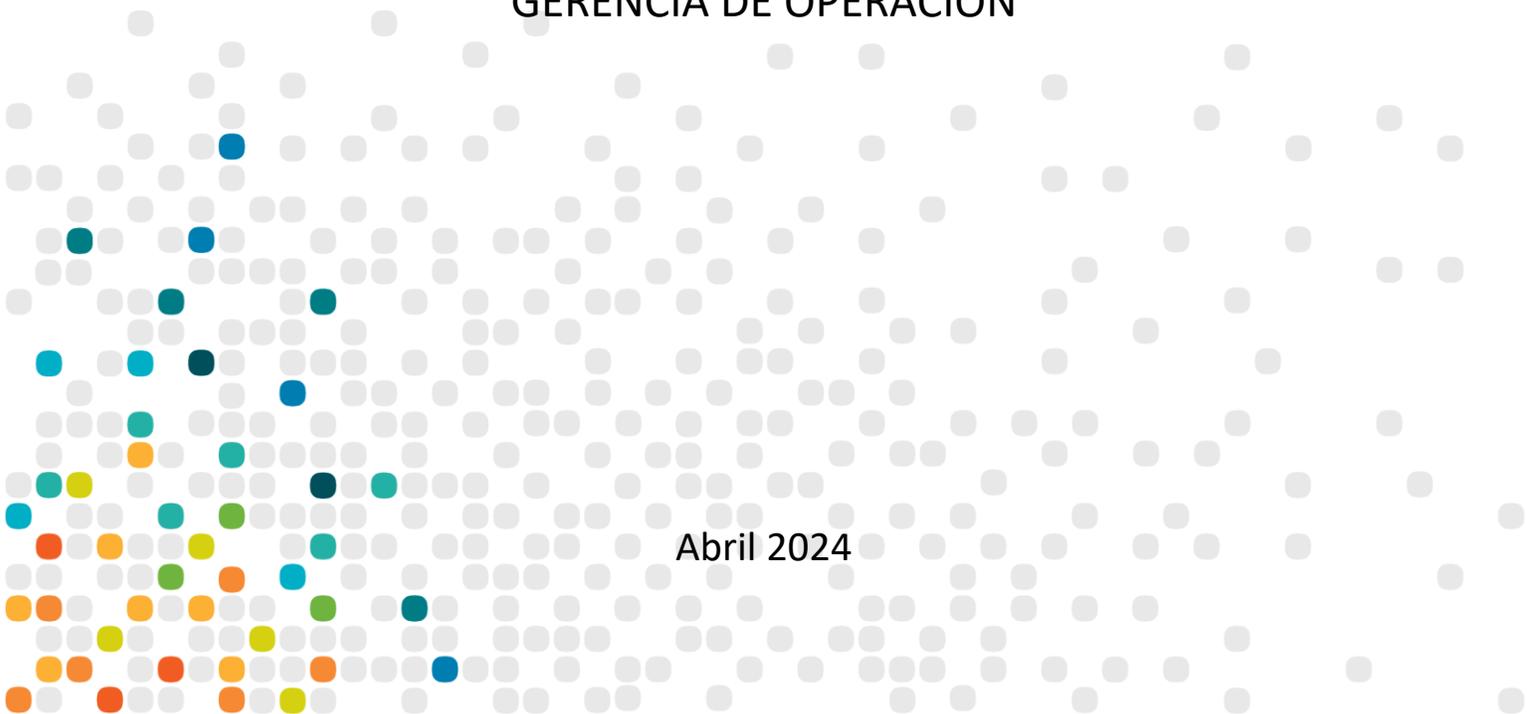

ESTUDIO DE SINTONIZACIÓN DE ESTABILIZADORES DE SISTEMAS DE POTENCIA (PSS)

Informe Preliminar

GERENCIA DE OPERACIÓN

Abril 2024



**Estudio de Sintonización de Estabilizadores de Sistemas de Potencia (PSS)
Informe preparado por el Departamento de Estudios Eléctricos**

Rev.	Fecha	Comentario	Realizó	Revisó / Aprobó
1	19-04-2024	Informe Preliminar	Carlos Alvear A. Hernán Barra C. Michelle Cajas R. Marcelo Cifuentes R. Carlos Prieto C	Eugenio Quintana P. Víctor Velar G.

CONTENIDO

1	RESUMEN EJECUTIVO	7
2	INTRODUCCIÓN	11
3	ANTECEDENTES	12
3.1	Norma Técnica de Seguridad y Calidad de Servicio	12
3.2	Topología y Horizonte de Estudio	16
3.3	Proyectos incluidos en Estudio	16
3.4	PSS Homologados	19
3.5	Áreas de Control de Tensión.....	22
4	ALCANCES	23
5	MARCO TEÓRICO.....	24
5.1	Comportamiento Dinámico de Máquinas Síncronas	24
5.1.1	Torque sincronizante	25
5.1.2	Torque de amortiguación	25
5.2	Análisis Modal.....	26
5.3	Principio de Estabilización de PSS y Consideraciones Generales	27
5.3.1	PSS Basados en Velocidad	27
5.3.2	PSS Basados en Frecuencia	28
5.3.3	PSS Basados en Potencia	28
5.3.4	PSS Basados en Integral de Potencia Acelerante.....	28
5.3.5	Otras Consideraciones	30
6	METODOLOGÍA	31
6.1	Análisis Modal.....	31
6.2	Caracterización de Modos Críticos	32
6.3	Verificación Dinámica	32
6.4	Definición de Recomendaciones.....	32
6.4.1	Modos Interárea.....	33
6.4.2	Modos Locales Interplanta	34
6.4.3	Modos Locales Intraplanta	35
7	DEFINICIÓN DE ESCENARIOS	36
7.1	Escenarios Red N Demanda Alta y Baja	36
7.2	Escenarios Red N-1	39
8	RESULTADOS ANÁLISIS MODAL.....	40

8.1	Escenarios Demanda Alta	40
8.1.1	E1 DA Día Marzo 2024	40
8.1.2	E2 DA Noche Diciembre 2024.....	45
8.2	Escenarios Demanda Baja	49
8.2.1	E3 DB Día Abril 2024.....	49
8.2.2	E4 DB Noche Diciembre 2024.....	52
9	CARACTERIZACIÓN DE MODOS ELECTROMECAÑICOS CRÍTICOS.....	57
9.1	Modos Interárea	57
9.1.1	Interárea Centro Norte – Centro Sur - Sur 0,91 [Hz]	58
9.1.2	Interárea Centro Norte – Centro Sur 1,34 [Hz].....	59
9.2	Modos Locales Interplanta	60
9.2.1	Área Sur: Palmar - Correntoso - Cumbres - Rucatayo - Canutillar 1,57 [Hz].....	60
9.2.2	Mocho – Pilmaiquén – Cumbre - Pullinque 1,30 [Hz].....	61
9.2.3	Capullo – Cumbres – Mocho – Pulelfu – Callao - Carilafquén 1,30 [Hz]	62
9.2.4	Pilmaiquén – Canutillar 1,62 [Hz]	63
9.2.5	Lautaro - Mocho 1,16 [Hz]	64
9.2.6	Alto Renaico – Picoiquén 3,3[Hz].....	65
9.2.7	Cipreses – Curillinque - Isla 1,11 [Hz].....	66
9.2.8	Viñales - Celco 0,89 [Hz]	67
9.2.9	Cipreses – Curillinque – Isla – Lautaro 1,19[Hz].....	68
9.2.10	Chacayes – Sauzal – Sauzalito 1,25 [Hz].....	69
9.2.11	Carena – CMPC Cordillera – Santa Marta 2,09 [Hz].....	70
9.3	Modos Locales Intraplanta	70
9.3.1	Alfalfal 1,52 [Hz]	71
9.3.2	Los Molles 2,11 [Hz].....	72
9.3.3	Machicura 1,15[Hz].....	73
9.3.4	San Ignacio 1,44 [Hz]	74
9.3.5	Carilafquén 0,86 [Hz]	75
9.3.6	Cipreses 1,25 [Hz]	76
9.3.7	Convento Viejo 2,47 [Hz]	77
9.3.8	Lautaro 1,64 [Hz]	78
9.3.9	CMPC Pacífico 1,71 [Hz].....	79
9.3.10	Santa Marta 1,12 [Hz]	80

9.3.11	Mapa 2,72 [Hz].....	81
9.3.12	Los Quilos 1,71[Hz]	82
9.3.13	Nueva Aldea 0,77 [Hz].....	83
9.3.14	Pilmaiquén 1,72 [Hz]	84
9.3.15	Canutillar 1,79 [Hz]	85
9.3.16	Angostura 0,76 [Hz]	86
9.3.17	Ancoa 1,28 [Hz].....	87
9.3.18	Energía Pacífico 1,39 [Hz].....	88
9.3.19	Palmucho 1,90 [Hz]	89
9.3.20	Malalcahuello 1,33 [Hz]	90
9.3.21	Colbún 1,61 [Hz].....	91
9.3.22	Palmar 1,49 [Hz].....	92
9.3.23	Puntilla 1,77 [Hz].....	93
9.3.24	Correntoso 1,66 [Hz]	94
9.3.25	Juncal 1,45 [Hz]	95
9.3.26	Itata 1,02 [Hz]	96
9.3.27	Las Lajas 0,77 [Hz]	97
9.4	Modos Locales ERV	97
9.4.1	Modo PE Monte Redondo	98
9.4.2	Modo PE Sierra Gorda	99
9.4.3	Modo PE Cabo Leones	100
9.4.4	Modo PE Aurora	101
9.4.5	Modo PE Valle de los Vientos	102
9.4.6	Modo PE El Arrayán	103
9.4.7	Modo PE Talinay Oriente.....	104
9.4.8	Modo PE Los Cururos.....	105
9.4.9	Modo PE Sarco.....	106
9.4.10	Modo PE Tchama	107
9.4.11	Modo PE Los Olmos	108
9.4.12	Modo PE Puelche Sur.....	109
9.4.13	Modo PE El Totoral	110
9.4.14	Modo PE Alena.....	111

9.4.15	Modo PE Calama	112
9.4.16	Modo PE Punta Colorada	113
9.4.17	Modo PE Llanos del Viento	114
9.4.18	Conclusiones Modos Locales ERV	114
10	ANÁLISIS MODOS INESTABLES	116
10.1	Modos Locales Kelar	116
10.1.1	Caracterización del Modo	117
10.1.2	Análisis de Sensibilidad del Modo.....	119
10.1.3	Análisis Estabilidad ante Perturbaciones	122
10.2	Modos Locales inestables con participación significativa de Plantas ERV	126
10.2.1	Modo PFV Machicura.....	126
10.2.2	Modo PFV Cerro Dominador.....	127
10.2.3	Modo PE Sierra Gorda.....	128
10.2.4	Modo PE Los Olmos	129
10.2.5	Modo PE Llano del viento	129
10.2.6	Conclusiones Modos Locales inestables ERV	130
11	RESUMEN RESULTADOS CARACTERIZACIÓN MODOS ELECTROMECAÑICOS CRÍTICOS Y RECOMENDACIONES.....	131
12	VERIFICACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DEL SEN.....	139
13	CONCLUSIONES	141
14	BIBLIOGRAFÍA.....	145

1 RESUMEN EJECUTIVO

El objetivo principal de este Estudio es determinar en qué condiciones de operación y en cuáles unidades generadoras sincrónicas deberá estar operativo el PSS.

Conforme con lo señalado, se desarrolló un análisis que permite evaluar los ajustes de los controladores implementados respecto de la estabilidad de pequeña señal y el amortiguamiento de los modos electromecánicos interárea del SEN.

Para estos efectos, se realizaron análisis modales de pequeña señal, que permiten identificar los modos oscilatorios electromecánicos con mayor impacto en el SEN, así como las centrales con mayor participación en ellos. Para lo anterior, se analizaron escenarios que cubrieran las condiciones previstas más críticas desde el punto de vista de las oscilaciones electromecánicas. Estos escenarios se pueden ver en detalle en el punto 7 de este Informe.

Dado lo anterior, considerando los escenarios del SEN ya indicados, se han ejecutado la herramienta de análisis modal disponible en el software de simulación PowerFactory de DiGSILENT.

Los análisis realizados se dividen en 3 etapas.

1. En primera instancia, se deshabilitaron los controladores y se analizaron los resultados para los modos electromecánicos naturales.
2. Posteriormente, se efectuaron los análisis con los controladores habilitados, pero con los PSS fuera de servicio (F/S). dado que la evidencia muestra que los controladores asociados a sistemas de excitación y controladores de carga/velocidad tienden a empeorar el amortiguamiento e introducir modos inestables.
3. Finalmente se realiza el análisis con los PSS en servicio (E/S) para apreciar el efecto de estos estabilizadores en el amortiguamiento y estabilidad de pequeña señal del SEN.

Como resultado de los análisis modales realizados, se destaca que:

- Para todos los escenarios y contingencias analizados, no fue detectada la presencia de modos de oscilación electromecánicos interárea inestables (en el semiplano derecho).
- Si bien fue detectado un modo inestable de carácter no oscilatorio en las unidades de la Central Kelar, se realizaron diversos análisis que descartan riesgos para la operación del SEN. Particularmente, fueron realizados análisis de gran señal ante contingencias de severidad 4, sin observar problemas de estabilidad y se confirmó que los modos estarían más bien asociados a los modelos para bajos pasos de integración, según es señalado en el informe de homologación de la central.
- Conjuntamente, fueron encontrados modos inestables de carácter local asociados a controles de parques ERV (Energía Renovable Variable). Sin embargo, no existe evidencia de estos en la operación real del SEN y la NT SyCS no establece una exigencia para la instalación de estabilizadores en estos casos.

Luego del análisis modal, se analizaron los modos de oscilación electromecánicos críticos. Para ello se establecieron los siguientes criterios:

1. Los modos críticos se consideran aquellos que poseen un factor de amortiguamiento inferior a 10% para el caso Red N e inferior a 5% para red N-1.
2. Posteriormente, dichos modos fueron clasificados de acuerdo con la cantidad y ubicación de unidades donde se manifiesta apreciablemente (factores de observabilidad de velocidades rotóricas) en inter-área y locales.
3. Luego, se caracterizaron detalladamente en base a los diagramas fasoriales de sus factores de observabilidad y gráficos de barras de sus factores de participación, considerando sus indicadores principales (parte real, parte imaginaria, frecuencia amortiguada, factor de amortiguamiento, etc.).

Considerando los criterios descritos, en los escenarios estudiados se obtuvieron 2 modos críticos de carácter interárea:

- Centro Norte – Centro Sur - Sur 0,91 [Hz]: Este modo tiene un amortiguamiento de alrededor de 5,97%, se manifiesta en la mayoría de los escenarios y, si bien se presentaría en una gran cantidad de unidades, la participación significativa es exclusiva de las unidades de Central Las Lajas.
- Centro Norte – Centro Sur 1,34 [Hz]: Este modo tiene un amortiguamiento de alrededor de 9,75%, se presenta en solo uno de los escenarios y las unidades de Central Nehuenco II son las únicas con participación significativa.
- Hay otro modo, el Área Sur 1,57 [Hz] que, si bien no es interárea, se manifiesta en bastantes unidades y en varios escenarios. El amortiguamiento más bajo es alrededor de 8,7% y las participaciones mayores corresponden a las unidades de Rucatayo y Canutillar.

Por lo tanto, se recomienda en todos los casos que las unidades señaladas realicen análisis que verifiquen el correcto funcionamiento y sintonización de sus PSS. Debido a que son unidades cuya potencia nominal está por sobre los 50 [MW], deben contar con PSS y además deben verificar que amortiguan correctamente modos interárea, en conformidad con el art 8-20 NT SyCS.

Por otra parte, fueron encontrados modos críticos que podrían considerarse electromecánicos y de carácter local, en los cuales se aprecia una participación significativa de casi exclusivamente parques eólicos. En este sentido:

- Según establece la NT SyCS vigente, la exigencia de la instalación de un PSS es aplicable solo a las unidades sincrónicas y no se establece ni especifica qué requerimiento es exigible para parques eólicos.
- La gran mayoría de estos modos tienen un amortiguamiento sobre 5% e incluso cercano a 10%, por lo que no se traducen en problemas de bajo amortiguamiento de transferencias de potencia (art. 5-38 NT SyCS).

- No existe evidencia en la operación real del SEN de problemas de oscilaciones indeseadas asociadas a parques eólicos
- Actualmente, no se considera necesario dar recomendaciones para parques eólicos respecto al amortiguamiento de oscilaciones electromecánicas. Sin embargo, en vista de la evolución dinámica del SEN y las tendencias en otros sistemas con alta penetración de energía basada en inversores, en el mediano plazo se podría requerir la implementación de soluciones análogas a los PSS para los parques eólicos.

En cuanto a los resultados de los análisis de modos críticos, estos se encuentran resumidos en la Tabla 75 del Punto 11, donde para cada unidad participante en modos críticos se indica si cuentan con modelos homologados, poseen PSS y finalmente, se dan recomendaciones al respecto. Como resultado del análisis de los modos críticos y las recomendaciones detalladas en el punto 6.4, en la Tabla 1 se señalan las unidades a las que se recomienda revisar sus ajustes de PSS, dado que tienen una participación significativa en modos críticos relevantes.

Tabla 1: Unidades a las que se recomienda Revisión de Ajustes de PSS.

UNIDAD	MODOS CRÍTICOS	
	Frecuencia [Hz]	Amortiguamiento %
HE CANUTILLAR U1	Mocho – Pilmaiquén – Cumbre - Pullinque 1,30 [Hz] 9,37%	
	Pilmaiquén - Canutillar 1,62[Hz] 8,72%	
	Área Sur: Palmar - Correntoso - Cumbres - Rucatayo - Canutillar 1,57 [Hz] 9,75%	
	Canutillar 1,79 [Hz]	
HE CANUTILLAR U2	Mocho – Pilmaiquén – Cumbre - Pullinque 1,30 [Hz] 9,37%	
	Pilmaiquén - Canutillar 1,62[Hz] 8,72%	
	Área Sur: Palmar - Correntoso - Cumbres - Rucatayo - Canutillar 1,57 [Hz] 9,75%	
	Canutillar 1,79 [Hz]	
HP CHACAYES U1	Chacayes – Sauzal – Sauzalito 1,25 [Hz]	
HP CHACAYES U2	Chacayes – Sauzal – Sauzalito 1,25 [Hz]	
HE CIPRESES U1	Cipreses - Curillinque - Isla 1,11[Hz] 6,73%	
	Cipreses – Curillinque – Isla – Lautaro 1,19[Hz] 9,9%	
	Cipreses 1,25 [Hz]	
HE CIPRESES U3	Cipreses - Curillinque - Isla 1,11[Hz] 6,73%	
	Cipreses – Curillinque – Isla – Lautaro 1,19[Hz] 9,9%	
	Cipreses 1,25 [Hz]	
HE COLBUN U2	Colbún 1,61 [Hz] 2,9%	
HP CURILLINQUE U1	Cipreses - Curillinque - Isla 1,11[Hz] 6,73%	
	Cipreses – Curillinque – Isla – Lautaro 1,19[Hz] 9,9%	
HP ISLA U1	Cipreses - Curillinque - Isla 1,11[Hz] 6,73%	
	Cipreses – Curillinque – Isla – Lautaro 1,19[Hz] 9,9%	
HP ISLA U2	Cipreses - Curillinque - Isla 1,11[Hz] 6,73%	
	Cipreses – Curillinque – Isla – Lautaro 1,19[Hz] 9,9%	
HP LAS LAJAS U1	Interárea CN-CS-Sur 0,91[Hz] 5,97%	
HP LAS LAJAS U2	Interárea CN-CS-Sur 0,91[Hz] 5,97%	
HE MACHICURA U2	Machicura 1,15[Hz] 4,8% ¹	

¹ Frente a la contingencia Charrúa – Ancoa 500 kV L3 mostraba un comportamiento oscilatorio en la potencia activa generada luego de que en el periodo inicial de la simulación su potencia activa presentaba un comportamiento amortiguado.

UNIDAD	MODOS CRÍTICOS
	Frecuencia [Hz] Amortiguamiento %
TER NEHUENCO II CC1-TG	Interárea CN-CS 1,34[Hz] 9,75%
HP RUCATAYO U1	Mocho – Pilmaiquén – Cumbre - Pullinque 1,30 [Hz] 9,37%
	Área Sur: Palmar - Correntoso - Cumbres - Rucatayo - Canutillar 1,57 [Hz] 9,75%
	Pilmaiquén – Palmar 1,55[Hz] 9,92%

Adicionalmente existe un número de unidades que se requiere homologación y/o revisión de sus modelos dinámicos con prioridad debido a su participación en modos críticos, cuyo detalle también se muestra en la Tabla 75 del Punto 11. Lo anterior, en conjunto con la caracterización acuciosa de los modos electromecánicos críticos, constituye un diagnóstico detallado de la estabilidad de pequeña señal del SEN y de la verificación del cumplimiento de los estándares establecidos en la NT SyCS para los PSS asociados a las unidades del SEN correspondientes.

Además, fueron efectuadas simulaciones dinámicas para variados casos de operación, considerados como las más exigentes de acuerdo con los escenarios y contingencias analizadas. Para todos los casos los resultados mostraron que el comportamiento dinámico del SEN es satisfactorio, pese a la presencia de modos electromecánicos con un amortiguamiento inferior a 10% en Red N y 5% en Red N-1. A partir de lo anterior puede concluirse que si bien existen casos donde el SEN posee algunos modos de oscilación con amortiguamiento por debajo de lo establecido en la NT SyCS, no existen condiciones para las contingencias simples analizadas, que deriven en un riesgo para la seguridad de la operación del SEN, ya que no se cuenta con evidencias operacionales que sugieran lo contrario.

Finalmente, dado que los resultados del análisis modal muestran la evidencia de situaciones donde es necesaria la revisión de ajustes de sus PSS, se recomienda instruir a que las unidades indicadas en la Tabla 75:

- La revisión de los ajustes de PSS.
- El diseño y ejecución de los planes de sintonización de PSS correspondientes. Lo que al menos conlleva:
 - La realización de ensayos necesarios para la implementación de los ajustes requeridos.
 - La homologación de los modelos dinámicos con ajustes actualizados.

La aplicación de lo anterior, y en conformidad a lo establecido en el punto 6.4, permitirá mejorar el amortiguamiento de la respuesta dinámica del SEN asociada a los modos críticos detectados, en particular aquellos que no cumplan con la normativa vigente.

2 INTRODUCCIÓN

Dadas las características topológicas propias del SEN, sistema extendido de gran longitud y poco enmallado, en algunas condiciones de operación se podrían manifestar problemas de oscilaciones de potencia poco amortiguadas, particularmente con posterioridad a perturbaciones provocadas por fallas en líneas de transmisión o pérdidas de generación.

