusión del apartado anterior es que si se acopla el convertidor al PCC con filtro L, entonces es imprescindible realizar multimuestreo de la tensión en el PCC para evitar los efectos de “aliasing” asociados a esta medida. En cambio, si el convertidor se acopla con filtro LC, no es necesario. La cuestión es que en el caso del convertidor bajo estudio, es imprescindible acoplar con filtro LC, pues la inductancia equivalente del filtro de red es muy baja $75 \mu\text{H}$, y para mejorar el THD es necesario incluir un condensador en paralelo con LC. Esta es la razón, por la que en el convertidor bajo estudio no es necesario incluir técnicas de multimuestreo, aunque se recomienda implementar para aplicaciones futuras en redes débiles.

Bibliografía

Administración General del Estado. Jefatura del Estado. Artículo 48. "Calidad del suministro eléctrico" de la Ley 54/97 del Sector Eléctrico. (28/11/1997).

Aoyama, T., Ishibashi, K., Bandai, M., Kuroda, M., Watanabe, T., "Handover latency analysis on mobile Ethernet," in *Wireless Communications and Networking Conference, 2005 IEEE*, 2005, pp. 1389-1394 Vol. 3.

Azimi-Sadjadi, B., "Stability of networked control systems in the presence of packet losses," in *Decision and Control, 2003. Proceedings. 42nd IEEE Conference on*, 2003, pp. 676-681 Vol.1.

Bin, W., "Current Source Inverter Fed Drives", 2006.

Blasko, V., Kaura, V., Niewiadomski, W., "Sampling of discontinuous voltage and current signals in electrical drives: A system approach," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 34, no. 5, pp. 1123-1130 1998.

Briz, F., Díaz-Reigosa, D., Degner, M. W., García, P., Guerrero, J. M., "Current sampling and measurement in PWM operated AC drives and power converters," in *Power Electronics Conference (IPEC), 2010 International*, 2010, pp. 2753-2760.

Bueno, E. J.; 2005 "Optimización del comportamiento de un convertidor de tres niveles NPC conectado a la red eléctrica,".

Bueno, E. J., Hernandez, A., Rodriguez, F. J., Giron, C., Mateos, R., Cobrecas, S., "A DSP- and FPGA-based industrial control with high-speed communication interfaces for grid converters applied to distributed power generation systems," *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 56, no. 3, pp. 654-669 2009.

Bueno, E. J., Cobrecas, S., Rodríguez, F. J., Hernández, Á., Espinosa, F., "Design of a back-to-back NPC converter interface for wind turbines with squirrel-cage induction generator," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 23, no. 3, pp. 932-945 2008.

Cecati, C., Dell'Aquila, A., Liserre, M., Ometto, A., "A fuzzy-logic-based controller for active rectifier," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 39, no. 1, pp. 105-112 2003.

Cecati, C., Dell'Aquila, A., Lecci, A., Liserre, M. , Monopoli, V. G., "FPGA-based multilevel modulations for H-bridge-based converters," in *Industrial Electronics, 2004 IEEE International Symposium on*, 2004, pp. 957-962.

CEER Benchmarking Report 5.2 on the Continuity of Electricity Supply. Disponible: http://www.ceer.eu/portal/page/portal/EER_HOME/EER_PUBLICATIONS/CEER_PAPERS/Electricity/Tab4/C14-EQS-62-03_BMR-5-2_Continuity%20of%20Supply_20150127.pdf.

CEN-CENELEC-ETSI Smart Grid Coordination Group, "Smart Grid Reference Architecture," 2012 <https://www.cenelec.eu/standards/Sectors/SustainableEnergy/SmartGrids/Pages/default.aspx>.

European Committee for Electrotechnical Standardization. Disponible: <http://www.cenelec.eu/aboutcenelec/whatwedo/technologysectors/smartgrids.html>.

Chaudhuri, N. R., Ray, S., Majumder, R., Chaudhuri, B., "A new approach to continuous latency compensation with adaptive phasor power oscillation damping controller (POD)," *Power Systems, IEEE Transactions on*, vol. 25, no. 2, pp. 939-946 2010.

City of Glendale AMI Smart Grid Initiative 2016. Disponible: <http://www.sgiclearinghouse.org/sites/default/files/projdocs/185.pdf>.

Comisión Europea, "EUROPA 2020 Una estrategia para un crecimiento inteligente, sostenible e integrador," 2010 <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/NOT/?uri=celex:52010DC2020>.

Costa, O. L., Fragoso, M. D., "Stability results for discrete-time linear systems with markovian jumping parameters," *Journal of mathematical analysis and applications*, vol. 179, no. 1, pp. 154-178 1993.

Dinavahi, V., Iravani, R., Bonert, R., "Design of a real-time digital simulator for a D-STATCOM system," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 51, no. 5, pp. 1001-1008 2004.

Technical Introduction and Overview. Disponible: <http://www.ethercat.org/en/technology.html>.

European technology platform for the electricity networks of the future. Disponible: <http://www.smartgrids.eu/>.