Por otra parte, la expansión y evolución permanente del sistema, junto con una explotación más ajustada puede derivar en condiciones potenciales de operación más exigidas, por lo que se requiere verificar la eventual presencia de modos críticos de oscilaciones electromecánicas en el comportamiento del sistema. Para efectos de amortiguar dichos modos, particularmente las oscilaciones interáreas e interplantas (locales) comprendidas en un rango de 0,2 a 2,5[Hz], se instalan en los generadores sincrónicos dispositivos estabilizadores de potencia (PSS). Estos dispositivos actúan sobre los reguladores automáticos de tensión y utilizan comúnmente como señal de entrada la desviación de velocidad del rotor, la potencia acelerante o la desviación de frecuencia.

Al respecto, la Norma Técnica de Seguridad y Calidad de Servicio, en adelante la NT SyCS, establece que todas las unidades generadoras cuya potencia nominal sea de más de 50 [MW] deberán estar equipadas con un PSS. Además, la NT dispone que, en el caso que unidades menores a 50 [MW] o un conjunto de ellas provoquen oscilaciones indeseadas de potencia en el SI, ellas o un conjunto de ellas deberán estar equipadas con equipos PSS que permitan el control de dichas oscilaciones.

Además, la NT SyCS establece que el Coordinador determinará bajo qué circunstancias y en qué unidades generadoras deberá estar operativo el PSS, de acuerdo con los requerimientos del SEN. Tal decisión deberá ser debidamente justificada y fundamentada en base a los Estudios de la presente NT, a partir de los cuales el Coordinador definirá el principio de estabilización y los requisitos técnicos que deberán cumplir estos equipamientos.

Finalmente, la NT SyCS establece en el Art 1-9 como parte de los estudios del Coordinador un Estudio de Sintonización de Estabilizadores del Sistema de Potencia. Conforme con lo señalado, el Coordinador realizó un análisis para evaluar los ajustes implementados respecto la estabilidad de pequeña señal y amortiguamiento de modos electromecánicos del SEN y cuyos resultados se muestran en este informe.

3 ANTECEDENTES

3.1 Norma Técnica de Seguridad y Calidad de Servicio

En la Norma Técnica de Seguridad y Calidad de Servicio (NT SyCS) se establecen estándares y criterios relativos a la estabilidad de pequeña señal y sobre los estándares de diseño y operación de PSS, los cuales se detallan en los siguientes artículos.

Artículo 3-14

El sistema de excitación de toda unidad generadora sincrónica de potencia nominal igual o superior a 50 [MW] deberá contar con un limitador de mínima excitación y protección contra pérdida de excitación. El limitador de mínima excitación deberá impedir que, durante el estado de operación normal, la corriente de excitación descienda hasta valores que puedan causar la pérdida de sincronismo o la actuación de la protección de pérdida de excitación.

Asimismo, todas las unidades generadoras de más de 50 [MW] deberán estar equipadas con un PSS. En el caso que unidades menores a 50 [MW] o un conjunto de ellas provoquen oscilaciones indeseadas de potencia en el SI, ellas o un conjunto de ellas deberán estar equipadas con equipos PSS que permitan el control de dichas oscilaciones.

Artículo 5-38

El factor de amortiguación (ζ) de las oscilaciones electromecánicas luego de ocurrida una Contingencia Simple, medido sobre las oscilaciones de potencia activa en la línea de transmisión que transporta mayor potencia y cuya localización sea la más cercana al lugar de ocurrencia de la contingencia, deberá tener un valor mínimo del 5%.

Artículo 5-39

La determinación del factor ζ se realizará a través de la medición de los máximos de la onda de potencia activa en la línea de transmisión evaluada, correspondientes a dos semiciclos consecutivos de igual signo, ya sea positivo o negativo, designados como A1 y A2 respectivamente. El factor ζ resultará de aplicar la siguiente fórmula:

$$\zeta = - \frac{\log_e R_A}{2\pi \sqrt{1 + \frac{(\log_e R_A)^2}{4\pi^2}}} * 100$$

Donde $R_A = \frac{A_1}{A_2}$

En el caso que las oscilaciones iniciales tengan una forma irregular y en situaciones que ello aplique, se podrán utilizar metodologías para descomponer señales irregulares en sus componentes oscilatorias y amortiguadas. En este caso, se adoptará como valor de amortiguamiento el correspondiente al modo de oscilación amortiguada dominante, es decir aquel que tiene un período similar a la oscilación irregular. En el caso de no ser posible la descomposición anterior, el factor de amortiguamiento se calculará cuando la forma de onda presente un comportamiento oscilatorio amortiguado, posterior al comportamiento irregular.

Artículo 5-44

El Límite por Estabilidad Permanente corresponde a la máxima transferencia que permite operar en forma estable, sin que se ponga en riesgo el sincronismo de las unidades generadoras conectadas en las áreas asociadas a los extremos receptor y emisor de la instalación de transmisión.

Para ello, con el SI operando en Estado Normal o Estado de Alerta, el valor del factor de amortiguación de las oscilaciones electromecánicas en régimen permanente de pequeña señal deberá ser como mínimo 10%, valor que se adopta como margen de seguridad para la determinación del Límite por Estabilidad Permanente para cada Elemento Serie del ST.

El Límite por Estabilidad Permanente para el Elemento Serie en evaluación, considerando el margen de seguridad adoptado, estará dado por la potencia máxima transmitida que cumple la condición indicada en el presente artículo.

Artículo 8-7

Para la verificación de los requisitos técnicos de los sistemas de excitación y PSS de una unidad generadora, los respectivos Coordinados deberán realizar pruebas y/o mediciones a efectos de verificar que:

a) Se verificó la respuesta de los controles incorporados al sistema de excitación de la unidad generadora (controlador de tensión y limitadores del sistema de excitación) y se identificaron los parámetros y lazos de control que permiten homologar el modelo para simulaciones de transitorios electromecánicos ante grandes perturbaciones en el Sistema Eléctrico.

b) Las protecciones permiten operar a la unidad generadora dentro de los límites de operación en sobretensión y subtensión establecidos para el Sistema Eléctrico en el de Capítulo 5 de la presente norma.

c) La respuesta de la unidad ante variaciones rápidas de la tensión, y frente a fallas en la red de transmisión, cumple con las exigencias mínimas establecidas en el Artículo 3-12.

d) El sistema de excitación de toda unidad generadora sincrónica de potencia nominal igual o superior a 50 [MW] cuenta con un limitador de mínima excitación, que en operación normal

impida que la corriente de campo del generador descienda hasta valores que puedan causar la pérdida de sincronismo o la actuación de la protección de pérdida de excitación de acuerdo a lo establecido en el Artículo 3-14 de la NT SyCS.

e) El sistema de excitación de toda unidad generadora sincrónica de potencia nominal igual o superior a 50 [MW] cuenta con un estabilizador del sistema de potencia (PSS) correctamente calibrado, que mejora el amortiguamiento de los modos de oscilación electromecánicas (Artículo 3-14 de la NT SyCS), sin afectar significativamente la regulación de tensión. A este último efecto, mediante pruebas se deberá probar que el lazo de regulación automática de velocidad presenta una muy baja participación en la banda de frecuencias correspondiente a las oscilaciones electromecánicas.

f) Las unidades generadoras sincrónicas pertenecientes a centrales eléctricas de potencia nominal total igual o mayor a 50 [MW] con dos o más unidades, deberán disponer de un sistema de excitación que permita recibir una señal proveniente de un control conjunto de potencia reactiva/tensión, cuya función sea controlar la tensión en barras de alta tensión de la central a un valor ajustado por el operador y efectuar una distribución proporcional de la potencia reactiva entre las unidades generadoras que se encuentren operando.

g) En el caso que exista más de una central eléctrica que inyecta su energía a una misma barra del Sistema Eléctrico y que la suma de sus potencias individuales sea superior a 200 [MW], el referido control podrá ser exigido a las centrales que el Coordinador determine, si los estudios específicos justifican la necesidad de implementar un control conjunto de su tensión.

Artículo 8-8

Mediante mediciones en terreno, se requiere identificar la respuesta de los controladores que intervienen en el lazo de control de la excitación de la unidad generadora, y verificar los parámetros que permitirán “homologar” los modelos de estos controladores para estudios de transitorios electromecánicos y/o electromagnéticos frente a pequeñas y grandes perturbaciones en el Sistema Eléctrico. A este fin se requiere:

a) Identificar/Verificar la función de transferencia del controlador de tensión.

b) Evaluar la respuesta temporal del lazo de regulación de tensión, con el generador operando en vacío y no sincronizado a la red:

I. Medición del tiempo de crecimiento – Intervalo de tiempo que demora la tensión en los terminales de la unidad generadora para aumentar del 10 al 90 % de su valor final, luego de la aplicación de un pequeño escalón en la referencia de tensión del controlador de tensión.

II. Medición del tiempo de establecimiento del controlador de tensión – Intervalo de tiempo que demora la tensión en los terminales de la unidad generadora para ingresar y

permanecer dentro de una banda de $\pm 5\%$ en torno a su valor final o de régimen, luego de aplicación de un pequeño escalón en la referencia de tensión del controlador de tensión.

III. Medición de tensiones máximas o extremas de corriente o tensión de campo del generador (techos de excitación) y límites electrónicos del controlador de tensión.

c) Evaluar la respuesta temporal del lazo de regulación con el generador operando en carga, en sincronismo con el Sistema Eléctrico sobre la base de:

I. La evaluación del amortiguamiento del “modo local de oscilación electromecánica” de la unidad generadora sin PSS.

II. La evaluación de la respuesta del sistema de excitación del generador bajo el control del/los limitadores/es de subexcitación, en caso de disponer de los mismos.

III. La evaluación de la respuesta del sistema de excitación del generador bajo el control del/los limitador/es de sobreexcitación, en caso de disponer de los mismos.

Artículo 8-9

Toda unidad generadora de potencia nominal igual o superior a 50 [MW], o que requiera estar equipada con PSS según establece el Artículo 3-14 de la NT SyCS, que se conecte al Sistema Eléctrico, adicionalmente deberá realizar las pruebas y/o mediciones siguientes:

a) Evaluación de la respuesta del sistema de excitación del generador bajo el control del/los limitador/es de subexcitación y sobreexcitación.

b) Evaluación de la respuesta del sistema de excitación del generador frente a la actuación del limitador de sobreflujo magnético (Volt/Hz).

c) Obtención de la respuesta en frecuencia de la función de transferencia del PSS.

d) Evaluación del amortiguamiento del “modo local” de oscilación electromecánica con PSS.

e) Respuesta temporal del lazo de regulación de tensión con el generador operando en carga, en sincronismo con el Sistema Eléctrico y el PSS conectado. Evaluación del amortiguamiento del “modo local de oscilación electromecánica” de la unidad generadora.

f) Determinación de la ganancia máxima del PSS y ajuste de la ganancia óptima.

g) Evaluación del efecto del controlador de velocidad de turbina sobre el control de la tensión de la unidad generadora debido al PSS.

h) Evaluación del desempeño del PSS en bajas frecuencias de oscilación (modos interáreas).

i) Determinación de los efectos de las variaciones rápidas de la potencia mecánica de la máquina motriz sobre el desempeño del PSS.

d) Verificación de estados operativos de régimen permanente extremos del diagrama de capacidad P-Q del generador en operación normal y de alerta.

Artículo 8-20

Con el fin de verificar las características del lazo de control y la capacidad del PSS para amortiguar eficientemente las oscilaciones electromecánicas comprendidas dentro de una banda de frecuencias de perturbación de 0,2 [Hz] a 2,5 [Hz] de cada unidad generadora, el Coordinador podrá realizar ensayos para el PSS que estime pertinente, los cuales incluirán como mínimo las siguientes pruebas:

a) Obtención de la respuesta en frecuencia de la función transferencia del PSS.

b) Medición del amortiguamiento del modo local de oscilación.

c) Determinación de la ganancia máxima del PSS y ajuste de la ganancia óptima.

d) Determinación de los efectos de las variaciones rápidas de la potencia mecánica de la máquina motriz sobre el desempeño del PSS

Artículo 8-21

Sin perjuicio de lo indicado en el artículo precedente, el Coordinador determinará bajo qué circunstancias y en qué unidades generadoras deberá estar operativo el PSS, de acuerdo a los requerimientos del SI.

Tal decisión deberá ser debidamente justificada y fundamentada en base a los Estudios de la presente NT, a partir de los cuales el Coordinador definirá el principio de estabilización y los requisitos técnicos que deberán cumplir estos equipamientos.

3.2 Topología y Horizonte de Estudio

La topología considerada para el análisis corresponde a la condición habitual en la que se estima operará el Sistema de Transmisión en el horizonte de evaluación del Estudio, comprendido entre el 1 de enero de 2024 y el 31 de diciembre de 2024.

3.3 Proyectos incluidos en Estudio

Se consideran aquellas obras que se detallan en la Resolución Exenta de la CNE que declara y actualiza instalaciones de generación y transmisión en construcción, de junio 2023 (inicio de

elaboración de base de datos para Estudio). Además de lo anterior, se considera el Reporte de Proyectos en Gestión de Conexión elaborado por el Coordinador en base a lo informado por los respectivos propietarios de las instalaciones para el horizonte del estudio.

Se consideraron las siguientes obras relevantes de generación y transmisión que se prevé entrarán en servicio dentro del horizonte de evaluación del Estudio.

El listado de los proyectos considerados en el estudio se muestra en la Tabla 2 y Tabla 3.

Tabla 2: Proyectos de Generación considerados para el Estudio

Proyecto	Fecha Estimada De Interconexión	Tipo de Tecnología	Potencia Neta [MW]	Ubicación (Región)	Punto de conexión
Las Salinas -Etapa 2	jul-23	Solar Fotovoltaico	34.8	Antofagasta	S/E Centinela 220 kV
Parque FV Willka	jul-23	Solar Fotovoltaico	98	Arica y Parinacota	S/E Parinacota 220 kV
Parque Eólico La Cabaña – Etapa 1 Fase 1	ago-23	Eólico	47	La Araucanía	S/E Parque Eólico Renaico 220 kV
Planta Solar Fotovoltaica Doña Antonia	sept-23	Solar Fotovoltaico	75	Coquimbo	S/E Seccionadora La Ruca 110 kV
Planta Solar CEME 1	oct-23	Solar Fotovoltaico	380	Antofagasta	S/E Miraje 220
Parque Eólico San Matías	oct-23	Eólico	81.7	Biobío	S/E Campo Lindo 33 kV
Parque Eólico Manantiales	nov-23	Eólico	27.1	Libertador General Bernardo O'Higgins	S/E Cardonal 23 kV
Las Salinas -Etapa 4	nov-23	Solar Fotovoltaico	93.5	Antofagasta	S/E Centinela 220 kV
Punta de Talca	nov-23	Eólico	80	Coquimbo	S/E Central Talinay Oriente 220 kV
Planta Fotovoltaica Gran Teno	nov-23	Solar Fotovoltaico	200	Maule	S/E Seccionadora Solís 154 kV
Parque Eólico Los Cerrillos	nov-23	Eólico	45.6	Libertador General Bernardo O'Higgins	S/E Cardonal 110 kV
Las Salinas -Etapa 5	dic-23	Solar Fotovoltaico	30.1	Antofagasta	S/E Centinela 220 kV
Los Cóndores	dic-23	Hidro – Pasada	150	Maule	S/E Ancoa 220 kV
Parque Fotovoltaico Sol de Vallenar	dic-23	Solar Fotovoltaico	100	Atacama	S/E Algarrobal 220 kV
Planta Fotovoltaica Tamango	dic-23	Solar Fotovoltaico	40	Maule	S/E Paso Hondo 66 kV
Parque Eólico La Cabaña – Etapa 1 Fase 2	ene-24	Eólico	57	La Araucanía	S/E Parque Eólico Renaico 220 kV
Parque Eólico Horizonte	ene-24	Eólico	800	Antofagasta	S/E Parinas 220 kV
Planta FV Tocopilla	feb-24	Solar Fotovoltaico	200.3	Antofagasta	S/E María Elena 220 kV
Parque Solar Fotovoltaico Tamarico	abr-24	Solar Fotovoltaico	144.7	Atacama	Nueva S/E Seccionadora Tamarico-Caserones 220 kV
Parque Fotovoltaico Don Humberto	may-24	Solar Fotovoltaico	73	Metropolitana de Santiago	S/E Punta Peuco 110 kV
Ñuble	jun-24	Hidro – Pasada	136	Ñuble	S/E Ancoa 220 kV
PFV Leyda	jun-24	Solar Fotovoltaico	80	Valparaíso	S/E Leyda 110 kV
Las Salinas -Etapa 6	jul-24	Solar Fotovoltaico	24.2	Antofagasta	S/E Centinela 220 kV
Libertad II	ago-24	Solar Fotovoltaico	122	Atacama	S/E Agrosuper 23 kV
Libertad III	ago-24	Solar Fotovoltaico	122	Atacama	S/E Agrosuper 23 kV
Parque Eólico Lomas de Taltal	oct-24	Eólico	342	Antofagasta	S/E Parinas 220 kV
Planta Fotovoltaica Aurora Solar	nov-24	Solar Fotovoltaico	187	Tarapacá	S/E Granja Solar 220 kV

Tabla 3: Proyectos de Transmisión considerados para el Estudio

Proyecto	Fecha de entrada en operación según Decreto de Adjudicación
Construcción Bypass para la Línea 1x220 kV Atacama – Esmeralda, la Línea 1x110 kV Esmeralda – La Portada y Línea 1x110 kV Mejillones – Antofagasta y Desmantelamiento – Etapa I	jul-23

Proyecto	Fecha de entrada en operación según Decreto de Adjudicación
Nueva Línea 2x220 kV Itahue – Mataquito	ago-23
Nueva S/E Mataquito 220/66 kV	ago-23
Construcción Bypass 2x110 kV San Rafael	ago-23
Cambio de Punto de Conexión Central Hidroeléctrica Laja (34,4 MW) a S/E El Rosal en 220 kV	ago-23
Aumento de capacidad del tramo de línea 2x220 kV Tap El Manzano – El Manzano	sept-23
Nueva Subestación Seccionadora Los Canelos 220-154/66 kV y Transformador 66/13,2 kV 30 MVA	sept-23
Seccionamiento de línea 1x154 kV Charrúa – Chillán	sept-23
Línea 1x110 kV Bosquemar – Tap Reñaca – Reñaca	oct-23
Aumento de Capacidad LT 1x220 kV Parque Eólico Renaico – Mulchén	oct-23
Nueva línea de transmisión 1x110 kV Bajos de Mena – Costanera	oct-23
Subestación Seccionadora Colina 110 kV	oct-23
Aumento de Capacidad Línea 2x110 kV Aconcagua – Esperanza, Segmento entre S/E Río Aconcagua y S/E Nueva Panquehue	dic-23
Nueva S/E Seccionadora Tamarico-Caserones 220 kV	dic-23
Subestación Seccionadora Solís	dic-23
Nueva S/E Seccionadora Parinas 500/220 kV	ene-24
Nueva S/E Seccionadora JMA 220 kV	ene-24
Nueva Línea 4x220 kV desde S/E Nueva Los Pelambres a Seccionamiento del segmento de la Línea 2x220 kV Los Piuquenes – Tap Mauro	ene-24
S/E Seccionadora Nueva La Negra 220/110 kV	ene-24
Nueva S/E Seccionadora Chagres 44 kV	ene-24
Nueva S/E La Señoraza 220/66 kV	ene-24
Ampliación Línea 2x220 kV Punta de Cortés – Tuniche: Incorporación de Paños de Línea	ene-24
Nuevo Transformador en S/E Punta de Cortés	ene-24
Ampliación en S/E Punta de Cortés para interconexión de Línea 2x220 kV Punta de Cortés – Tuniche	ene-24
Ampliación en S/E Nueva Valdivia – Etapa II	mar-24
Nueva Línea 2x66 kV Nueva Valdivia – Picarte, Tendido del Primer Circuito	mar-24
Aumento de Capacidad Línea 2x500 kV Alto Jahuel – Lo Aguirre y Ampliación en S/E Lo Aguirre	abr-24
Ampliación de Capacidad Línea 1x66 kV Charrúa – Chillán	abr-24
Nueva Línea 2x110 kV Alto Melipilla – Bajo Melipilla, tendido del primer circuito	jun-24
Nueva S/E Seccionadora Codegua	jun-24
Nueva S/E Seccionadora Loica y Nueva Línea 2x220 kV Loica – Portezuelo	jun-24
Nueva Línea 2x66 kV Nueva Nirivilo – Constitución, tendido del primer circuito	jun-24
Nuevo Transformador en S/E Illapel	jun-24
Ampliación en S/E Nueva Rafael 110 kV (2BP+BT)	jun-24
Ampliación en S/E Nueva San Rafael (NTR ATMT)	jun-24
Aumento de Capacidad Línea 1x110 kV Las Vegas – Esperanza	jun-24
Aumento de Capacidad Línea 1x110 kV Esperanza – Río Aconcagua	jun-24
Ampliación en S/E Chumaquito y Seccionamiento Línea 1x66 kV Rancagua – Rosario	jun-24
Aumento Capacidad de Línea 1x66 kV Rosario – San Fernando, segmento Tap Rengo – Pelequén	jun-24
Aumento Capacidad de Línea 1x66 kV Pelequén – Malloa	jun-24
Nueva S/E Caliche y línea de transmisión 2x220 kV Caliche – Geoglifos	jun-24
Aumento de capacidad línea 1x110 kV Puente Alto – Las Vizcachas	jul-24
S/E Nueva Casablanca 220/66 kV	ago-24
Nueva Línea 2x220 kV Nueva Alto Melipilla – Nueva Casablanca – La Pólvora – Agua Santa	ago-24
Nueva Línea 2x220 kV Mataquito – Nueva Nirivilo – Nueva Cauquenes – Dichato – Hualqui	ago-24
S/E Nueva Nirivilo 220/66 kV	ago-24
S/E Nueva Cauquenes 220/66 kV	ago-24
S/E Dichato 220/66 kV	ago-24
Nueva Línea 2x66 kV Nueva Cauquenes – Parral	ago-24
Nueva Línea 2x66 kV Nueva Cauquenes – Cauquenes	ago-24
Nueva Línea 2x66 kV Dichato – Tomé	ago-24
Nueva Línea 2x66 kV Hualqui – Chiguayante	ago-24
S/E Puerto Collahuasi y línea de transmisión 1x220 kV Tarapacá – Puerto Collahuasi	ago-24
Nueva S/E Seccionadora Cahuiza	ago-24
Nueva S/E Las Dunas	ago-24
Nuevas LT 1x220 kV Cahuiza – Las Dunas, 1x220 kV Cahuiza – Yareta y 1x220 kV Las Dunas – Yareta	ago-24
Nueva Línea de Transmisión 1x66 kV Los Canelos – Lucero	sept-24
Nuevo Equipo de Compensación Reactiva (NCER AT)	oct-24

Proyecto	Fecha de entrada en operación según Decreto de Adjudicación
Nueva S/E Seccionadora Los Poetas y Nueva Línea 1x66 kV Algarrobo – Los Poetas	oct-24
Subestación Seccionadora Cancura	nov-24
Ampliación en S/E Frontera y Seccionamiento Línea 2x220 kV Lagunas – Encuentro	dic-24
Ampliación en S/E Ana María y Seccionamiento Línea 2x220 kV Frontera – María Elena	dic-24
Tendido segundo circuito Línea 2x220 kV Nueva Chuquicamata – Calama	dic-24
Ampliación en S/E Don Goyo, Seccionamiento Línea Nueva Pan de Azúcar – Punta Sierra y Bypass Línea 2x220 kV Pan de Azúcar – La Cebada	dic-24
Aumento de capacidad Línea 2x220 kV La Cebada – Punta Sierra	dic-24
Ampliación en S/E Mulchén y Seccionamiento Línea 1x220 kV Charrúa – Temuco	dic-24

Además, se consideraron las siguientes fechas estimadas por el Coordinador para aquellos proyectos de transmisión cuyas fechas de entrada en operación han sufrido cambios importantes respecto de la fecha del decreto de adjudicación.

Tabla 4: Proyectos con cambio importante en fecha de entrada en operación.

Proyecto	Fecha de entrada en operación según Decreto de Adjudicación	Fecha estimada de entrada en operación según CEN
Proyecto Chiloé – Gamboa	abr-19	jun-24
Nueva Línea Nueva Maitencillo – Punta Colorada – Nueva Pan de Azúcar 2x220 kV, 2x500 MVA	abr-22	sept-23 a feb-24
Nueva Línea Nueva Pan de Azúcar – Punta Sierra – Los Pelambres 2x220 kV, 2x580 MVA	nov-22	oct-23 a dic-23
Línea Nueva Puerto Montt – Nueva Ancud 2x500 kV 2x1500 MVA y Nuevo cruce aéreo 2x500 kV 2x1500 MVA, ambos energizados en 220 kV y S/E Nueva Ancud 220 kV	nov-23	2 ^{do} semestre 2025 (optimista)
Aumento de Capacidad de Línea 2x220 kV Ciruelos – Cautín	dic-23	1 ^{er} semestre 2025 (optimista)
Nueva S/E Carimallin (Ex S/E Los Notros)	abr-24	oct-23 (fecha real)

3.4 PSS Homologados

A continuación, en la Tabla 5 se presenta un listado con los PSS homologados, los cuales se han considerado operativos para los fines del presente estudio. La BD DigSILENT PowerFactory corresponde a la publicada por el Coordinador en el mes de septiembre 2023².

Tabla 5: Listado de PSS Homologados BD DigSILENT del SEN considerada

id	Nombre Modelo	Carpeta BD DigSILENT	Red BD DigSILENT	Tipo BkDef*
1	ANG1_PSS	EXC ANG1	00NG	ANSALDO_PSS
2	ANG2_PSS	EXC ANG2	00NG	ANSALDO_PSS
3	PSS TG1A	EXCITACION TG1A	00NG	MICROREC K4.1_PSS
4	PSS TG1B	EXCITACION TG1B	00NG	MICROREC K4.1_PSS
5	PSS TV1C	EXCITACION TV1C	00NG	MICROREC K4.1_PSS
6	PSS TG2A	EXCITACION TG2A	00NG	MICROREC K4.1_PSS
7	PSS TG2B	EXCITACION TG2B	00NG	MICROREC K4.1_PSS
8	PSS TV2C	EXCITACION TV2C	00NG	MICROREC K4.1_PSS

² <https://www.coordinador.cl/operacion/documentos/modelacion-del-sen/modelos-digsilent/base-de-datos-digsilent/>

id	Nombre Modelo	Carpeta BD DlgSILENT	Red BD DlgSILENT	Tipo BIKDef*
9	pss2B_CTA	CTA_RAT	00NG	pss2B_THYRIPOL
10	pss2B_CTH	CTH_RAT	00NG	pss2B_THYRIPOL
11	pss2B_CTM2	Plant_CTM2_ME	00NG	pss_Unitrol_6800
12	Kelar TG1_PSS	Kelar TG1_EXC	00NG	MEGATROL_PSS2B
13	Kelar TG2_PSS	Kelar TG2_EXC	00NG	MEGATROL_PSS2B
14	Kelar TV_PSS	Kelar TV_EXC	00NG	BRUSH_PSS
15	pss_NTO1	Plant_NTO1_ME	00NG	pss_MEC700
16	pss_NTO2	Plant_NTO2_ME	00NG	pss_MEC700
17	pss2B_CTM3TG	CTM3_TG_Excitación	00NG	pss_Unitrol_6800
18	pss2B_CTM3TV	CTM3_TV_Excitación	00NG	pss_Unitrol_6800
19	pss_Cochrane	Plant_CCH2	00NG	pss_cochrane
20	pss_Cochrane	Cochrane_U1	00NG	pss_cochrane
21	U16_UNITROL_P_PSS2A	U16_Excitación	00NG	pss_PSS2B_UnitrolP
22	Salta 1+1 GT0 PSS	Salta 1+1 GT0	00NG	PSS_Salta
23	Salta 1+1 ST0 PSS	Salta 1+1 ST0	00NG	PSS_Salta
24	Salta 2+1 GT1 PSS	Salta 2+1 GT1	00NG	PSS_Salta
25	Salta 2+1 ST0 PSS	Salta 2+1 ST0	00NG	PSS_Salta
26	Salta 2+1 GT2 PSS	Salta 2+1 GT2	00NG	PSS_Salta
26	Salta 2+1 GT2 PSS	Salta 2+1 GT2	00NG	PSS_Salta
27	pss_IEM	Frame IEM	00NG	pss_Thyripol
28	PSS_A50	Planta - CSPCD - TV	00NG	PSS_BRUSH_A50
29	pss_Guacolda U1	P/S Guacolda 1	01Ata	pss_GUACOLDA_PSS2B
30	pss_Guacolda U2	P/S Guacolda 2	01Ata	pss_GUACOLDA_PSS2B
31	pss_Guacolda U3	P/S Guacolda 3	01Ata	pss_GUACOLDA_PSS2B
32	pss_Guacolda U4	P/S Guacolda 4	01Ata	pss_GUACOLDA_PSS2B
33	pssTaltal1	P/S Taltal 1	01Ata	pss_TALTAL
34	pssTaltal2	P/S Taltal 2	01Ata	pss_TALTAL
35	pss_GuacoU5	P/S Guacolda 5	01Ata	pss_GUACOLDAU5
36	pss_LQU1	pss_unitrol_6080	03VR	pss_unitrol_6080
37	pss_Blanco	P/S Blanco	03VR	pss_BLANCO
38	pss_LQU1	P/S Los Quilos 1	03VR	pss_unitrol_6080
39	pssLosQuilosU2	P/S Los Quilos 2	03VR	pss_LOSQUILOS12
40	pss_LosVientos	P/S Los Vientos	03VR	pss_LOS VIENTOS
41	pss_Alfalfal1	P/S Alfalfal 1	04RM	PSS_thy
42	pssAlfalfal2	P/S Alfalfal 2	04RM	pss_ALFALFAL2
43	pssNuevaRencaTG	P/S NRenca TG	04RM	pss_NUEVARENCATG
44	pssNuevaRencaTV	P/S NRenca TV	04RM	pss_NUEVARENCATV
45	PSS_thy	P/S Alfalfal II	04RM	pss_VOITH-Thyricon
46	PSS_CHLLAJU1	P/S CH LAS LAJAS U1	04RM	pss_VOITH-Thyricon
47	PSS_CHLLAJU2	Planta_CHLLAJU2	04RM	pss_VOITH-Thyricon
48	PSS_CHALF2U1	P/S Alfalfal II_U1	04RM	pss_VOITH-Thyricon
49	pssCandelaria1	P/S Candelaria TG1	05Col	pss_EX2100
50	pssCandelaria2	P/S Candelaria TG2	05Col	pss_EX2100
51	pssColbun2	P/S Colbun 2	05Col	pss_COLBUN2
52	pssMachicuraU1	P/S Machicura 1	05Col	pss_Unitrol_6000
53	PSS2B_U1	GMR35_U1	05Col	GMR35_PSS2B
54	PSS2B_U2	GMR35_U2	05Col	GMR35_PSS2B
55	pss_COLU1	P/S Colbun 1	05Col	pss_Unitrol_6800
56	pssNehuenco1TG	P/S Nehuenco 1 TG	06TC	pss_NEHUENCO1TG
57	pssNEHUENCO1TV	P/S Nehuenco 1 TV	06TC	pss_NEHUENCO1TV
58	pssNehuenco2TG	P/S Nehuenco 2 TG	06TC	pss_NEHUENCO2TG

id	Nombre Modelo	Carpeta BD DlgSILENT	Red BD DlgSILENT	Tipo BIKDef*
59	pssNehuenco2TV	P/S Nehuenco 2 TV	06TC	pss_NEHUENCO2TV
60	pss_Pehuenche1	P/S Pehuenche 1	06TC	pss_PWX6P4_invierte
61	pss_Pehuenche2	P/S Pehuenche 2	06TC	pss_PWX6P4_invierte
62	pssQuinteroTG1A	P/S Quinteros TG1A	06TC	pss_QUINTEROS
63	pssQuinteroTG1B	P/S Quinteros TG1B	06TC	pss_QUINTEROS
64	pss_Rapel1	P/S Rapel 1	06TC	pss_RAPEL
65	pss_Rapel2	P/S Rapel 2	06TC	pss_RAPEL
66	pss_Rapel3	P/S Rapel 3	06TC	pss_RAPEL
67	pss_Rapel4	P/S Rapel 4	06TC	pss_RAPEL
68	pss_Rapel5	P/S Rapel 5	06TC	pss_RAPEL
69	pssSanIsidro1TG	P/S San Isidro 1	06TC	pss_Mitsubishi_PSS2B
70	pssSanIsidro1TV	P/S San Isidro 1	06TC	pss_Mitsubishi_PSS2B
71	pssSanIsidro2TG	P/S San Isidro 2 TG	06TC	pss_SANISIDRO2
72	pssSanIsidro2TV	P/S San Isidro 2 TV	06TC	pss_SANISIDRO2
73	pss_LaMinaU1	P/S La Mina U1	06TC	pss_Reivax_invierte
74	pss_LaMinaU2	P/S La Mina U2	06TC	pss_Reivax_invierte
75	pss_Isla_U1	P/S Isla 1	7154	pss_PSS2A_Isla
76	pss_ISLA_U2	P/S Isla 2	7154	pss_PSS2A_Isla
77	pssPWX6P4_Curillinque_ok	P/S Currillinque	7154	pss_PWX6P4_invierte
78	pssPWX6P4_Cipreses1	P/S Cipreses 1	7154	pss_PWX6P4_invierte
79	pssPWX6P4_Cipreses2	P/S Cipreses 2	7154	pss_PWX6P4_invierte
80	pssPWX6P4_Cipreses3	P/S Cipreses 3	7154	pss_PWX6P4_invierte
81	pssANTUCO1	P/S Antuco 1	08Ch	pss_ANTUCO
82	pssANTUCO2	P/S Antuco 2	08Ch	pss_ANTUCO
83	pssELTORO1	P/S El Toro 1	08Ch	pss_ELTORO
84	pss_EIToroU2	P/S El Toro 2	08Ch	pss_ELTORO
85	pss_EIToroU3	P/S El Toro 3	08Ch	pss_ELTORO
86	pss_EIToroU4	P/S El Toro 4	08Ch	pss_ELTORO
87	pssLosPinos	P/S Los Pinos	08Ch	pss_LOSPINOS
88	pssPangue1	P/S Pangue 1	08Ch	pss_PANGUE
89	pssPangue2	P/S Pangue 2	08Ch	pss_PANGUE
90	pss_QuillecoU1	P/S Quilleco 1	08Ch	pss_QUILLECO1
91	pss_QuillecoU2	P/S Quilleco 2	08Ch	pss_QUILLECO2
92	pssRalco1	P/S Ralco 1	08Ch	pss_RALCO
93	pssRalco2	P/S Ralco 2	08Ch	pss_RALCO
94	pssRucueU1	P/S Rucue 1	08Ch	pss_Silcostat
95	pssRucueU2	P/S Rucue 2	08Ch	pss_Silcostat
96	pss_SantaMaria	P/S Santa Maria	08Ch	pss_SANTAMARIA
97	pss_SantaFe	P/S Santa Fe	08Ch	PSS_SF
98	pssLaja4	P/S Laja 4	08Ch	pss_CMPC_LAJA
99	pss_Horcones	P/S Horcones	09Con	pss_HORCONES
100	pss_ANTIU1	P/S Antihue 1	10Sur	pss_2b
101	pss_ANTIU2	P/S Antihue 2	10Sur	pss_2b
102	pssCanutillar1	P/S Canutillar 1	10Sur	pss_CANUTILLAR_
103	pssCanutillar2	P/S Canutillar 2	10Sur	pss_CANUTILLAR_
104	pss_Valdivia	P/S Valdivia	10Sur	pss_Hinfinite
105	pss_U2	P/S Angostura U2	10Sur	pss_Alstom
106	pss_U1	P/S Angostura U1	10Sur	pss_Alstom
107	pss_U3	P/S Angostura U3	10Sur	pss_Alstom

3.5 Áreas de Control de Tensión

Para la definición de modos inter-áreas se consideran las áreas de control de tensión establecidas en el Estudio de Control de Tensión y Requerimientos de Potencia Reactiva ECTyRPR vigente³. Estas ACT se encuentra definidas como se indica a continuación:

- Área Norte Grande: comprendida por las instalaciones desde la S/E Los Changos hacia el norte.
- Área Norte Chico: comprende las instalaciones desde la S/E Los Changos 500 kV, por el norte, hasta las SS/EE Polpaico 500 kV, Nueva Los Pelambres 220 kV y Los Vilos 220 kV, por el sur.
- Área Centro Norte: comprende a las instalaciones desde las SS/EE Polpaico 500 kV, Nueva Los Pelambres 220 kV y Los Vilos 220 kV, hasta la S/E Alto Jahuel 500 y 220 kV.
- Área Centro-Sur: Comprende a las instalaciones entre las subestaciones Alto Jahuel 500, 220, y 154 kV hasta Cautín 220 kV.
- Área Sur: Comprende las instalaciones desde la S/E Cautín 220 kV hacia el sur.

³ <https://www.coordinador.cl/operacion/documentos/estudios-para-la-seguridad-y-calidad-del-servicio/control-de-tension-y-requerimientos-de-potencia-reactiva/>

4 ALCANCES

En base a análisis de pequeña señal y a través de simulaciones dinámicas que verifiquen la respuesta transitoria del sistema, se deberá determinar:

- Qué unidades de generación sincrónica cuya potencia nominal esté sobre 50 [MW] deberán realizar modificaciones en los ajustes a sus PSS, considerando que deben contar con un PSS correctamente calibrado en conformidad con el Art 8-7 de la NT SyCS
- En qué condiciones de operación del sistema, unidades cuya potencia nominal sea menor a 50 [MW] deberán contar con PSS operativos, en conformidad con el Art NT SyCS 8-21

Lo anterior, debe estar en conformidad con el cumplimiento de los estándares operativos establecidos en la NT respecto los modos de oscilación electromecánicos. Específicamente lo dispuesto en los artículos 5-38 y 5-44 de la NT y SyCS.

Este estudio contempla un horizonte para el 2024 donde se determinaron los escenarios críticos respecto las oscilaciones electromecánicas previstas y contemplando casos para red N y red N-1.

El diagnóstico se deberá realizar mediante análisis de pequeña señal y determinar si los modos electromecánicos resultantes cumplen con el amortiguamiento establecido. De presentarse modos electromecánicos que no cumplan con lo requerido, se realizaran análisis en detalle del comportamiento de dichos modos para distintos escenarios, identificando como se manifiestan y las unidades que participan significativamente en dichos modos.

Posteriormente, se realizará la verificación del comportamiento dinámico del SEN ante las contingencias de severidad 4 en los tramos más importantes. Para evaluar el cumplimiento del amortiguamiento de las transferencias de potencia del sistema de transmisión ante contingencias, en específico el cumplimiento con lo establecido en el Art 5-38 de la NT SyCS.

Finalmente, luego de dicho diagnóstico y verificación, este estudio sentará las bases para instruir, a las empresas propietarias de las unidades relevantes, que se realicen los estudios y ensayos pertinentes para la implementación de ajustes y modificaciones que sean requeridos.

5 MARCO TEÓRICO

5.1 Comportamiento Dinámico de Máquinas Sincrónicas

El comportamiento dinámico de las máquinas sincrónicas está determinado por su inercia, sus ángulos rotóricos y el torque acelerante, el cual corresponde a la diferencia entre el torque mecánico que se aplica al eje y el torque eléctrico producido por el generador sobre su eje.

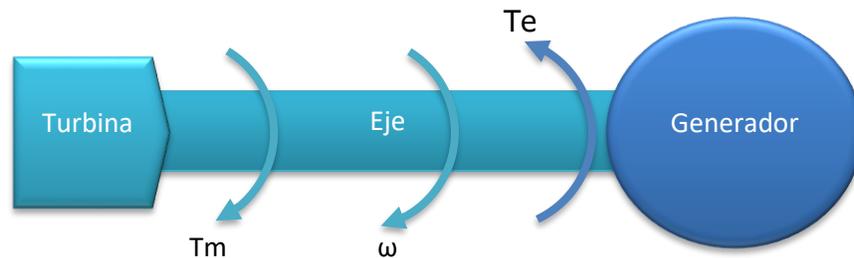


Figura 1: Torque Mecánico y Eléctrico aplicado al eje de una máquina sincrónica. T_m =torque mecánico, ω =velocidad angular, T_e = torque eléctrico.

En la medida que existe balance entre ambos torques, el torque acelerante es igual a cero y se tiene en una condición de estabilidad permanente del vínculo electromecánico del generador, que se refleja en que la potencia mecánica sobre el eje es igual a la potencia eléctrica inyectada a la red (despreciando pérdidas). Ante perturbaciones en la red, el torque eléctrico presenta variaciones y el torque acelerante es distinto de cero. Lo anterior se resumen en la siguiente expresión (se desprecia componentes de amortiguamiento).

$$\frac{2H}{\omega_0} \frac{d^2\delta}{dt^2} = T_a = T_m - T_e$$

Donde,

H : constante inercia conjunto turbogenerador en MW*segs/MVA

ω_0 : velocidad angular nominal en rads/segs

δ : ángulo rotórico en rads

T_a : torque acelerante en pu

T_m : torque mecánico en pu

T_e : torque eléctrico en pu.

A su vez, se puede considerar que, ante perturbaciones, el torque eléctrico tiene dos componentes, una en fase con el ángulo rotórico y otro en fase respecto la velocidad angular.

$$\Delta T_e = K_s \Delta \delta + K_D \Delta \omega$$

$K_S \Delta \delta$: componente del torque eléctrico en fase con el ángulo de potencia, denominado torque sincronizante.

$K_D \Delta \omega$: componente en fase con velocidad angular, denominado torque de amortiguamiento.

5.1.1 Torque sincronizante

El primer componente se denomina torque sincronizante y tiene directa relación con la inestabilidad no oscilatoria, donde ante la falta de éste el ángulo de potencia del o los generadores, luego de una perturbación, experimenta una excursión sin retornar a punto estable alguno y deriva en la pérdida de sincronismo.

Esta situación se produce en presencia de generadores interconectados mediante enlaces débiles y la forma de resolver lo anterior es, ante variaciones del torque eléctrico, generar el suficiente flujo magnético en el estator para que detenga el desplazamiento angular del rotor (además de mejorar el enlace construyendo más líneas en paralelo). Esto se ha llevado a cabo a través de la mejora de la acción del sistema de excitación, el cual debe contar con la suficiente capacidad y rapidez.

5.1.2 Torque de amortiguación

El segundo componente corresponde al torque de amortiguación y tiene relación con la estabilidad oscilatoria. Para describir lo anterior, debe asumirse que, por el hecho de estar en presencia de máquinas rotatorias, siempre existen pequeñas oscilaciones de carácter electromecánico (modos naturales de oscilación), las cuales mientras se amortigüen debidamente no representan mayores problemas.

Sin embargo, en la medida que con el avance tecnológico fueron requeridas unidades de mayor capacidad y tamaño, se incrementaron las reactancias equivalentes (reacción de armadura), lo que produce un detrimento en el torque sincronizante. Esto se tradujo en la necesidad de contar con sistemas de excitación más eficaces (más rápidos y efectivos, con ganancias mayores en el lazo cerrado de control), lo que conlleva un detrimento del torque de amortiguación [1] [2] [3].

Lo anterior, deriva del hecho que el sistema de excitación responde desmedidamente ante pequeñas perturbaciones y se origina una respuesta que se incrementa permanentemente, alcanzando la inestabilidad oscilatoria (amortiguamiento negativo) [3]. La herramienta para identificar estas situaciones es el análisis modal que considera un modelo linealizado del sistema. Los polos asociados a la función de transferencia del sistema dinámico están relacionados con los valores propios resultantes del análisis modal [1]. En caso de riesgo de inestabilidad oscilatoria, los polos tienen su parte real positiva (o se ubican en el semiplano derecho del plano polar). Lo anterior se produce por efecto de los elementos de control y básicamente un polo de parte real positiva significa una respuesta con una componente de carácter exponencial creciente (inestable).

Para atender estos requerimientos de torque de amortiguamiento se puede mejorar la impedancia de vinculación a través de líneas de transmisión en paralelo. Sin embargo, esto puede resultar generalmente muy costoso, razón por la cual fueron desarrollados los PSS (Power System

Stabilizers) que colaboran en mejorar la componente de amortiguamiento mediante una acción de control en el sistema de excitación.

5.2 Análisis Modal

Tal como fue señalado en el punto anterior, la herramienta para identificar situaciones de falta de torque de amortiguamiento es el análisis modal. Este análisis considera un modelo linealizado del sistema considerando análisis de pequeña señal.