Feng-Li Lian, J. R. Moyne, D. M. Tilbury, "Performance evaluation of control networks: Ethernet, ControlNet, and DeviceNet," *IEEE Control Systems*, vol. 21, no. 1, pp. 66-83 2001.

FratTA, A., Griffiero, G. , Nieddu, S., "Comparative analysis among DSP and FPGA-based control capabilities in PWM power converters," in *30th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics Society, 2004. IECON 2004, 2004*, pp. 257-262 Vol. 1.

Gateau, G., Ruelland, R. , Aime, M., "A co-simulation environment for the test and the validation of digital control strategy on a mixed DSP/FPGA architecture," in *International Power Electronics and Motion Control Conference, Riga, Latvia, September 2-4, 2004, 2004*.

Girón, C.; 2007" Sistema de comunicaciones para un convertidor destinado a generación eólica distribuida,".

Greer, C., et al; 2014" NIST framework and roadmap for smart grid interoperability standards, release 3.0,". <http://dx.doi.org/10.6028/NIST.SP.1108r3>.

Halevi, Y., Ray, A., "Integrated communication and control systems: Part I—Analysis," *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, vol. 110, no. 4, pp. 367-373, December 1 1988.

Hingorani, N., Gyugyi, L., "Understanding FACTS: Concepts and Technology of Flexible AC Transmission Systems", Wiley-IEEE Press, 2000.

Hlatshwayo, M., Chowdhury, S., Chowdhury, S. P. , Awodele, K. O., "Reliability enhancement of radial distribution systems with DG penetration," in *Universities Power Engineering Conference (UPEC), 2010 45th International, 2010*, pp. 1-6.

Ho, W. K., Hang, C. C., Zhou, J., "Performance and gain and phase margins of well-known PI tuning formulas," *IEEE Trans. Control Syst. Technol.*, vol. 3, no. 2, pp. 245-248 1995.

Hu, S., Yan, W., "Stability robustness of networked control systems with respect to packet loss," *Automatica*, vol. 43, no. 7, pp. 1243-1248, 7 2007.

Huerta, F., Cóbreces, S., Rodríguez, F., Pizarro, D. , Meca, F., "Black-box identification for an auto-tuned current controller working with voltage source converters connected to the grid through a LCL filter," in *Industrial Electronics (ISIE), 2010 IEEE International Symposium on, 2010*, pp. 96-101.

Huerta, F., Pizarro, D., Cóbreces, S., Rodríguez, F. J., Girón, C., Rodríguez, A., "LQG servo controller for the current control of grid-connected voltage-source converters," *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 59, no. 11, pp. 4272-4284 2012.

International Energy Agency, "World Energy Outlook 2014," 2015.

Iwanski, G. , Koczara, W., "Control system of the variable speed autonomous doubly fed induction generator," in *Proceedings of International Power Electronics and Motion Control Conference-EPE-PEMC'04*, 2004.

Ji, Y., "Stability and control of discrete-time jump linear systems," *Control-Theory and Advanced Technology*, vol. 7, no. 2, pp. 247-270 1991.

Juanjuan, W., Chuang, F., Yao, Z., "Design of WAMS-based multiple HVDC damping control system," *IEEE transactions on smart grid*, vol. 2, no. 2, pp. 363-374 2011.

K. Hopkinson, Xiaoru Wang, R. Giovanini, J. Thorp, K. Birman, D. Coury, "EPOCHS: A platform for agent-based electric power and communication simulation built from commercial off-the-shelf components," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 21, no. 2, pp. 548-558 2006.

Kales, P., "Reliability for technology, engineering and management", Prentice-Hall, 1998.

Kounev, V., Levesque, M., Tipper, D. , Gomes, T., "On smart grid communications reliability," in *Design of Reliable Communication Networks (DRCN), 2015 11th International Conference on the*, 2015, pp. 33-40.

Krause, P. C., Wasynczuk, O., Sudhoff, S. D., Pekarek, S., "Analysis of electric machinery and drive systems", John Wiley & Sons, 2013.

Kuo, B. C., "Sistemas de control automático", 7ª edición ed., Prentice Hall, 1996.

Kuzlu, M., Pipattanasomporn, M., Rahman, S., "Communication network requirements for major smart grid applications in HAN, NAN and WAN," *Computer Networks*, vol. 67, pp. 74-88, 7/4 2014.

Lienhardt, A., Gateau, G., Meynard, T. A., "Digital sliding-mode observer implementation using FPGA," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 54, no. 4, pp. 1865-1875 2007.

Little, J. D. C., "A proof for the queuing formula: $L = \lambda W$," *Oper. Res.*, vol. 9, no. 3, pp. 383-387, 06/01; 2014/11 1961. <http://dx.doi.org/10.1287/opre.9.3.383>.

Liu, G. P., "Predictive controller design of networked systems with communication delays and data loss," *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, vol. 57, no. 6, pp. 481-485 2010.