Los polos correspondientes a los valores propios, los cuales derivan del análisis modal del modelo linealizado del sistema, proporcionan una solución teórica sobre los modos de oscilación electromecánicos que se encuentran asociados al ángulo del rotor o bien a la velocidad de los generadores del sistema.

Generalmente, los modos electromecánicos se encuentran en frecuencias entre los 0,2Hz y 2,5Hz. Las características más importantes de cada modo son la frecuencia de oscilación y el amortiguamiento. Si bien no hay rangos exactos, una categorización típica para las frecuencias asociadas a modos electromecánicos corresponde a:

- Modos locales: 0,7 – 2,0Hz.
- Modos íter-área: 0,2 – 0,7Hz.

Los valores propios del tipo par conjugado $\lambda = \sigma \pm j\omega$ produce modos oscilatorios como funciones sinusoidales, donde la parte real indica si el modo es amortiguado o inestable y la compleja la frecuencia de oscilación.

El coeficiente de amortiguamiento se obtiene mediante la siguiente expresión:

$$\zeta = \frac{-\sigma}{\sqrt{\sigma^2 + \omega^2}}$$

Este coeficiente determina la tasa de decaimiento de la amplitud de la oscilación. La constante de tiempo de decaimiento es $1/|\sigma|$. En otras palabras, la amplitud decae a 1/e o un 37% de la amplitud inicial en $1/|\sigma|$ segundos o en $1/(2\pi\zeta)$ ciclos de oscilación [1].

La expresión indicada en el Art. 5-44 de la NT SyCS vigente permite calcular el amortiguamiento de las oscilaciones electromecánicas a través de la medición de los máximos de onda de potencia activa de la línea correspondiente (contemplando una oscilación regular) y se basa en el principio descrito en el párrafo anterior. En [4] en el punto 3.3.2 se describe como se obtiene la expresión del Art. 5-44 matemáticamente.

Los vectores propios derechos entregan el *mode-shape*, es decir, la actividad relativa de las variables de estado cuando un modo en particular es excitado [1]. Los vectores derechos, para todos los modos en su conjunto, se denomina matriz de observabilidad. Los componentes de esta matriz, o factores de observabilidad, para las velocidades rotóricas se utilizan para determinar el tipo de

modo de oscilación, pues indica las unidades donde manifiesta cada modo y la forma en cómo oscilan [4], especialmente si se grafican mediante diagramas fasoriales.

El problema de solamente utilizar ya sea los vectores propios derechos (matriz observabilidad) o izquierdos (matriz controlabilidad), es que para apreciar la injerencia o participación de cada unidad en algún modo de oscilación depende de las escalas y las unidades de elementos en cada vector.

Por lo anterior, para cada uno de los modos de oscilación, los vectores (que contienen los factores de observabilidad y controlabilidad) se combinan en una matriz de participación que, por lo tanto, contiene los factores de participación. Estos factores proporcionan una buena indicación del patrón dinámico de oscilación del sistema y se pueden usar para determinar la ubicación de componentes de control para influir en el amortiguamiento del sistema de manera eficiente [5]. Además, los factores de participación de velocidad indican la sensibilidad del modo a la adición de amortiguamiento mecánico en el eje del generador [4].

5.3 Principio de Estabilización de PSS y Consideraciones Generales

Conforme a lo establecido en la NT SyCS y, como fue señalado anteriormente, toda unidad generadora de potencia nominal igual o superior a 50 [MW] que se conecte al SEN deberá contar con un Estabilizador del Sistema eléctrico de potencia (PSS) incorporado al lazo de control de la excitación, con el objeto de realizar un aporte eficaz al amortiguamiento de las oscilaciones electromecánicas del subsistema inercial del grupo generador.

El PSS debe ser capaz de realizar aportes positivos al amortiguamiento de las oscilaciones electromecánicas dentro de una banda de frecuencias comprendidas entre 0,2 [Hz] y 2,5 [Hz], a efecto de amortiguar modos de oscilación: locales, intraplanta e interplantas, y también contribuir con el amortiguamiento de modos electromecánicos más lentos como los de carácter de interárea.

El esquema de estabilización del PSS se basará en los principios de la estabilización por integral de potencia acelerante, con dos canales de entrada [2] y [6]:

- (1) velocidad de deslizamiento rotórica o frecuencia eléctrica y
- (2) potencia activa generada por el grupo.

En conformidad con lo establecido en [2] y [6], estos PSS de modelos tipo PSS2A y PSS2B son los que presentan un mejor desempeño, respecto de los PSS en base solamente a medida directa de la desviación de la velocidad del rotor, frecuencia o potencia.

5.3.1 PSS Basados en Velocidad

En caso de PSS con principio de estabilización en base a velocidad, si bien son eficaces, es difícil mantener una señal sin ruido de alta frecuencia por los modos torsionales y la dinámica de los ejes

de las turbinas. Lo anterior se traduce, ante perturbaciones, en una señal de salida del PSS que varía permanentemente y, por ende, el voltaje en bornes de generador [2]. Esta situación tiende a preocupar a los operadores haciendo que la importancia del PSS sea desestimada. Además, si bien es eficaz en caso de turbinas a vapor, la necesidad de filtros ante modos torsionales en el caso de turbinas hidráulicas introduce un atraso de fase en baja frecuencia, lo cual le resta eficacia [6].

5.3.2 PSS Basados en Frecuencia

En el caso de PSS con principio de estabilización en base a frecuencia, la cual se obtiene directamente de los terminales, presentan la ventaja de contar con una señal que es más sensible a los modos de baja frecuencia inter-área, que para modos interplanta o intraplanta que son de frecuencias mayores. En este sentido, es posible obtener una contribución mayor al amortiguamiento de modos interárea que en el caso PSS de principio de estabilización basado en la medida directa de la desviación de la velocidad del rotor. Sin embargo, en el caso de turbinas de vapor, esta señal incorpora la presencia de modos torsionales, lo que termina trayendo los mismos problemas que en el caso anterior. Además, la señal de frecuencia contiene ruido del sistema de potencia asociados a cargas industriales como hornos de arco y laminadoras.

5.3.3 PSS Basados en Potencia

El caso de PSS basados en principio de estabilización por potencia, fueron los candidatos naturales en los primeros PSS, dado que se puede obtener la medida de la potencia eléctrica fácilmente y se tiene una relación con la velocidad del eje.

$$\frac{d}{dt} \Delta\omega = \frac{1}{2H} P_a = \frac{1}{2H} (P_m - P_e)$$

En caso de despreciar la componente mecánica se cuenta con una señal proporcional y en adelanto a la desviación de la velocidad del rotor. Con filtros de baja y alta frecuencia, se puede aplicar amortiguamiento en una sola frecuencia. Esta situación representa problemas dado que generalmente se desea que se aplique amortiguamiento a un conjunto de frecuencias, particularmente en caso de modos interárea y locales. Adicionalmente, debido a que ante cualquier variación de la carga se produce una salida del PSS, se cuenta con rangos bastantes restringidos de las ganancias, lo que le resta eficacia.

5.3.4 PSS Basados en Integral de Potencia Acelerante.

EL PSS basado en principio de integral de potencia acelerante, incorpora una aproximación de la ecuación dinámica de la maquina sincrónica para obtener la relación entre la desviación de la velocidad del rotor y la integral de potencia acelerante.

$$\Delta\omega = \frac{1}{2H} \left[\int \Delta P_m dt - \int \Delta P_e dt \right]$$

$$\int \Delta P_m dt = 2H\Delta\omega + \int \Delta P_e dt$$

Con la expresión anterior, el PSS basado en integral de potencia acelerante obtiene una señal proporcional a la integral de variación de la potencia mecánica, incorporando señales proporcionales a variación de velocidad del rotor y la integral de la variación de la potencia eléctrica. En unidades de eje horizontal esta señal contiene modos torsionales que deben filtrarse. Debido a que las variaciones de potencia mecánica son relativamente lentas, la señal de la integral de potencia mecánica puede condicionarse mediante un filtro pasa bajos para atenuar modos torsionales. Se sabe que, si bien estos modos torsionales también son de carácter subsíncronos, tienen frecuencias mayores a los modos electromecánicos. De esta forma, la función de transferencia de la señal de la integral de potencia acelerante obtenido mediante la velocidad del rotor y la potencia eléctrica corresponde a:

$$\int \Delta P_a dt \rightarrow G(s) \left[\frac{\Delta P_e(s)}{2Hs} + \Delta\omega(s) \right] - \frac{\Delta P_e(s)}{2Hs}$$

Donde $G(s)$ corresponde a la función de transferencias del filtro pasa bajos. A partir de la función de transferencia, se observa que no es requerido un filtro para modos torsionales en los bloques principales de estabilización asociados a la variación de la potencia eléctrica. Para bajas frecuencia predomina la señal medida de velocidad y para mayores frecuencias predomina la expresión asociada a potencia eléctrica. Con lo anterior, la salida del PSS y, por ende, el voltaje del regulador de tensión, no se encuentra sujeto a variaciones indeseadas y además permite mayores ganancias K_{pss} lo que finalmente resulta en un mejor amortiguamiento de las oscilaciones.

El diagrama de bloques de típico de un PSS basado en integral de potencia acelerante se aprecia en la Figura 2.

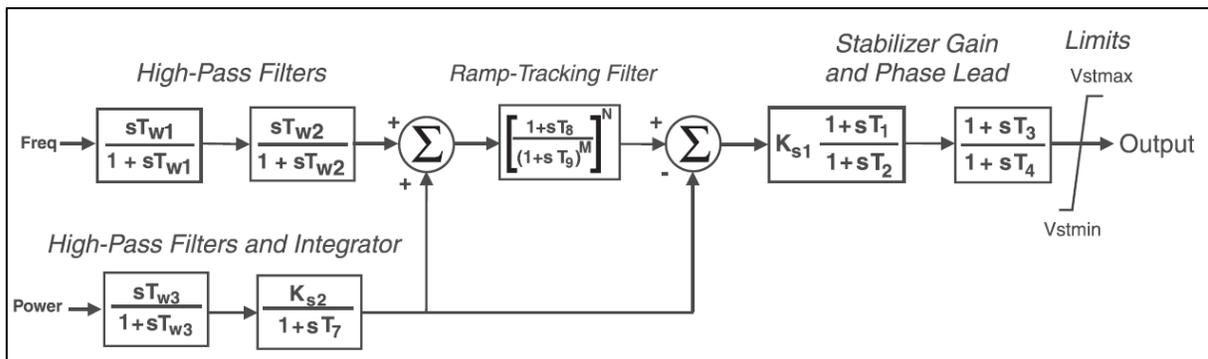


Figura 2: Diagrama de Bloques de un PSS basado en principio de la estabilización por integral de potencia acelerante, con dos canales de entrada.

5.3.5 Otras Consideraciones

Adicionalmente se recomiendan las siguientes consideraciones:

- La señal de proceso (potencia acelerante o integral de potencia acelerante) podrá ser obtenida a partir de la medición local de la velocidad de deslizamiento del rotor y la potencia activa generada.
- El Estabilizador (PSS) deberá operar modulando la referencia del regulador de tensión (AVR) y poseer suficiente flexibilidad para el ajuste de sus parámetros (constantes de tiempo y ganancias). De lo contrario, será difícil que el PSS tenga un desempeño según lo requerido para rangos de frecuencia presentes, tanto para modos interárea como locales.
- La señal de salida del PSS se inyectará en el punto de suma (referencia de tensión) del regulador individual de tensión -AVR-.
- Los transductores de las señales de deslizamiento rotórico y potencia eléctrica deberán garantizar una adecuada linealidad de las señales en el rango de operación y presentar constantes de tiempo inferiores a 40 mseg. De lo contrario existen riesgos de una acción ineficaz del PSS.
- El Estabilizador deberá contar con lógicas de control que minimicen su efecto adverso sobre la cupla sincronizante del generador ante grandes excursiones de la frecuencia en el SEN. Estas lógicas de control deberán ser incluidas en el diagrama de bloques y modelo dinámico del PSS. Hay evidencia que, ante grandes perturbaciones, la acción del PSS modula la tensión del AVR lo que se traduce en un detrimento del torque sincronizante [7].

6 METODOLOGÍA

6.1 Análisis Modal

Tal como se señala en el punto anterior, la herramienta para realizar el análisis de pequeña señal corresponde al análisis modal determinando los valores y vectores propios.

En primera instancia se realiza un análisis modal sin controladores (Red N) deshabilitando los modelos compuestos en la viñeta de simulación de las opciones avanzadas del flujo de potencia del DigSILENT Powerfactory. Esta opción deshabilita los controles de todos los elementos de la red y se utiliza para obtener los modos naturales del sistema, lo que permite tener una referencia del efecto de los controles en la estabilidad de pequeña señal. En [1] se señala que el origen de la inestabilidad de pequeña señal por amortiguamiento negativo surge a partir de los elementos de control y que no se debieran presentar modos inestables en este caso.

Posteriormente se realiza el análisis modal con los controladores habilitados, pero con los PSS existentes fuera de servicio. Este análisis tiene como objetivo apreciar el efecto de los gobernadores y reguladores automáticos de tensión (entre otros controladores) en el amortiguamiento y estabilidad del sistema. En este caso es posible que aparezcan modos inestables de acuerdo con lo establecido en [1].

Para el caso de los todos los controladores existentes, incluidos los PSS, se realizan análisis modales para en red N y red N-1.

- En el caso de red N, el análisis modal se realiza para ver el comportamiento del sistema con los recursos que se encuentran disponibles y habilitados en el sistema. De acuerdo con lo establecido en el Art. 5-38 NT SyCS, para red N se considera que debe cumplirse para los modos electromecánicos un coeficiente amortiguamiento de un 10%. De presentarse modos electromecánicos inestables en el caso con PSS deshabilitados debieran ser trasladados al semiplano izquierdo en el caso con PSS en servicio.
- En el caso de red N-1, se analiza la estabilidad de pequeña señal ante simples contingencias y, según lo que se establece en el Art. 5-38 NT SyCS, se interpreta que debe cumplirse para los modos electromecánicos un coeficiente de amortiguamiento de un 5%.

Respecto a los resultados, en el caso de red N, los modos electromecánicos con un coeficiente de amortiguamiento inferior a 10% se les denominará modos críticos, mientras que el caso red N-1 serán denominados modos críticos aquellos con un coeficiente de amortiguamiento inferior a 5%. Sin perjuicio de lo anterior, además serán distinguidos modos críticos relevantes de acuerdo al impacto en la seguridad operativa del SEN, considerando la cantidad y capacidad de las unidades donde se manifiestan dichos modos.

6.2 Caracterización de Modos Críticos

Una vez efectuados los análisis descritos anteriormente, los modos críticos serán caracterizados mediante los factores de observabilidad (diagramas fasoriales) y participación (diagramas de barras) para las velocidades de rotor (variable de estado *speed* en DigSILENT Powerfactory). Los factores de observabilidad generalmente son valores pequeños y se ajusta la escala para filtrar los montos más significativos, de manera de determinar el tipo de modo oscilatorio, ya sea intraplanta, interplanta o inteárea. En el caso de los factores de participación estos serán filtrados en alrededor 0.1 [pu] pues con participaciones menores se consideran que no son significativas [4].

6.3 Verificación Dinámica

Adicionalmente, serán efectuadas simulaciones dinámicas para los tramos más relevantes del sistema de 500 kV, de manera de verificar el cumplimiento del amortiguamiento requerido para las transferencias postcontingencia, según el Art. 5-39 de la NT SyCS. Se considera que, si bien no se logra un pleno cumplimiento de los coeficientes de amortiguamiento para los modos críticos en red N, los resultados de las simulaciones satisfactorios indicarán que no existe riesgo para la estabilidad del SEN. Esto siempre cuando no sean detectados modos inestables para el caso con todos los controladores habilitados (incluidos PSS).

6.4 Definición de Recomendaciones

Cabe recordar que, tal como se recomienda en [4] y [2], el esquema de estabilización del PSS se basará en los principios de la estabilización por potencia acelerante, con dos canales de entrada:

- (1) velocidad de deslizamiento rotórica o frecuencia eléctrica y
- (2) potencia activa generada por el grupo.

No obstante, si las unidades ya cuentan con PSS y cumplen con lo establecido en la NT SyCS es necesario tener ciertas consideraciones.

Adaptando lo considerado en [4], la elección de las unidades a ajustar y el procedimiento asociado se diferencia en función de:

- La validez o representatividad de sus modelos, tal como se especifica a continuación,
- La participación apreciable, ya sea para modos interárea, locales interplanta y/o locales intraplanta
- La potencia nominal de la unidad
- El grado de participación, ya sea significativamente Alta, Media o Baja

Lo que se busca es, en términos prácticos, establecer criterios para determinar grados de prioridad y criticidad en los que se consideran como modos indeseables que indica el Art 3-14 de la NT SyCS.

Además, respecto a los factores de participación, se consideran como apreciables si alcanzan 0.1pu, donde, a su vez se distingue:

- Significativamente altos factores de participación: mayor a 0.66pu.
- Participación media: entre 0.66-0.33pu.
- Participación apreciable pero baja: bajo 0.33pu.

Esta clasificación contempla que, en cada modo, sobresalen los factores de participación en unas unidades respecto otras. Esto implica que, la aplicación de torque de amortiguamiento en el eje de las unidades con factores sobresalientes mejore considerablemente el amortiguamiento del modo en cuestión, respecto las unidades restantes.

6.4.1 Modos Interárea

En el caso de modos interárea se presentan los siguientes criterios para la definición de recomendaciones, considerando unidades con **una participación significativamente alta o media (sobre 0.33 pu)**:

1. Si la unidad o central tiene todos sus modelos homologados y tiene PSS:
 - a. Se recomienda instruir reajustar dicho PSS para obtener respuesta acorde a las exigencias normativas.
 - b. Si no es posible reajustar para cumplir con la NT SyCS, se recomienda la instrucción de incorporación de un PSS del tipo 2A (o 2B si fuera necesario), ajustado para obtener una respuesta de acorde a las exigencias normativas.
2. Si la unidad o central tiene todos sus modelos homologados y no tiene PSS, se recomienda la instrucción de la incorporación de un PSS del tipo 2A, 2B o superior (según resulte necesario), ajustado para obtener una respuesta acorde a las exigencias normativas.
3. Si la unidad o central involucrada no tiene modelos homologados, se recomendará la realización de ensayos y la homologación en base a registros de dichos ensayos, de acuerdo con lo indicado en el Procedimiento Interno de "Modelación y Homologación de Instalaciones del SEN"⁴. Debe demostrarse que no se producen oscilaciones indeseadas ni un detrimento en el amortiguamiento de oscilaciones electromecánicas, que en Red N no debe ser bajo 10% y Red N-1 no debe ser bajo 5%. De lo contrario debe seguir lo indicado en el numeral 1 o 2 anteriores, según corresponda.

⁴ <https://www.coordinador.cl/wp-content/uploads/2022/08/Procedimiento-Modelacion-y-Homologacion-de-Instalaciones-del-SEN-Version-Definitiva.pdf>

Más allá de lo indicado anteriormente, de forma general y siempre que su estructura lo permita, cada PSS deberá amortiguar modos de oscilación de alta frecuencia y modos lentos de oscilación interárea en conformidad al art 8-20 de la NT SyCS, priorizando siempre la frecuencia de oscilación que haya sido identificada dentro del análisis sistémico.

6.4.2 Modos Locales Interplanta

En el caso de modos locales interplanta se presentan los siguientes criterios para la definición de recomendaciones, considerando unidades con **una participación significativamente alta o media (sobre 0.33 pu), que tengan una potencia nominal igual o superior a 50MW o grupos de unidades de una planta que totalice 75MW**⁵:

1. Si la unidad dispone de todos sus modelos homologados y además cuenta con PSS:
 - a. Se recomienda instruir al coordinado a reajustar el PSS para obtener una respuesta conforme a las exigencias normativas.
 - b. Si no es posible reajustar el PSS para cumplir con la normativa vigente, se recomienda instruir al coordinado la incorporación de un PSS del tipo 2A, 2B o superior según resulte necesario, ajustado para que se obtenga una respuesta que cumpla con las exigencias normativas.
2. Si la unidad dispone de todos sus modelos homologados y no cuenta con PSS:
 - a. Se recomienda instruir la incorporación de un PSS del tipo 2A, 2B o superior según resulte necesario, ajustado para que se obtenga una respuesta que cumpla con las exigencias normativas.

Sin perjuicio de lo anterior, si la unidad **no dispone de modelos homologados y tiene participación sobre 0.33 pu, independiente de su potencia nominal**, se recomienda la realización de ensayos en campo y homologación de esta. Debe demostrarse que no se producen oscilaciones indeseadas ni un detrimento en el amortiguamiento de oscilaciones electromecánicas, que en Red N no debe ser bajo 10% y Red N-1 no debe ser bajo 5%. De lo contrario, debe seguir lo indicado en el numeral 1 o 2 anteriores, según corresponda. Los modos naturales (sin controladores) tienden a empeorar su amortiguamiento, o incluso volverse inestables, con la inclusión de controladores de carga/velocidad y AVR [1] [3].

⁵ NERC considera la incorporación de PSS en unidades con potencia de 35 MVA o mayor o grupos de unidades en una planta que totalicen una potencia de 75 MVA o mayor [2]. Se considera adecuado contemplar este último criterio adicional en caso de modos interplanta dado el impacto que puede tener en la seguridad de la operación del SEN.

6.4.3 Modos Locales Intraplanta

En el caso de modos locales intraplanta **con amortiguamiento ζ bajo 5%**⁶ se presentan los siguientes criterios para la definición de recomendaciones, solo considerando unidades con **participación significativamente alta (sobre 0.66 pu) y que tengan una potencia nominal igual o superior a 50[MW].:**

1. Si la unidad dispone de todos sus modelos homologados y además cuenta con PSS:
 - a. Se recomienda instruir al coordinado a reajustar el PSS para obtener una respuesta conforme a las exigencias normativas.
 - b. Si no es posible reajustar el PSS para cumplir con la normativa vigente, se recomienda instruir al coordinado la incorporación de un PSS del tipo 2A, 2B o superior según resulte necesario, ajustado para que se obtenga una respuesta que cumpla con las exigencias normativas.
2. Si la unidad dispone de todos sus modelos homologados y no cuenta con PSS:
 - a. Se recomienda instruir la incorporación de un PSS del tipo 2A, 2B o superior según resulte necesario, ajustado para que se obtenga una respuesta que cumpla con las exigencias normativas.

Sin perjuicio de lo anterior, si la unidad **no dispone de modelos homologados y tiene participación sobre 0.66 pu, independiente de su potencia nominal**, se recomienda la realización de ensayos en campo y homologación de esta. Debe demostrarse que no se producen oscilaciones indeseadas ni un detrimento en el amortiguamiento de oscilaciones electromecánicas, que en Red N no debe ser bajo 10% y Red N-1 no debe ser bajo 5%. De lo contrario, debe seguir lo indicado en el numeral 1 o 2 anteriores, según corresponda. Los modos naturales (sin controladores) tienden a empeorar su amortiguamiento, o incluso volverse inestables, con la inclusión de controladores de carga/velocidad y AVR [1] y [3].

⁶ Dado que son modos locales, el ζ de 5% daría cumplimiento a los Art. 5-38 y 5-39 y, respecto el límite es estabilidad permanente establecido en el Art. 5-44, se evaluará finalmente el riesgo a la seguridad mediante las verificaciones dinámicas. No obstante, oscilaciones locales de unidades bajo 50 MW con amortiguamiento sobre 5% no deberían traer consigo riesgos para la operación del SEN en su conjunto.

7 DEFINICIÓN DE ESCENARIOS

De acuerdo con lo señalado brevemente en los alcances, se buscan los escenarios que contemplen las condiciones previstas más críticas desde el punto de vista de las oscilaciones electromecánicas. En concordancia con lo anterior se proponen escenarios de Demanda Alta y Baja con altas transferencias por los principales tramos del sistema de transmisión de 500 kV del Norte del SEN.

Se elaboraron escenarios para algunas de las condiciones estacionales más características del SEN, esto es:

- Marzo 2024
- Abril 2024
- Diciembre 2024

Estos escenarios contemplan una hidrología media, en concordancia a lo contemplado en la mayoría de los estudios NT del Capítulo 6 realizados por el Coordinador.

7.1 Escenarios Red N Demanda Alta y Baja

En la Tabla 6 se presenta un cuadro resumen de escenarios de demanda alta y baja para el despacho de las principales unidades por zona y principales transferencias por los tramos más relevantes del sistema troncal.

Tabla 6: Niveles de Demanda y Despachos Principales Unidades del SEN. Escenarios Demanda Alta y Baja.

Escenario	Demanda [MW]	Inercia [GVAs]	ERV	Generación (principales unidades) [MW]					
				Norte Grande	Norte	Ventanas-San Luis	Centro 500kV-220kV-154kV	Charrúa-Concepción	Sur
E1.- DA día Mar2024	12118	33,72	Solar 7323 Eólico 1400	ANG 2x110 CCH 2x88.4 NTO 1x55 IEM 290	Guacolda 1x38	Campiche 84 Nva Ventanas 82 Nehuenco U2 328	Alfalfal 2x65.5 Alfalfal 2 1x59 Chacayes 2x30 La Higuera 1x51 La Confluencia 1x45 Curillínque 25	El Toro 4x10 Antuco 1x80 Pangue 1x80 Ralco 1x108 Rucue 1x20 Sta María 178	Angostura 1x38 Canutillar 2x77 Rucatayo 12 Valdivia 16
E2.- DA noche Dic2024	11309	52.96	Solar 1.2 Eólico 1418	ANG U1 276 ANG U2 281 CSP C. DOM 100 CCH U1 247 CCH U2 253 IEM 358	Guacolda 3x153	Nva Ventanas 232	Alfalfal 2x89 Alfalfal 2 1x63 Chacayes 2x56 La Higuera 2x77 La Confluencia 2x79 Curillínque 60	El Toro 4x84 Antuco U1 80 Antuco U2 150 Pangue 1 145 Pangue 2 225 Ralco 1 350 Ralco 2 360 Rucue 2x87 Sta María 370	Angostura 1 119 Angostura 2 102 Angostura 3 24 Canutillar 2x75 Rucatayo 45 Valdivia 8
E3.- DB día Abr2024	7072	35,09	Solar 694 Eólico 1963	ANG U1 243 ANG U2 102 CSP C. DOM 109 CCH U1 178 CCH U2 157 IEM 106	Guacolda 2x38	Nehuenco II – TG 110 Nehuenco II – TV 85 San Isidro TG 259 San Isidro TV 138	Alfalfal 1x60 Alfalfal 2 2x88 Chacayes 1x32 La Higuera 1x27 La Confluencia 1x25 Curillínque 57 San Ignacio 36 Isla 2x23 Colbún 2x125 Machicura 2x40 Las Lajas 2x68 N.Renca TG 199 N.Renca TV 99	El Toro 3x74+1x20 Antuco 1x132 Pangue 1x80 Rucue 1x75 Sta María 178 Santa Fe 67 TER MAPA 1x137	Angostura 1x38 Canutillar 2x66 Rucatayo 10 Valdivia 21

Escenario	Demanda [MW]	Inercia [GVAs]	ERV	Generación (principales unidades) [MW]					
				Norte Grande	Norte	Ventanas-San Luis	Centro 500kV-220kV-154kV	Charrúa-Concepción	Sur
E4.- DB noche Dic2024	8726	41,71	Eólico 1295	Tocopilla U16 1x325 ANG U1 281 ANG U2 276 CCH U1 274 CCH U2 267 CTM3 - TG 156 IEM 110 CTM3 – TV 82	Guacolda 3x143		Pehuenche 2x270 Colbún U2 169 Colbún U1 148 La Lajas 2x97 Alfalfal 2x83 La Confluencia 2x79 La Higuera 2x77 Alfalfal II U1 62 Curillinque U1 60 Chacayes 2x55 Rapel U4 55 Machicura U1 36 Isla 2x24 Sauzal 3x23 Palmucho 23 Cipreses U3 23 El paso 2x20	Ralco U1 322 Ralco U2 325 Pangue U2 224 Pangue U1 133 Antuco U1 126 TER MAPA 2x83 TER Santa Fe U1 56 Rucue 2x38 El Toro 4x31 Quilleco 2x16	Angostura 2x119 Canutillar 2x60 Rucatayo 25 Carilafquén 2x18

Tabla 7: Transferencias en los principales tramos del SEN. Escenarios Demanda Alta y Baja.

Escenario	Transferencias (principales tramos) [MW]				
	Kimal-Changos 500kV	Parinas-Changos 500kV	Nva.P.Azú -Polpaico 500 kV	Ancoa-A.Jahuel 500kV	Nva.Cha-Ancoa 500kV
E1.- DA díaMar2024	→256	←635	→1978	→30	→67
E2.- DA nocheDic2024	←286	→277	←134	→2650	→1284
E3.- DB día Abr2024	←393	→755	←341	→742	→512
E4.- DB noche Dic2024	←528	→351	←847	→2522	←1842

7.2 Escenarios Red N-1

Una vez elaborados los escenarios Red N, para definir los escenarios Red N-1 se determinaron las contingencias más exigentes de acuerdo con los despachos y niveles de transferencias. Los alcances de este estudio corresponden a análisis de la estabilidad de pequeña señal del SEN respecto los modos oscilatorios electromecánicos interárea entre unidades del Norte Grande y el resto del SEN. Por lo tanto, se enfatiza en ver las condiciones red N-1 para los tramos más extensos del sistema de transmisión de 500 kV de la Zona Norte del SEN. No obstante, también se evalúa uno de los tramos del sistema de 500 kV de la Zona Centro Sur.

- E1.1.- Changos - Parinas 500kV L1 F/S
- E1.2.- Nueva Pan de Azúcar – Polpaico 500kV L1 F/S
- E1.3.- Charrúa – Ancoa 500kV L3 F/S
- E2.1.- Changos - Parinas 500kV L1 F/S
- E2.2.- Nueva Pan de Azúcar – Polpaico 500kV L1 F/S
- E2.3.- Charrúa – Ancoa 500kV L3 F/S
- E3.1.- Changos - Parinas 500kV L1 F/S
- E3.2.- Nueva Pan de Azúcar – Polpaico 500kV L1 F/S
- E3.3.- Charrúa – Ancoa 500kV L3 F/S
- E4.1.- Changos - Parinas 500kV L1 F/S
- E4.2.- Nueva Pan de Azúcar – Polpaico 500kV L1 F/S
- E4.3.- Charrúa – Ancoa 500kV L3 F/S

8 RESULTADOS ANÁLISIS MODAL

Para los escenarios base de red N descritos anteriormente, se ejecutaron en el software de simulación DIGSILENT Powerfactory las rutinas de análisis modal para el SEN sin considerar los modelos de los controladores, de manera de identificar los modos naturales de oscilación del SEN.

Luego de identificar los modos naturales de oscilación para los escenarios base para Red N, se habilitaron los modelos homologados vigentes en la base de datos utilizada, esto sin aun habilitar los PSS disponibles y que se encuentren actualizados y homologados de acuerdo con el plan de sintonización. Esto se efectuó con el propósito de analizar el efecto de la incorporación de los PSS actualizados en la operación del sistema.

Finalmente, se ejecutaron las rutinas para análisis modal en los escenarios base de red N habilitando los modelos de PSS homologados actualizados. Posteriormente fue realizado análisis modal tomando en cuenta las diferentes contingencias consideradas dentro del estudio y que definen los escenarios de Red N-1.

8.1 Escenarios Demanda Alta

En primera instancia se presentan los resultados para el análisis de los modos para los escenarios de demanda alta.

8.1.1 E1 DA Día Marzo 2024

Para el escenario de demanda alta previsto para marzo de 2024, se tienen los siguientes resultados para el análisis modal.

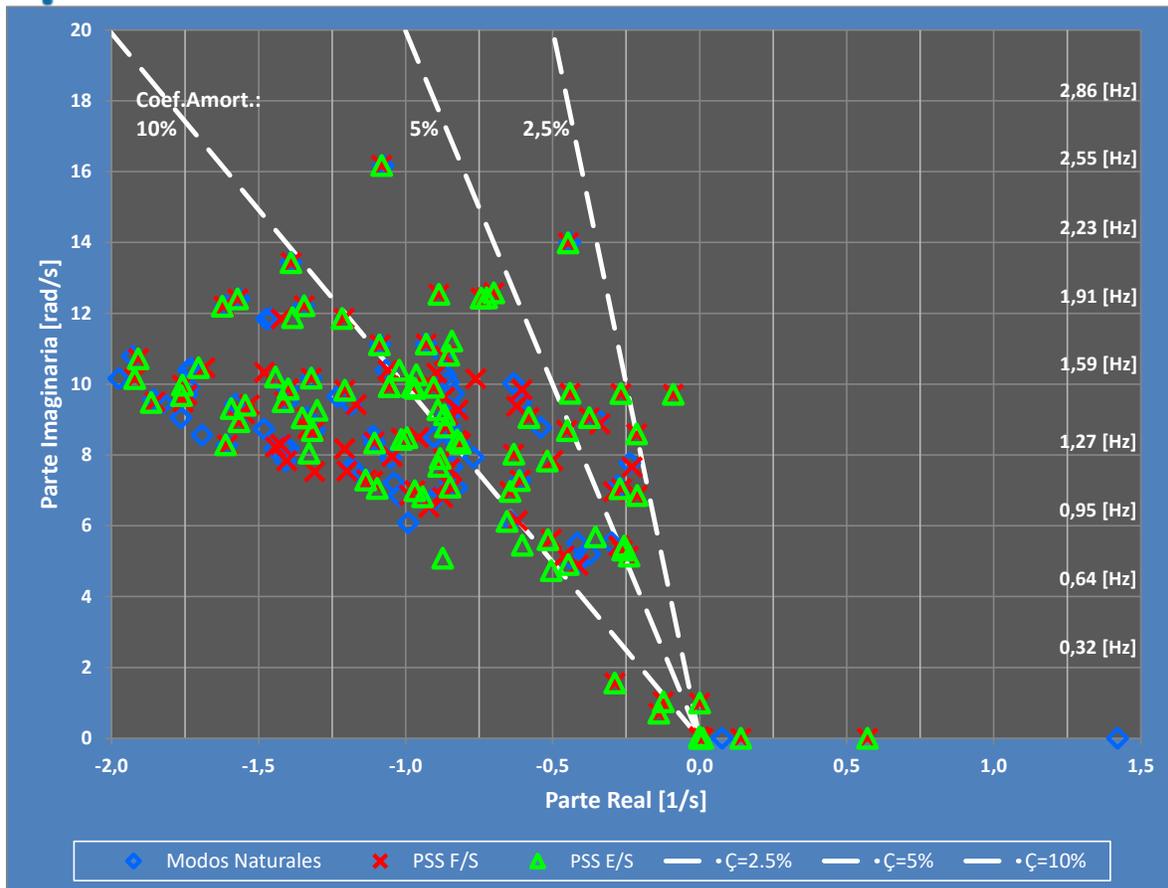


Figura 3: Modos de Oscilación Electromecánicos para escenario E1 DA día Mar 2024 Red N.

En la Figura 3 se aprecian los valores propios para el escenario de demanda alta para marzo 2024, donde se identifican los modos naturales (\diamond), los modos con controladores habilitados y PSS fuera de servicio (\times), finalmente, los modos con PSS E/S (Δ).

Para el caso sin controladores (modos naturales), PSS F/S y PSS E/S se aprecian modos inestables no oscilatorios. Se aprecian modos naturales no oscilatorios inestables para PE Sierra Gorda, que corresponde a un PE modelo DFIG (doblemente alimentado). Se aprecian modos inestables no oscilatorios en los casos PSS F/S y E/S para las plantas ERV PFV Machicura y PFV Cerro Dominador. Además, se puede encontrar un modo oscilatorio no amortiguado asociado a PE Los Olmos.

Considerando los PSS E/S, se visualizan que la mayoría de los modos tienen un amortiguamiento mayor al 10%, cumpliendo con lo establecido en la NT.

Para el caso de Red N la mayoría de los modos críticos se encuentran más bien por sobre los 0.95 [Hz] lo que implicaría que corresponden más bien a modos locales.

Los modos con amortiguamiento menor a 2.5% están asociados a plantas ERV y corresponden a modos de carácter local. Estas plantas no corresponden a unidades generadoras sincrónicas por lo

que no pueden contar con PSS en la manera exigida para unidades sincrónicas. A excepción de un modo asociado a Central Chacayes que no es de carácter electromecánico.

Se observan modos con amortiguamiento bajo 5%, de los cuales la mayoría se encuentran asociados a PE como Monto Redondo y Totoral. También se aprecian modos electromecánicos asociados a unidades bajo 50 [MW] como Los Molles, Santa Marta, Carilafquén y Triful Triful.

En relación con los modos críticos observados con amortiguamiento sobre 5%, cerca de un tercio de estos corresponden a modos asociados a PE como Punta Sierra Talinay y El Arrayán. Se aprecian modos de carácter electromecánicos principalmente locales de unidades de capacidad menor a 50 [MW] como Rio Picoiquén, Renaico, Convento Viejo, Pilmaiquén, Los Quilos, Lautaro U2, Palmar, Malalcahuello, Puntilla, Correntoso, Energía Pacifico. No obstante, también se aprecian modos locales de unidades de mayor capacidad como San Ignacio, Chacayes, Canutillar, Nueva Aldea y Nehuenco II. Se aprecia un modo de carácter Interplanta en la zona de Araucanía donde participan unidades que inyectan tanto en 220kV como en la red de 66 kV.

En conclusión,

- Se observa un modo interárea entre las unidades de la zona Centro y unidades de Centro Sur y Sur del sistema.
- También se observa un modo interplanta que se manifiesta (factores observabilidad) en varias unidades de la zona de Araucanía.
- Existe una cantidad relevante de modos que no necesariamente son de carácter electromecánico y donde tienen una participación significativa planta ERV de carácter eólico.
- Los restantes modos electromecánicos son principalmente de carácter local y asociados a unidades de capacidad menor a 50[MW], salvo contadas excepciones

El detalle de los modos electromecánicos críticos se muestra en la Tabla 8. La categorización de estos modos se realiza en base a los factores de observabilidad y los diagramas fasoriales para los modos de carácter local se detallan como parte los anexos de este informe.

Tabla 8: Modos de oscilación electromecánicos críticos escenario E1 DA día Mar 2024 PSS E/S.

Modo	P. Real [1/s]	P. Imag [rad/s]	Mag. [1/s]	Ang. [°]	Frec. [Hz]	Periodo [s]	Xi %	CTA [s]	A1/A2	Descripción
1205	-0,09	9,713	9,713	90,531	1,546	0,647	0,93	11,118	1,06	PE SIERRA GORDA (DFIG)
1003	-0,001	0,044	0,044	91,237	0,007	142,274	2,16	1049,0	1,145	Local Chacayes (No electromecánico)
1383	-0,214	8,595	8,597	91,429	1,368	0,731	2,49	4,665	1,17	PE Sarco
1434	-0,268	9,739	9,743	91,577	1,55	0,645	2,75	3,729	1,189	PE Monte Redondo
2162	-1,292	43,406	43,425	91,705	6,908	0,145	2,98	0,774	1,206	Local PMGD HP TRUFULT
1381	-0,213	6,855	6,858	91,779	1,091	0,917	3,11	4,696	1,216	PE Los Olmos
1539	-0,448	13,99	13,997	91,833	2,227	0,449	3,2	2,233	1,223	Local HP LOS MOLLES
1437	-0,272	7,052	7,057	92,206	1,122	0,891	3,85	3,681	1,274	TER SANTA MARTA
1497	-0,375	9,057	9,065	92,372	1,442	0,694	4,14	2,665	1,297	PE Tchamma
1532	-0,441	9,745	9,755	92,591	1,551	0,645	4,52	2,267	1,329	PE Totoral
1397	-0,24	5,147	5,153	92,672	0,819	1,221	4,66	4,163	1,341	PE Puelche
1424	-0,257	5,43	5,436	92,706	0,864	1,157	4,72	3,897	1,346	Local HP CARILAFQUEN
1429	-0,262	5,313	5,32	92,823	0,846	1,183	4,93	3,817	1,363	PE Alena

Modo	P. Real [1/s]	P. Imag [rad/s]	Mag. [1/s]	Ang. [°]	Frec. [Hz]	Periodo [s]	Xi %	CTA [s]	A1/A2	Descripción
1543	-0,451	8,688	8,7	92,971	1,383	0,723	5,18	2,218	1,386	Local HP SAN IGNACIO
1756	-0,701	12,578	12,598	93,188	2,002	0,5	5,56	1,428	1,419	PE Punta Colorada
1772	-0,725	12,44	12,461	93,335	1,98	0,505	5,82	1,38	1,442	PE Los Cururos
1776	-0,744	12,432	12,454	93,424	1,979	0,505	5,97	1,344	1,456	PE Talinay Oriente
1488	-0,354	5,688	5,699	93,565	0,905	1,105	6,22	2,822	1,479	Modo Interárea Centro Norte – Centro Sur - Sur
1695	-0,581	9,054	9,073	93,671	1,441	0,694	6,4	1,722	1,496	PE Lanos del Viento
2588	-3,696	56,704	56,824	93,729	9,025	0,111	6,5	0,271	1,506	PE Punta Sierra
2180	-1,335	20,479	20,523	93,731	3,259	0,307	6,51	0,749	1,506	Local Interplanta HP RIO PICOIQUEN RENAICO
1661	-0,519	7,832	7,85	93,791	1,247	0,802	6,61	1,927	1,516	Local Interplanta HP CHACAYES - Sauzal
2106	-1,082	16,18	16,216	93,825	2,575	0,388	6,67	0,925	1,522	Local HP CONVENTO VIEJO
1875	-0,887	12,536	12,567	94,048	1,995	0,501	7,06	1,127	1,56	PE El Arrayán
1822	-0,843	11,217	11,249	94,296	1,785	0,56	7,49	1,187	1,603	Local Intraplanta HE CANUTILLAR
1723	-0,632	8,028	8,053	94,503	1,278	0,783	7,85	1,582	1,64	PE Aurora
1844	-0,853	10,815	10,849	94,51	1,721	0,581	7,86	1,172	1,642	Local Intraplanta HP PILMAIQUEN
1895	-0,931	11,137	11,176	94,777	1,773	0,564	8,33	1,074	1,691	Local intraplanta HP PILMAIQUEN
1709	-0,613	7,283	7,309	94,809	1,159	0,863	8,38	1,632	1,697	Local interplanta HP MOCHO - TER LAUTARO
1537	-0,447	4,91	4,931	95,205	0,782	1,28	9,07	2,236	1,772	Local TER NUEVA ALDEA
1888	-0,905	9,912	9,954	95,217	1,578	0,634	9,09	1,105	1,775	PE Cabo Leones III
1657	-0,516	5,607	5,631	95,257	0,892	1,121	9,16	1,938	1,783	Local interplanta TER CELCO - VIÑALES
1727	-0,645	6,971	7,001	95,287	1,109	0,901	9,21	1,55	1,789	PE Calama
1909	-0,964	10,27	10,315	95,365	1,634	0,612	9,35	1,037	1,804	Local HP LOS QUILOS
1858	-0,868	9,133	9,174	95,429	1,454	0,688	9,46	1,152	1,817	Local TER LAUTARO U2
1882	-0,89	9,28	9,323	95,481	1,477	0,677	9,55	1,123	1,827	Local HP PALMAR U1
1802	-0,815	8,331	8,37	95,585	1,326	0,754	9,73	1,228	1,849	Local HP MALALCAHUELLO
1911	-0,968	9,883	9,93	95,595	1,573	0,636	9,75	1,033	1,851	Local interplanta área Sur
1810	-0,825	8,423	8,463	95,596	1,341	0,746	9,75	1,212	1,851	Modo interárea Centro Norte – Centro Sur
2108	-1,089	11,113	11,167	95,598	1,769	0,565	9,76	0,918	1,851	Local intraplanta HP PUNTILLA
2083	-1,022	10,399	10,449	95,612	1,655	0,604	9,78	0,979	1,854	Local HP CORRENTOSO
1853	-0,865	8,793	8,835	95,62	1,399	0,715	9,79	1,156	1,856	Local TER ENERGIA PACIFICO
1921	-0,978	9,922	9,97	95,63	1,579	0,633	9,81	1,022	1,858	PE Cabo Leones I Fase 2

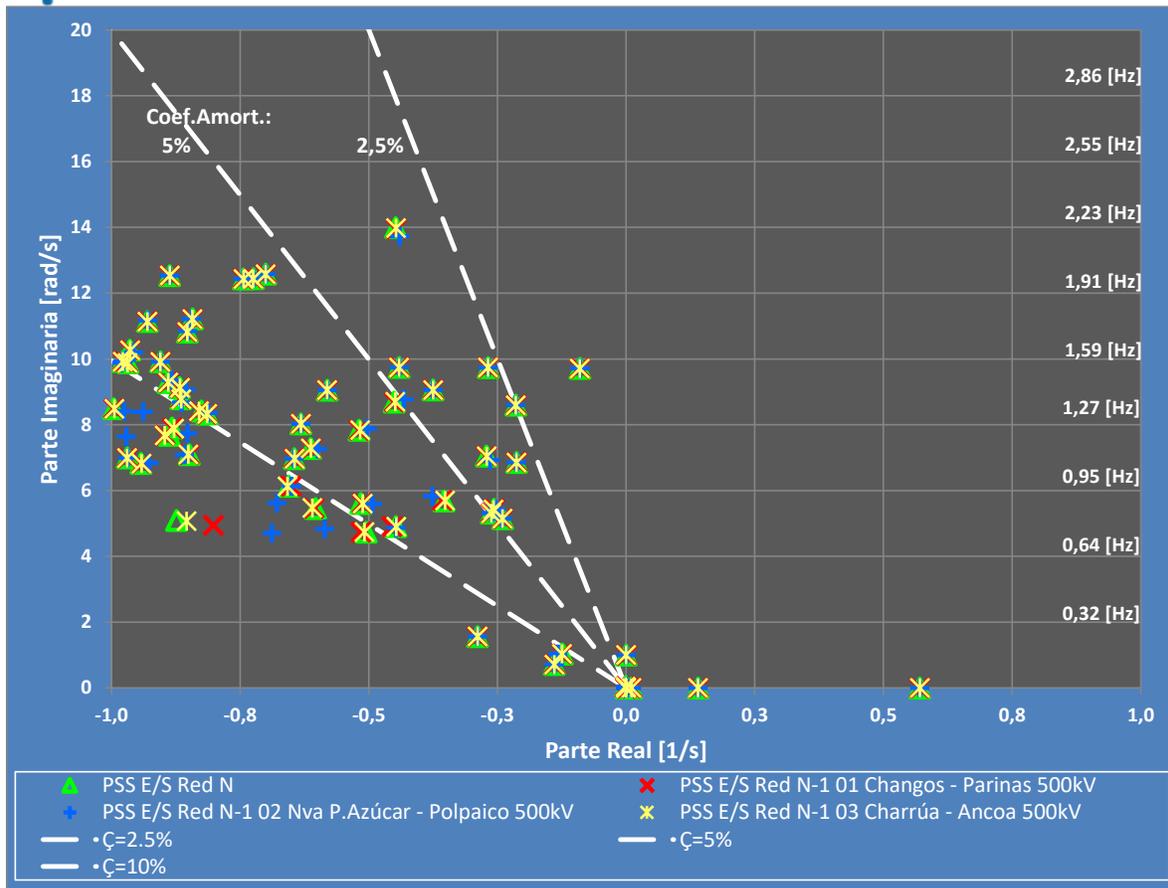


Figura 4: Modos de Oscilación Electromecánicos para escenario E1 DA día Mar 2024 Red N y Red N-1.