Liu, G. P., Chai, S. C., Mu, J. X., Rees, D., "Networked predictive control of systems with random delay in signal transmission channels," *Intern. J. Syst. Sci.*, vol. 39, no. 11, pp. 1055-1064, nov 2008. <http://dx.doi.org/10.1080/00207720802085278>.

Martin, K. E., Benmouyal, G., Adamiak, M., Begovic, M., Burnett, R., Carr, K., Cobb, A., Kusters, J., Horowitz, S., Jensen, G., "IEEE standard for synchrophasors for power systems," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 13, no. 1, pp. 73-77 1998.

Mazo, M., Tabuada, P., "Input-to-state stability of self-triggered control systems," in *Decision and Control, 2009 held jointly with the 2009 28th Chinese Control Conference. CDC/CCC 2009. Proceedings of the 48th IEEE Conference on*, 2009, pp. 928-933.

Ministerio de Economía. Orden ECO/797/2002, de 22 de marzo, por la que se aprueba el procedimiento de medida y control de la continuidad del suministro eléctrico. Available: https://www.boe.es/diario_boe/txt.php?id=BOE-A-2002-7133.

Montestruque, L. A., Antsaklis, P., "Stability of model-based networked control systems with time-varying transmission times," *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 49, no. 9, pp. 1562-1572 2004.

«The Story of the PING Program» 2017. Disponible: <http://ftp.arl.mil/~mike/ping.html>.

Nagle, J., "Congestion control in IP/TCP internetworks," *RFC896* 1984.

Nguyen, C. P., Flueck, A. J., "Modeling of communication latency in smart grid," in *Power and Energy Society General Meeting, 2011 IEEE*, 2011, pp. 1-7.

Ottersten, R., "On control of back-to-back converters and sensorless induction machine drives", Chalmers University of Technology, 2003.

Proyecto GAD 2016. Disponible: http://gad.ite.es/index_es.html.

Proyecto PRICE 2016. Disponible: <http://www.ree.es/es/red21/idi/proyectos-idi/proyecto-price>.

Rizo, M., Liserre, M., Bueno, E. J., Rodriguez, F. J., Giron, C., "Voltage control architectures for the universal operation of DPGS," *Industrial Informatics, IEEE Transactions on*, vol. 11, no. 2, pp. 313-321 2015.

Rodríguez, A., Giron, C., Rizo, M., Sáez, V., Bueno, E. J., Rodríguez, F. J., "Comparison of current controllers based on repetitive-based control and second order generalized integrators for active power filters," in *2009 35th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics*, 2009, pp. 3223-3228.

Rodríguez, F. J., Giron, C., Bueno, E. J., Hernandez, A., Cobreces, S., Martin, P., "Remote laboratory for experimentation with multilevel power converters," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 56, no. 7, pp. 2450-2463 2009.

Sáez, V., Martín, A., Rizo, M., Rodríguez, A., Bueno, E. J., Hernández, A., Miron, A., "FPGA implementation of grid synchronization algorithms based on DSC, DSOGI_QSG and PLL for distributed power generation systems," in *2010 IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, 2010, pp. 2765-2770.

Seiler, P., Sengupta, R., "An H/sub/spl infin//approach to networked control," *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 50, no. 3, pp. 356-364 2005.

Stahlhut, J. W., Browne, T. J., Heydt, G. T., Vittal, V., "Latency viewed as a stochastic process and its impact on wide area power system control signals," *Power Systems, IEEE Transactions on*, vol. 23, no. 1, pp. 84-91 2008.

Sumper, A., Sudrià, A., Ramirez, R., Villafáfila, R., Chindris, M., " Índices de continuidad en redes de distribución y su mejora." in Anonymous . 9º Congreso HISPANO LUSO Ingeniería Eléctrica (9CHLIE), 2005.

Taylor, C. W., Erickson, D. C., Martin, K. E., Wilson, R. E., Venkatasubramanian, V., "WACS-wide-area stability and voltage control system: R&D and online demonstration," *Proc IEEE*, vol. 93, no. 5, pp. 892-906 2005.

Warren, C. A., "Distribution reliability: What is it?" *Industry Applications Magazine, IEEE*, vol. 2, no. 4, pp. 32-37 1996.

Wu, J., Chen, T., "Design of networked control systems with packet dropouts," *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 52, no. 7, pp. 1314-1319 2007.

Yazdani, A., Iravani, R., "Static Compensator (STATCOM)", 2010.

Yu, J., Kim, S., Lee, B., Won, C., Hur, J., "Fuzzy-logic-based vector control scheme for permanent-magnet synchronous motors in elevator drive applications," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 54, no. 4, pp. 2190-2200 2007.

Z. Papir, "Queueing theory with applications to packet telecommunications [book review]," *IEEE Communications Magazine*, vol. 44, no. 5, pp. 14-16 2006.

Zhang, W., Branicky, M. S., Phillips, S. M., "Stability of networked control systems," *IEEE Control Systems*, vol. 21, no. 1, pp. 84-99 2001.

Zhang, L., Hristu-Varsakelis, D., "Communication and control co-design for networked control systems," *Automatica*, vol. 42, no. 6, pp. 953-958, 6 2006.