En la Figura 4 se pretende mostrar el efecto de la consideración de contingencias simples para los modos críticos en casos donde se encuentran los PSS E/S.

La mayoría de los modos críticos tienen una frecuencia inferior a 2.23 [Hz].

Dado que la gran mayoría de los modos se encuentran entre un 5% y un 10%, hay una mayor presencia de modos críticos en los casos de Red N que no alcanzan a ser críticos para los casos red N-1.

Los modos críticos con un amortiguamiento inferior a 5% no son sensibles a las contingencias consideradas.

El detalle de los modos críticos para los casos red N-1 es redundante considerando que son modos que en el caso red N se presentan con un amortiguamiento inferior a 5%. En todo caso, la categorización de estos modos se realiza en base a los factores de observabilidad y los diagramas fasoriales para los modos de carácter local se detallan como parte los anexos de este informe.

8.1.2 E2 DA Noche Diciembre 2024

Para el escenario de demanda alta previsto para Diciembre de 2024, se tienen los siguientes resultados para el análisis modal.

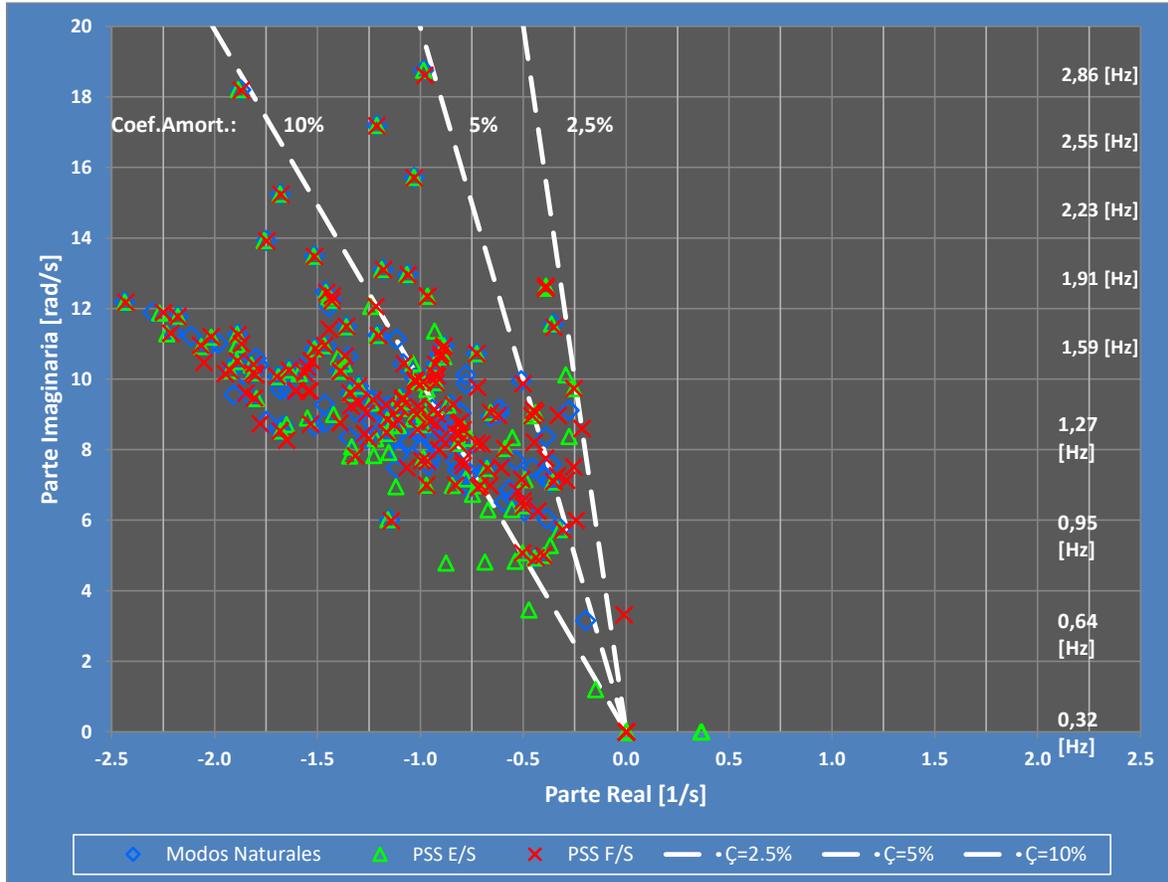


Figura 5: Modos de Oscilación Electromecánicos para escenario E2 DA noche Diciembre 2024 Red N.

En la Figura 5 se aprecian los valores propios para el escenario de demanda alta para Diciembre 2024 con transferencias desde la zona norte hacia el sur, donde se identifican los modos naturales (\diamond), los modos con controladores habilitados, pero PSS fuera de servicio (X) y, finalmente, los modos con PSS E/S (Δ).

Para tanto los modos naturales no se aprecian modos inestables, dicha situación es diferente para los casos considerando los controladores y PSS E/S, donde se aprecian un modo inestable de carácter local asociado a las unidades de Central Kelar. Esta situación no se ve corregida con la incorporación de PSS, debido que este no corresponde a un modo electromecánico. Por tanto, se requiere hacer análisis más detallados para descartar problemas de inestabilidad de pequeña señal que deriven en un riesgo para la operación del SEN.

Se visualizan que la gran mayoría de los modos tienen un amortiguamiento mayor al 10%, cumpliendo con lo establecido en la NT.

Los modos con amortiguamiento bajo a 5% corresponden modos locales asociados al Parque Eólico Monte Redondo, Los Molles y Parque Eólico Aurora con frecuencias de 1.553 [Hz], 2.124 [Hz] y 1.323 [Hz], respectivamente. Estos modos serán detallados en el punto siguiente de este informe.

Los modos con amortiguamiento en torno a entre 6.1% - 7,5% corresponden a modos locales asociados a las unidades del parque Eólico Sierra Gorda, Carilafquén – Malalcahuello, Nueva Aldea, Convento Viejo y Renaico - Picoquén. El resto de los modos críticos tienen un amortiguamiento sobre un 8% y en su totalidad corresponden a modos locales, donde se aprecia también la presencia de modos asociados a Parques Eólicos Cabo Leones, Talinay y Los Cururos. No se aprecian modos de carácter inter-área.

El detalle de los modos electromecánicos críticos se muestra en la Tabla 9. La categorización de estos modos se realiza en base a los factores de observabilidad y los diagramas fasoriales para los modos de carácter local se detallan como parte los anexos de este informe.

Tabla 9: Modos de oscilación electromecánicos críticos escenario E2 DA noche Diciembre 2024 PSS E/S

Modo	P. Real [1/s]	P. Imag [rad/s]	Mag. [1/s]	Ang. [°]	Frec. [Hz]	Periodo [s]	Xi	CTA [s]	A1/A2	Descripción
0019	-0.25	9.73	9.74	91.49	1.55	0.65	2.60	3.94	1.18	PE MONTE REDONDO,
0023	-0.29	10.12	10.13	91.67	1.61	0.62	2.91	3.40	1.20	Local intraplanta HE COLBUN U2,
0033	-0.39	12.64	12.65	91.77	2.01	0.50	3.09	2.56	1.21	PE EL ARRAYAN,
0035	-0.39	12.58	12.59	91.78	2.00	0.50	3.11	2.55	1.22	PE TALINAY ORIENTE,
0037	-0.39	12.58	12.59	91.78	2.00	0.50	3.11	2.55	1.22	PE LOS CURUROS,
0029	-0.36	11.56	11.57	91.80	1.84	0.54	3.14	2.75	1.22	Local intraplanta HP LOS MOLLES
0021	-0.28	8.37	8.38	91.90	1.33	0.75	3.32	3.60	1.23	PE SARCO,
0041	-0.44	9.05	9.06	92.79	1.44	0.69	4.87	2.27	1.36	PE TCHAMA,
0027	-0.36	7.09	7.10	92.88	1.13	0.89	5.03	2.80	1.37	HE MACHICURA U2,
0045	-0.46	8.96	8.97	92.95	1.43	0.70	5.15	2.17	1.38	HP SAN IGNACIO U1,
0117	-0.98	18.76	18.78	93.00	2.99	0.33	5.24	1.02	1.39	Local intraplanta HP LOS MOLLES
0025	-0.32	5.74	5.75	93.22	0.91	1.09	5.62	3.10	1.42	Local intraplanta HP CARILAFQUEN,
0135	-1.03	15.72	15.75	93.76	2.50	0.40	6.55	0.97	1.51	Local intraplanta HP CONVENTO VIEJO
0057	-0.55	8.34	8.36	93.80	1.33	0.75	6.62	1.81	1.52	Local interplanta HE CIPRESES CURILLINQUE
0073	-0.73	10.73	10.75	93.88	1.71	0.59	6.76	1.38	1.53	Local intraplanta TER CMPC PACIFICO
0049	-0.49	7.15	7.17	93.93	1.14	0.88	6.86	2.03	1.54	Local interplanta HE CIPRESES, HP CURILLINQUE, HP ISLA
0031	-0.37	5.28	5.29	94.00	0.84	1.19	6.97	2.71	1.55	Interárea Centro Norte – Centro Sur - Sur
0165	-1.21	17.19	17.23	94.03	2.74	0.37	7.04	0.82	1.56	Local intraplanta HP CONVENTO VIEJO
0063	-0.66	9.06	9.08	94.16	1.44	0.69	7.26	1.52	1.58	PE LIDV,
0061	-0.59	8.04	8.06	94.19	1.28	0.78	7.30	1.70	1.58	PE AURORA,
0107	-0.97	12.35	12.39	94.47	1.97	0.51	7.79	1.04	1.63	PE VDLV,
0051	-0.50	6.41	6.43	94.47	1.02	0.98	7.80	1.99	1.64	Local intraplanta HP ITATA U1,
0109	-0.97	12.35	12.39	94.48	1.97	0.51	7.80	1.03	1.64	PE VDLV,
0039	-0.40	5.00	5.02	94.59	0.80	1.26	7.99	2.49	1.66	PE PUELICHE SUR,
0091	-0.89	10.94	10.98	94.63	1.74	0.57	8.07	1.13	1.66	Local intraplanta HP PILMAIQUEN
0095	-0.89	10.88	10.92	94.69	1.73	0.58	8.17	1.12	1.67	Local intraplanta HP PILMAIQUEN
0101	-0.93	11.36	11.40	94.69	1.81	0.55	8.17	1.07	1.67	Local intraplanta HE CANUTILLAR
0141	-1.07	12.97	13.01	94.70	2.06	0.48	8.20	0.94	1.68	Local intraplanta TER SANTA MARTA,
0093	-0.89	10.63	10.67	94.77	1.69	0.59	8.31	1.13	1.69	Local intraplanta HP PILMAIQUEN
0097	-0.90	10.74	10.77	94.80	1.71	0.59	8.37	1.11	1.70	Local intraplanta HP LOS QUILOS
0059	-0.56	6.30	6.33	95.04	1.00	1.00	8.78	1.80	1.74	Local interplanta Área Sur
0103	-0.93	10.43	10.47	95.11	1.66	0.60	8.90	1.07	1.75	Local intraplanta HP LOS QUILOS
0043	-0.45	4.93	4.95	95.16	0.78	1.27	9.00	2.24	1.76	Local intraplanta TER NUEVA ALDEA,
0067	-0.68	7.47	7.50	95.18	1.19	0.84	9.02	1.48	1.77	Local intraplanta TER LAUTARO U1,

Modo	P. Real [1/s]	P. Imag [rad/s]	Mag. [1/s]	Ang. [°]	Frec. [Hz]	Periodo [s]	Xi	CTA [s]	A1/A2	Descripción
0163	-1.19	13.11	13.16	95.18	2.09	0.48	9.03	0.84	1.77	Local interplanta TER CMPC CORDILLERA, HP CARENA
0077	-0.76	8.32	8.36	95.22	1.32	0.75	9.09	1.32	1.77	Local intraplanta HP PILMAIQUEN U5,
0081	-0.79	8.64	8.68	95.25	1.38	0.73	9.15	1.26	1.78	Local intraplanta HP JUNCAL U1,
0099	-0.93	9.91	9.95	95.34	1.58	0.63	9.30	1.08	1.80	Local intraplanta HP MALALCAHUELLO,
0087	-0.87	9.26	9.30	95.35	1.47	0.68	9.33	1.15	1.80	Local intraplanta HP PALMAR,
0139	-1.04	10.45	10.50	95.67	1.66	0.60	9.88	0.96	1.87	Local intraplanta HP CORRENTOSO U1,
0053	-0.50	5.08	5.10	95.67	0.81	1.24	9.88	1.98	1.87	PE ALENA,
0121	-0.99	9.92	9.97	95.68	1.58	0.63	9.90	1.01	1.87	PE CABO LEONES,
0123	-0.99	9.92	9.97	95.68	1.58	0.63	9.90	1.01	1.87	PE CABO LEONES,
0111	-0.97	9.72	9.76	95.69	1.55	0.65	9.92	1.03	1.87	Local interplanta Área Sur
0083	-0.82	8.18	8.22	95.71	1.30	0.77	9.94	1.22	1.87	Local intraplanta HE ANCOA
0071	-0.71	6.98	7.02	95.80	1.11	0.90	10.10	1.41	1.89	PE CALAMA,

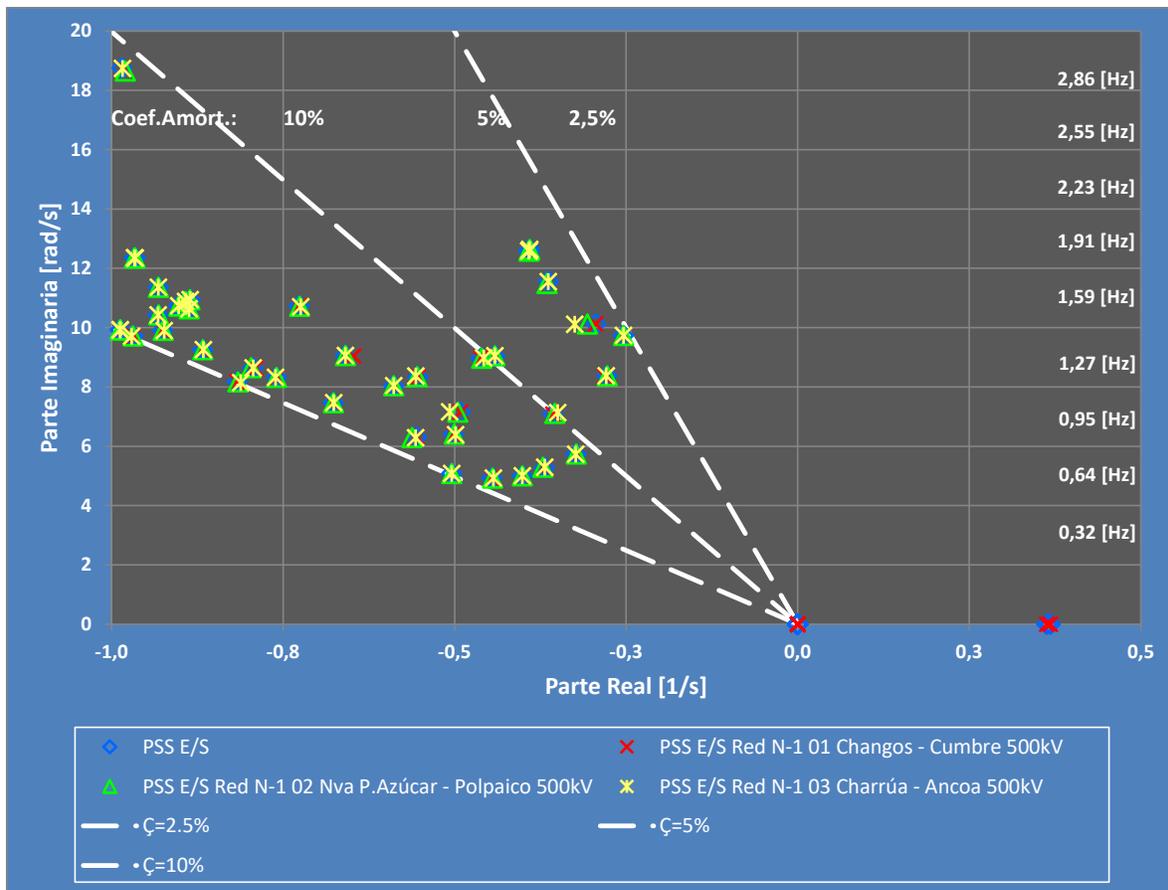


Figura 6 Modos de Oscilación Electromecánicos para escenario E2 DA noche Diciembre 2024 Red N-1.

En la Figura 6 Modos de Oscilación Electromecánicos para escenario E2 DA noche Diciembre 2024 Red N-1. se pretende mostrar el efecto de la consideración de contingencias simples para los modos críticos en casos donde se encuentran los PSS E/S.

Dado que la mayoría de los modos se encuentran entre un 10% y un 5%, gran parte de los modos críticos en los casos de Red N no alcanzan a ser críticos para los casos red N-1. Los modos críticos en

casos Red N-1 son aquellos modos que en caso Red N tienen amortiguamiento bajo 5%. Estos modos son de carácter local y están asociados las unidades de Parque Eólico Monte Redondo, Los Molles y Parque Eólico Aurora con frecuencias de alrededor de 1.5 [Hz], 2.2 [Hz] y 1.3 [Hz], respectivamente.

Se puede visualizar que, para las contingencias consideradas, si bien se produce un desplazamiento a la derecha de algunos de los modos críticos para el caso Red N, no alcanza a ser significativo para que los amortiguamientos de estos modos pasen de ser en el caso red N-1 inferiores a 5%. Este desplazamiento es más apreciable en el caso de la contingencia simple de un circuito de la línea Nueva Pan de Azúcar – Polpaico 500 kV. Por lo tanto, los modos críticos con un amortiguamiento inferior a 10% no son significativamente sensibles a las contingencias consideradas.

8.2 Escenarios Demanda Baja

A continuación, se presentan los resultados para el análisis modal para los escenarios de demanda baja.

8.2.1 E3 DB Día Abril 2024

Para el escenario de demanda baja previsto para abril de 2024, se tienen los siguientes resultados para el análisis modal.

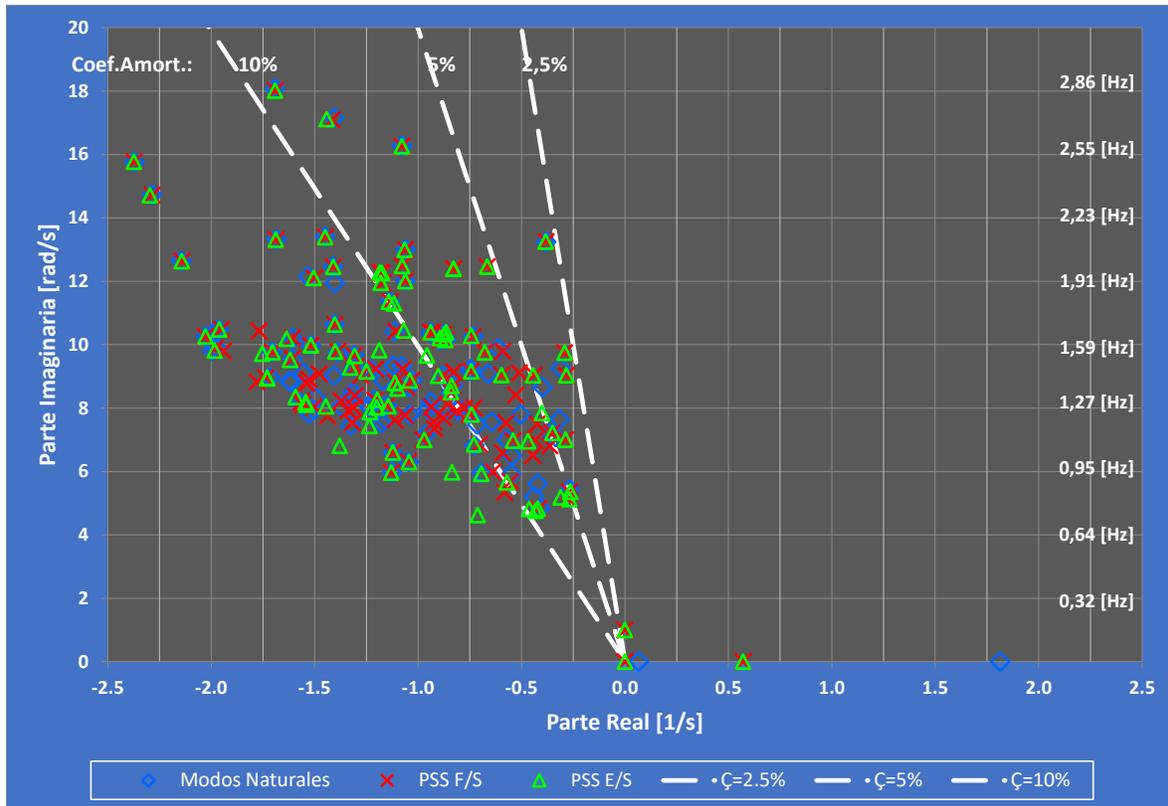


Figura 7: Modos de Oscilación Electromecánicos para escenario E3 DB día Abril 2024 Red N.

En la Figura 7 se aprecian los valores propios para el escenario de demanda baja para abril 2024, donde se identifican los modos naturales (\diamond), los modos con controladores habilitados, pero con PSS fuera de servicio (X) y finalmente los modos con PSS E/S (Δ). Para los casos con PSS F/S y PSS E/S, se aprecian tres modos inestables asociados a elementos de control de generación ERV, sin embargo, no existe evidencia en la operación real del SEN de problemas de oscilaciones indeseadas asociadas a este tipo de generación. Asimismo, para los modos naturales es posible identificar dos modos inestables adicionales en el semiplano derecho. Sin embargo, resulta importante señalar que esta observación carece de relevancia ya que, en los casos con PSS F/S y PSS E/S, dicha inestabilidad no se presenta. Este hecho sugiere que, con los recursos actualmente instalados y homologados, no se presentan problemas de inestabilidad de pequeña señal que puedan representar un riesgo para la operación del SEN.

Considerando los PSS E/S, se puede observar que la mayoría de los modos tienen un amortiguamiento mayor al 10%, cumpliendo con lo establecido en la NT.

Sin embargo, existe una cierta cantidad de modos que poseen amortiguamiento menor al 10% en su mayoría de carácter local, entre los cuales se incluyen modos asociados a las unidades de Cipreses, Las Lajas, Convento Viejo y Lautaro, incluidos modos asociados a unidades de los Parques Eólicos: Puelche Sur, Los Cururos, Llanos de Viento, Talinay y El Totoral. Por otro lado, hay algunos modos que tienen amortiguamiento menor al 5% asociados a las unidades de Machicura, San Ignacio, Carilafquén y a las unidades de los Parques Eólicos de Monte redondo, Tchamma y Los Olmos. Finalmente, se encuentra un modo con amortiguamiento menor al 2,9% correspondiente a las unidades de Los Molles.

El detalle de los modos electromecánicos críticos se muestra en la Tabla 10. La categorización de estos modos se realiza en base a los factores de observabilidad y los diagramas fasoriales para los modos de carácter local se detallan como parte los anexos de este informe.

Tabla 10: Modos de oscilación electromecánicos críticos escenario E3 DB día Abril 2024 PSS E/S

Modo	P.Real [1/s]	P.Imag [rad/s]	Mag. [1/s]	Ang. [°]	Frec. [Hz]	Periodo [s]	Xi	CTA [s]	A1/A2	Descripción
33	-0.38	13.25	13.25	91.65	2.11	0.47	2.89%	2.61	1.20	Local intraplanta Los Molles
27	-0.29	9.75	9.75	91.72	1.55	0.64	3.00%	3.42	1.21	PE Monte redondo
23	-0.28	9.04	9.04	91.79	1.44	0.70	3.13%	3.53	1.22	PE Tchamma
25	-0.29	7.00	7.01	92.34	1.11	0.90	4.09%	3.49	1.29	PE Los Olmos
31	-0.35	7.22	7.23	92.78	1.15	0.87	4.84%	2.86	1.36	Local intraplanta Machicura U2
41	-0.44	9.04	9.05	92.81	1.44	0.70	4.90%	2.25	1.36	Local intraplanta San Ignacio
19	-0.26	5.36	5.37	92.82	0.85	1.17	4.92%	3.79	1.36	Local intraplanta Carilafquén
35	-0.40	7.84	7.85	92.93	1.25	0.80	5.11%	2.49	1.38	Local intraplanta: Cipreses
21	-0.27	5.13	5.14	93.01	0.82	1.22	5.24%	3.71	1.39	PE Puelche Sur
53	-0.67	12.46	12.48	93.06	1.98	0.50	5.34%	1.50	1.40	PE Los Cururos
29	-0.31	5.19	5.20	93.42	0.83	1.21	5.97%	3.23	1.46	Modo Inter-Área Centro Norte – Centro Sur - Sur
51	-0.60	9.04	9.06	93.78	1.44	0.69	6.59%	1.67	1.51	PE Llanos del Viento
107	-1.08	16.26	16.30	93.80	2.59	0.39	6.62%	0.93	1.52	Local intraplanta Convento Viejo U1
69	-0.83	12.39	12.42	93.82	1.97	0.51	6.67%	1.21	1.52	PE Talinay oriente
71	-0.83	12.40	12.42	93.83	1.97	0.51	6.67%	1.21	1.52	PE Talinay oriente
45	-0.47	6.95	6.97	93.86	1.11	0.90	6.73%	2.13	1.53	Local interplanta: Cipreses - Curillinque - Isla
55	-0.68	9.76	9.78	93.97	1.55	0.64	6.93%	1.48	1.55	PE El Totoral
65	-0.74	10.28	10.31	94.14	1.64	0.61	7.21%	1.35	1.58	Local intraplanta: Lautaro
47	-0.54	6.97	6.99	94.44	1.11	0.90	7.74%	1.85	1.63	PE Calama
67	-0.74	9.16	9.19	94.64	1.46	0.69	8.09%	1.34	1.67	Local intraplanta Pacífico
101	-1.07	13.00	13.04	94.68	2.07	0.48	8.17%	0.94	1.67	Local intraplanta Santa Marta
79	-0.86	10.39	10.43	94.76	1.65	0.60	8.29%	1.16	1.69	PE Sierra Gorda
155	-1.44	17.12	17.18	94.81	2.72	0.37	8.39%	0.69	1.70	Local intraplanta Mapa TG7
83	-0.87	10.33	10.37	94.84	1.64	0.61	8.43%	1.14	1.70	Local intraplanta: Los Quilos
81	-0.87	10.15	10.19	94.89	1.62	0.62	8.52%	1.15	1.71	Local intraplanta: Los Quilos
105	-1.08	12.49	12.54	94.93	1.99	0.50	8.60%	0.93	1.72	PE El Arrayán
37	-0.42	4.83	4.85	94.99	0.77	1.30	8.70%	2.37	1.73	Local intraplanta: Nueva Aldea - Nueva Aldea III
85	-0.89	10.21	10.25	95.01	1.62	0.62	8.72%	1.12	1.73	Local interplanta: Pilmaiquén - Canutillar
99	-1.06	12.01	12.05	95.05	1.91	0.52	8.80%	0.94	1.74	Local intraplanta: Lautaro
89	-0.94	10.39	10.43	95.17	1.65	0.60	9.00%	1.07	1.76	Local intraplanta: Pilmaiquén
39	-0.43	4.76	4.78	95.18	0.76	1.32	9.04%	2.32	1.77	Local intraplanta Angostura
181	-1.69	18.02	18.10	95.36	2.87	0.35	9.35%	0.59	1.80	Local interplanta: Renaico - Alto Renaico - Picoiquén

Modo	P.Real [1/s]	P.Imag [rad/s]	Mag. [1/s]	Ang. [°]	Frec. [Hz]	Periodo [s]	Xi	CTA [s]	A1/A2	Descripción
63	-0.74	7.80	7.84	95.42	1.24	0.81	9.45%	1.35	1.82	Local intraplanta: Ancoa
123	-1.17	12.26	12.31	95.47	1.95	0.51	9.54%	0.85	1.83	PE Valle de los vientos
43	-0.46	4.82	4.84	95.49	0.77	1.30	9.57%	2.16	1.83	Local intraplanta: Las Lajas
75	-0.84	8.70	8.74	95.50	1.39	0.72	9.59%	1.19	1.83	Local intraplanta Energía Pacífico
127	-1.19	12.27	12.33	95.52	1.95	0.51	9.62%	0.84	1.83	PE Valle de los vientos
125	-1.18	11.95	12.01	95.64	1.90	0.53	9.82%	0.85	1.86	Local intraplanta Palmucho
113	-1.12	11.30	11.36	95.64	1.80	0.56	9.83%	0.90	1.86	Local intraplanta: Canutillar
77	-0.84	8.50	8.54	95.65	1.35	0.74	9.85%	1.19	1.86	Local intraplanta Malalcahuello
91	-0.96	9.66	9.71	95.66	1.54	0.65	9.86%	1.04	1.86	Local intraplanta Colbún
87	-0.90	9.02	9.07	95.71	1.44	0.70	9.95%	1.11	1.87	Local intraplanta Palmar
119	-1.14	11.36	11.41	95.74	1.81	0.55	10.00%	0.88	1.88	Local intraplanta: Puntilla

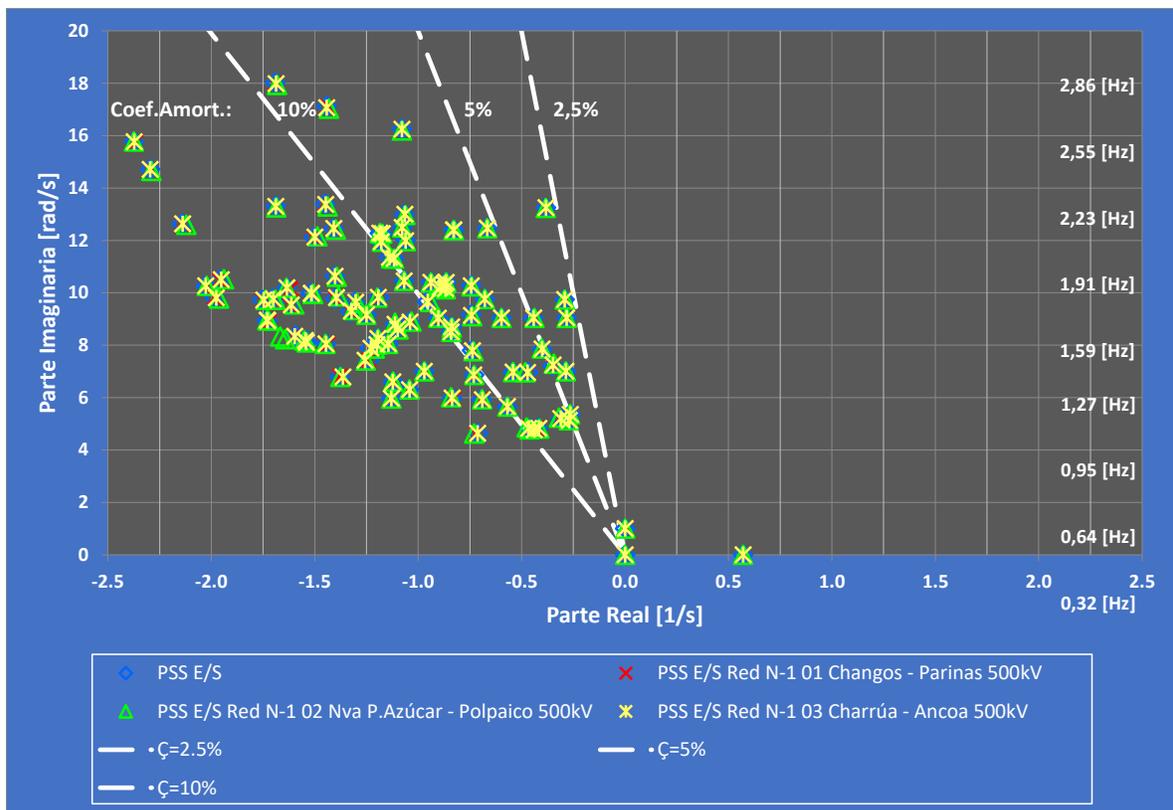


Figura 8: Modos de Oscilación Electromecánicos para escenario E3 DB día Abril 2024 Red N y Red N-1.

En la Figura 8 se muestra el efecto de la consideración de contingencias simples para los modos críticos en casos donde se encuentran los PSS E/S.

Tal como sucede en red N, para red N-1 se aprecian tres modos inestables asociados a elementos de control de generación ERV, sin embargo, no existe evidencia en la operación real del SEN de problemas de oscilaciones indeseadas asociadas a este tipo de generación.

Por otra parte, se pueden apreciar siete modos críticos considerando las contingencias. Se observa un grupo de modos con amortiguamiento en torno al 3% asociados a las unidades de Los Molles y a

las unidades de los Parques Eólicos: Monte redondo y Tchamma. También se observa un grupo de modos con amortiguamiento en torno al 4,7% asociados a las unidades de Machicura, San Ignacio, Carilafquén y a las unidades del Parque Eólico Los Olmos.

Se considera satisfactorio un amortiguamiento de 5% para los casos de Red N-1 y de 10% para el caso Red N. De acuerdo con lo anterior, dado que la gran mayoría de los modos se encuentran entre un 10% y un 5%, hay una mayor presencia de modos críticos en los casos de Red N que no alcanzan a ser críticos para los casos red N-1.

Se puede visualizar que, para las contingencias consideradas, no se aprecia un desplazamiento de los modos en el caso red N tal que los amortiguamientos de estos pasen de ser en el caso red N-1 inferiores a 5%. Los modos críticos en este caso son de carácter local y corresponden a aquellos que ya en red N presentan un amortiguamiento inferior a 5%.

El detalle de los modos críticos para los casos red N-1 es redundante considerando que son modos que en el caso red se presentan con un amortiguamiento inferior a 5%. En todo caso, la categorización de estos modos se realiza en base a los factores de observabilidad y los diagramas fasoriales para los modos de carácter local se detallan como parte los anexos de este informe.

8.2.2 E4 DB Noche Diciembre 2024

Para el escenario de demanda baja previsto para diciembre 2024, se tienen los siguientes resultados para el análisis modal.

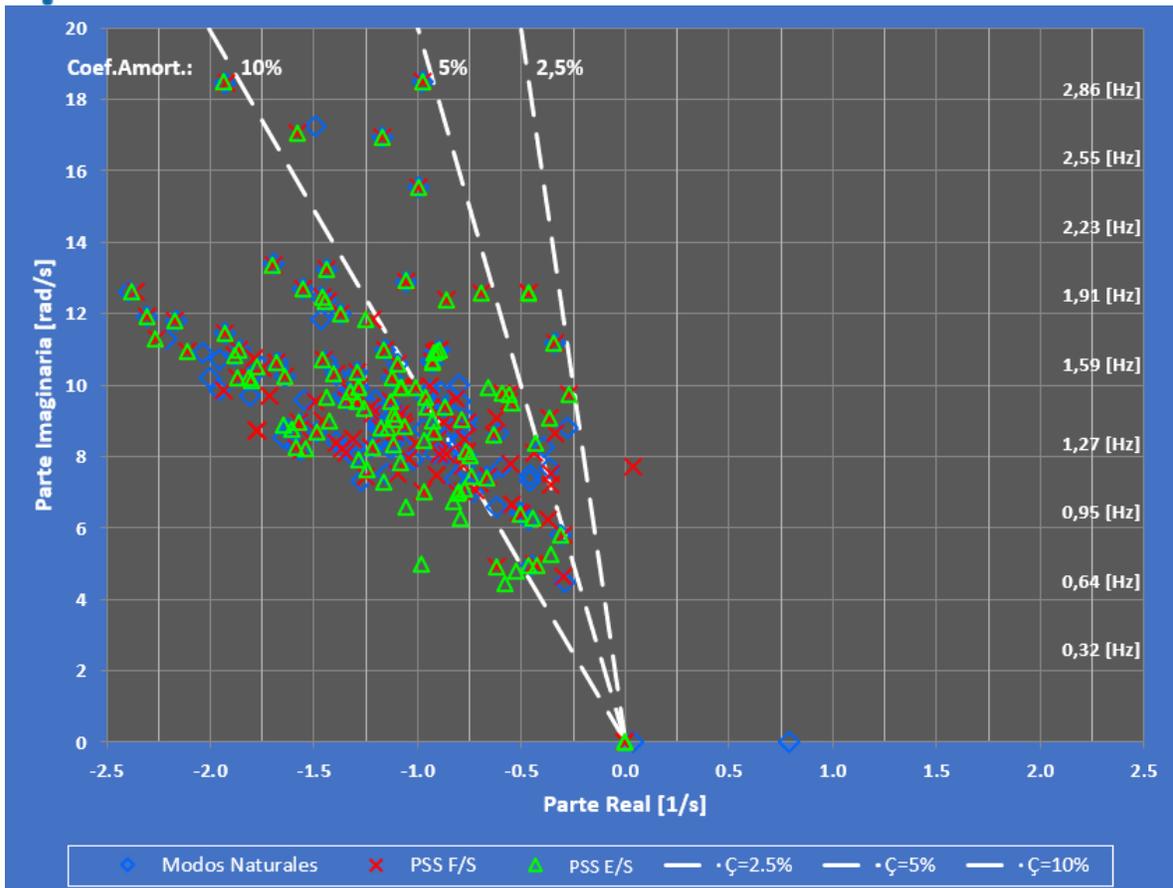


Figura 9: Modos de Oscilación Electromecánicos para escenario E4 DB noche Diciembre de 2024 Red N.

En la Figura 9 se aprecian los valores propios para el escenario de demanda baja para diciembre 2024, donde se identifican los modos naturales (\diamond), los modos con controladores habilitados, con PSS fuera de servicio (X) y finalmente los modos con PSS E/S (Δ).

Para el caso de modos naturales se aprecia un caso inestable en el semiplano derecho, el cual corresponde a un modo local asociado a PE Sierra Gorda. Esta planta se encuentra modelada como una máquina de inducción doblemente alimentada DFIG y para estas clases de unidades no se descarta presencia de modos naturales inestable, de todos modos este se ve corregido mediante la incorporación de sus controles dado que este ya no se presenta en los casos con PSS F/S y PSS E/S, donde, además, no se aprecian modos inestables.

En el caso con PSS F/S, se puede observar un caso inestable, el cual corresponde a un modo local asociado a TER Cochrane U1 y U2, este se ve corregido al incorporar los PSS ya que este no se presenta en el caso de PSS E/S.

Considerando los PSS E/S, se visualizan que la mayoría de los modos tienen un amortiguamiento mayor al 10%, cumpliendo con lo establecido en la NT.

Para el caso de Red N la mayoría de los modos críticos se encuentran más bien por sobre los 0.95 [Hz] lo que implicaría que corresponden más bien a modos locales.

Los modos con amortiguamiento menor a 3% están asociados a parques eólicos y corresponden a modos de carácter local. Estas plantas no corresponden a unidades generadoras sincrónicas por lo que no pueden contar con PSS en la manera exigida para unidades sincrónicas.

Se observan modos con amortiguamiento bajo 5%, de los cuales la mayoría se encuentran asociados a plantas ERV, como Valle de los Vientos y Tchama. También se aprecia dos modos electromecánicos asociado a Los Molles y Triful Triful, que corresponden a unidades bajo 50 MW.

En relación con los modos críticos observados con amortiguamiento sobre 5%, se encuentran modos asociados a parques eólicos como Puelche Sur, El Arrayán, Sierra Gorda, Talinay y El Totoral. Se aprecian modos de carácter electromecánicos principalmente locales de unidades de capacidad menor a 50 MW como Rio Picoiquén, Renaico, Convento Viejo, Pilmaiquén, Los Quilos, Lautaro U2, Palmar, Malalcahuello, Juncal, Ancoa, Itata, Carilafquén, Cipreses y Los Molles. No obstante, también se aprecian modos locales de unidades de mayor capacidad como San Ignacio, Colbún, Canutillar, Nueva Aldea y Alfalfal.

El detalle de los modos electromecánicos críticos se muestra en Tabla 11. La categorización de estos modos se realiza en base a los factores de observabilidad y los diagramas fasoriales para los modos de carácter local se detallan como parte los anexos de este informe.

Tabla 11: Modos de oscilación electromecánicos críticos escenario E3 DB noche diciembre 2024 PSS E/S.

Modo	P. Real [1/s]	P. Imag [rad/s]	Mag. [1/s]	Ang. [°]	Frec. [Hz]	Período [s]	Xi	CTA [s]	A1/A2	Descripción
660	-0.275	9.741	9.745	91.615	1.550	0.645	2.819	3.641	1.194	PE Monte Redondo
1260	-1.340	43.785	43.805	91.753	6.969	0.144	3.060	0.746	1.212	Local intraplanta PMGD HP TRUFULT
700	-0.346	11.174	11.179	91.772	1.778	0.562	3.092	2.893	1.215	Local intraplanta HP Los Molles
767	-0.464	12.570	12.579	92.114	2.001	0.500	3.688	2.155	1.261	PE Valle de Los Vientos
769	-0.464	12.570	12.579	92.114	2.001	0.500	3.688	2.155	1.261	PE Valle de Los Vientos
706	-0.367	9.056	9.064	92.319	1.441	0.694	4.046	2.727	1.290	PE Tchamma
744	-0.432	8.389	8.400	92.945	1.335	0.749	5.137	2.317	1.382	Local Intraplanta Cipreses
1079	-0.974	18.519	18.545	93.010	2.947	0.339	5.251	1.027	1.392	Local Intraplanta Los Molles
677	-0.314	5.792	5.800	93.102	0.922	1.085	5.412	3.186	1.406	Local intraplanta Carilafquén
973	-0.695	12.579	12.598	93.162	2.002	0.499	5.517	1.439	1.415	PE El Arrayán
905	-0.544	9.519	9.535	93.270	1.515	0.660	5.704	1.839	1.432	Local intraplanta HP Alfalfal
918	-0.558	9.752	9.768	93.278	1.552	0.644	5.718	1.791	1.433	PE El Totoral
935	-0.594	9.795	9.813	93.468	1.559	0.641	6.050	1.684	1.463	PE Sierra Gorda
1087	-0.997	15.534	15.566	93.672	2.472	0.404	6.405	1.003	1.497	Local intraplanta Convento Viejo
960	-0.662	9.931	9.953	93.811	1.581	0.633	6.647	1.512	1.520	Local Colbún
704	-0.357	5.261	5.273	93.884	0.837	1.194	6.773	2.800	1.532	Local intraplanta Las Lajas
1208	-1.172	16.951	16.992	93.954	2.698	0.371	6.895	0.854	1.544	Local intraplanta Convento Viejo
1034	-0.860	12.382	12.411	93.975	1.971	0.507	6.931	1.162	1.547	PE Talinay Oriente
753	-0.446	6.282	6.298	94.062	1.000	1.000	7.083	2.242	1.562	Local interplanta Capullo – Cumbres Mocho – Pulefu - Callao
954	-0.637	8.615	8.638	94.230	1.371	0.729	7.377	1.569	1.592	Local intraplanta San Ignacio
885	-0.504	6.394	6.414	94.505	1.018	0.983	7.854	1.985	1.640	Local intraplanta Itata
1042	-0.898	11.009	11.046	94.665	1.752	0.571	8.132	1.113	1.670	Local intraplanta Pilmaiquén
1171	-1.058	12.907	12.950	94.685	2.054	0.487	8.167	0.945	1.673	Local intraplanta TER Santa Marta

Modo	P. Real [1/s]	P. Imag [rad/s]	Mag. [1/s]	Ang. [°]	Frec. [Hz]	Período [s]	Xi	CTA [s]	A1/A2	Descripción
1047	-0.906	10.949	10.986	94.729	1.743	0.574	8.244	1.104	1.682	Local Intraplanta Pilmaiquén
1055	-0.922	10.917	10.956	94.830	1.738	0.576	8.420	1.084	1.700	Local intraplanta Los Quilos
736	-0.426	4.966	4.985	94.908	0.790	1.265	8.556	2.345	1.715	PE Puelche Sur
1057	-0.928	10.689	10.729	94.962	1.701	0.588	8.650	1.077	1.726	Local Intraplanta Pilmaiquén
1059	-0.928	10.657	10.698	94.978	1.696	0.590	8.678	1.077	1.729	Local Intraplanta Los Quilos
1010	-0.789	9.032	9.066	94.995	1.437	0.696	8.707	1.267	1.732	Local Intraplanta Juncal
962	-0.662	7.423	7.453	95.096	1.181	0.846	8.882	1.511	1.751	Local intraplanta TER Lautaro
1366	-1.855	20.760	20.843	95.105	3.304	0.303	8.898	0.539	1.753	Local Interplanta Alto Renaico- Río Picoiquén
1322	-1.577	17.068	17.141	95.280	2.716	0.368	9.202	0.634	1.787	Local Interplanta Alto Renaico- Río Picoiquén
1037	-0.867	9.384	9.424	95.281	1.493	0.670	9.204	1.153	1.787	Local intraplanta HP Palmar
994	-0.750	8.026	8.061	95.336	1.277	0.783	9.299	1.334	1.798	Local intraplanta Ancoa
771	-0.467	4.978	5.000	95.362	0.792	1.262	9.345	2.140	1.803	Local TER Nueva Aldea
998	-0.766	8.141	8.177	95.378	1.296	0.772	9.373	1.305	1.807	Local Interplanta Mocho – Pilmaiquén – Cumbre - Pullinque
992	-0.742	7.460	7.497	95.682	1.187	0.842	9.900	1.347	1.868	Local interplanta Cipreses - Curillinque - Isla - TER Lautaro
1073	-0.962	9.663	9.710	95.684	1.538	0.650	9.904	1.040	1.869	Local intraplanta Malalcahuello

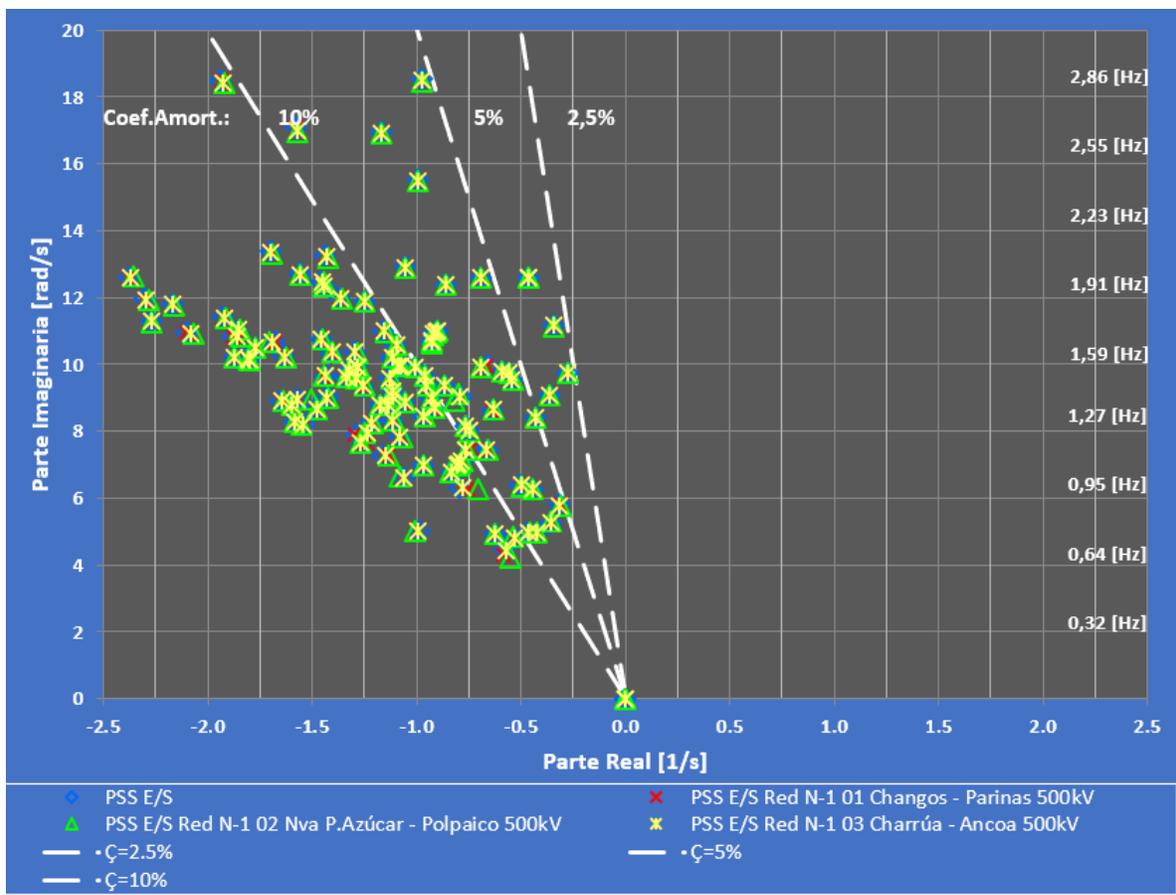


Figura 10: Modos de Oscilación Electromecánicas para escenario E4 diciembre 2024 Red N y Red N-1.

En la Figura 10 se muestra el efecto de la aplicación de contingencias simples para los modos en casos donde se encuentran los PSS E/S.

Dado que la gran mayoría de los modos se encuentran entre un 10% y un 5%, hay una mayor presencia de modos críticos en los casos de Red N que no alcanzan a ser críticos para los casos red N-1, por lo que los modos críticos no son sensibles a las contingencias.

Se obtienen cinco modos críticos con un amortiguamiento inferior a 5%, los que no son sensibles a las contingencias aplicadas. Uno de estos modos corresponde a un modo electromecánico local Los Molles, los demás corresponden a modos asociados a plantas eólicas como Valle de los Vientos y Tchama.

El detalle de los modos críticos para los casos red N-1 es redundante considerando que son modos que en el caso Red N se presentan con un amortiguamiento inferior a 5%. La categorización de estos modos se realiza en base a los factores de observabilidad y los diagramas fasoriales para los modos de carácter local se detallan como parte los anexos de este informe.

9 CARACTERIZACIÓN DE MODOS ELECTROMECAÑICOS CRÍTICOS

A continuación, se caracterizan los modos electromecánicos críticos a partir de los diagramas fasoriales de sus factores de observabilidad para las velocidades de rotor (que corresponde a la variable de estado *speed* en DigSILENT Powerfactory), además de los gráficos de barras de los factores de participación de sus velocidades de rotor. En la mayoría de los casos se consideran factores de participación mayores o iguales a 0,1[pu]. Para el caso de los factores de observabilidad debido a que, generalmente son valores bajos, se consideran órdenes de magnitud hasta alrededor de un 10% del valor máximo.

Los modos críticos generalmente se presentan en varios escenarios y se agrupan en base a las frecuencias asociadas y las unidades donde se manifiesta (factores de observabilidad de velocidades rotóricas) y/o tienen una participación apreciable (factores de participación de velocidades rotóricas). En este sentido, se escoge un escenario testigo para la caracterización y se muestran los escenarios donde también se presenta en una tabla detallada para visualizar los amortiguamientos asociados, entre otras variables. El detalle de cada uno de los resultados para cada escenario se adjunta como parte de los anexos de este informe.

Finalmente, se enfatiza el hecho de que los análisis están enfocados en los modos electromecánicos de carácter interárea.

9.1 Modos Interárea.

En los escenarios considerados no se obtuvieron modos críticos de carácter interárea entre el Norte Grande y el resto del SEN. Más bien, fueron encontrados modos interárea entre el centro y sur del SEN.

9.1.1 Interárea Centro Norte – Centro Sur - Sur 0,91 [Hz]

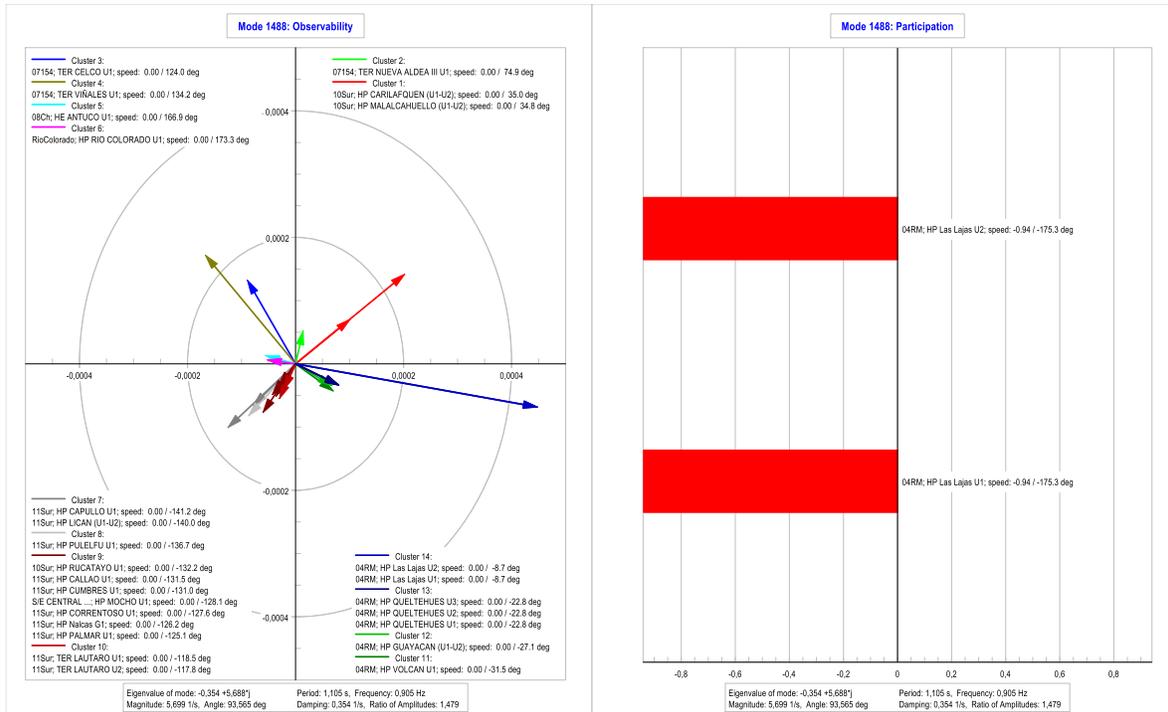


Figura 11: Modo Inter-Área Centro Norte – Centro Sur - Sur 0,91 [Hz] (Caso Testigo E1 DA Día Mar 2024)

Tabla 12: Modo Inter-Área Centro Norte – Centro Sur - Sur 0,91 [Hz]

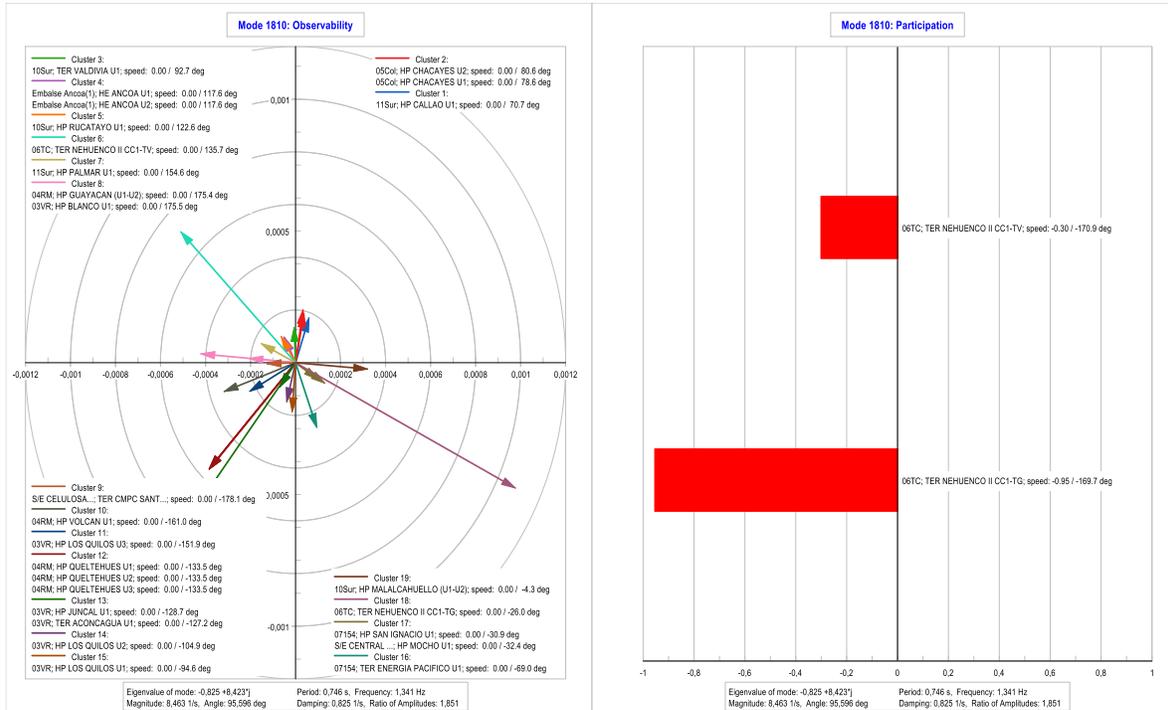
Escenario	Modo	P. Real [1/s]	P. Imag [rad/s]	Mag. [1/s]	Ang. [°]	Frec. [Hz]	Periodo [s]	Xi [%]	CTA [s]	A1/A2
E1	1488	-0,35	5,69	5,70	93,57	0,91	1,11	6,22	2,82	1,48
E2	31	-0,37	5,28	5,29	94,00	0,84	1,19	6,97	2,71	1,55
E3	29	-0,31	5,19	5,20	93,42	0,83	1,21	5,97	3,23	1,46
E4	704	-0,36	5,26	5,27	93,88	0,84	1,19	6,77	2,80	1,53

Se puede apreciar que este modo se manifiesta en una gran cantidad de unidades, preferentemente bajo 50[MW] y que no cuentan con PSS, a excepción de las unidades de Central Las Lajas. La frecuencia del modo es de 0,905 [Hz], razón por lo que se encuentra dentro de los rangos típicos establecidos en la bibliografía para modos interárea y su factor de amortiguamiento es de 6,2% y ante los casos Red N-1 no se observa que el amortiguamiento descienda bajo 5%.

Se puede ver que los factores de observabilidad se encuentran distribuidos en los 4 cuadrantes, con una predominancia de Central las Lajas, luego Carilafquén, Malalcahuello y Viñales.

En el gráfico de las participaciones, se observa que las unidades de Central Las Lajas corresponden a las únicas que poseen factores de participación sobre 10%. Por lo tanto, en la medida que se incorpore torque de amortiguamiento en el eje de estas unidades, se puede mejorar el amortiguamiento del modo.

9.1.2 Interárea Centro Norte – Centro Sur 1,34 [Hz]



Escenario	Modo	P. Real [1/s]	P. Imag [rad/s]	Mag. [1/s]	Ang. [°]	Frec. [Hz]	Periodo [s]	Xi	CTA [s]	A1/A2
E1	1810	-0,825	8,423	8,463	95,596	1,341	0,746	9,75	1,212	1,851

Se puede apreciar que este modo se manifiesta en una gran cantidad de unidades, preferentemente bajo 50[MW] y que no cuentan con PSS, a excepción de Nehuencho II. La frecuencia del modo es de 1.341[Hz] y su factor de amortiguamiento es de 9,75%, bastante cercano a lo exigido en la NT SyCS.

Se puede ver que los factores de observabilidad se encuentran distribuidos en los 4 cuadrantes, con una predominancia de Central Nehuencho II donde la TG y TV oscilan en contra fase. también se aprecian factores de observabilidad comparativamente mayores en las unidades del Central Queltehues, Juncal y Aconcagua.

En el gráfico de las participaciones, se observa que las unidades de Central Nehuencho II corresponden a las únicas que poseen factores de participación sobre 10%. Por lo tanto, en la medida que se incorpore torque de amortiguamiento en el eje de estas unidades, se puede mejorar el amortiguamiento del modo.

9.2 Modos Locales Interplanta

A continuación, se caracterizan los modos de carácter local interplanta.

9.2.1 Área Sur: Palmar - Correntoso - Cumbres - Rucatayo - Canutillar 1,57 [Hz]

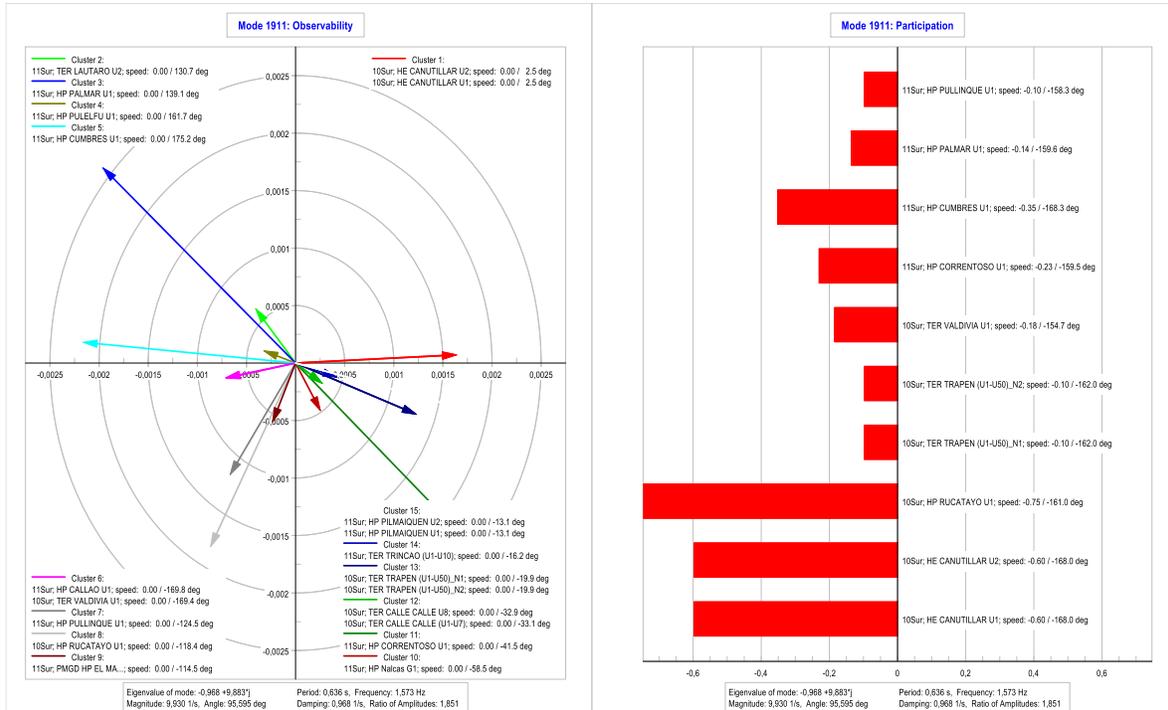


Figura 12: Modo Área Sur: Palmar - Correntoso - Cumbres - Rucatayo - Canutillar 1,57 [Hz] (Caso Testigo E1 DA día Mar2024)

Tabla 13: Modo Área Sur: Palmar - Correntoso - Cumbres - Rucatayo - Canutillar 1,57 [Hz]

Escenario	Modo	P. Real [1/s]	P. Imag [rad/s]	Mag. [1/s]	Ang. [°]	Frec. [Hz]	Periodo [s]	ξ	CTA [s]	A1/A2
E1	1911	-0,97	9,88	9,93	95,60	1,57	0,64	9,75	1,03	1,85
E2	59	-0,56	6,30	6,33	95,04	1,00	1,00	8,78	1,80	1,74
E2	111	-0,97	9,72	9,76	95,69	1,55	0,65	9,92	1,03	1,87

Se puede apreciar que este modo se manifiesta en unidades de Rucatayo (U1), Canutillar (U1, U2), Cumbres (U1), Correntoso(U1), Valdivia (U1), Palmar (U1), Pullinque y Trapén. La frecuencia del modo es de 1,57 [Hz] y su factor de amortiguamiento es de 9,75%

Se puede ver que los factores de observabilidad se encuentran distribuidos en los 4 cuadrantes, pero predominan las unidades pertenecientes a Palmar, Correntoso, Cumbres, Canutillar, Rucatayo, Trapén y Valdivia. Las unidades Palmar y Cumbres oscilan en contrafase de Correntoso y Trapén, mientras que las unidades de Rucatayo y Valdivia oscilan en contrafase de las unidades de Canutillar

Respecto las participaciones, la unidad U1 de Rucatayo alcanza el 70%, las unidades U1 y U2 de Canutillar tienen participaciones cercanas a 60%, Cumbres cercano al 35% y el resto de las unidades ya mencionadas con participaciones inferiores al 30%.

9.2.2 Mocho – Pilmaiquén – Cumbre - Pullinque 1,30 [Hz]

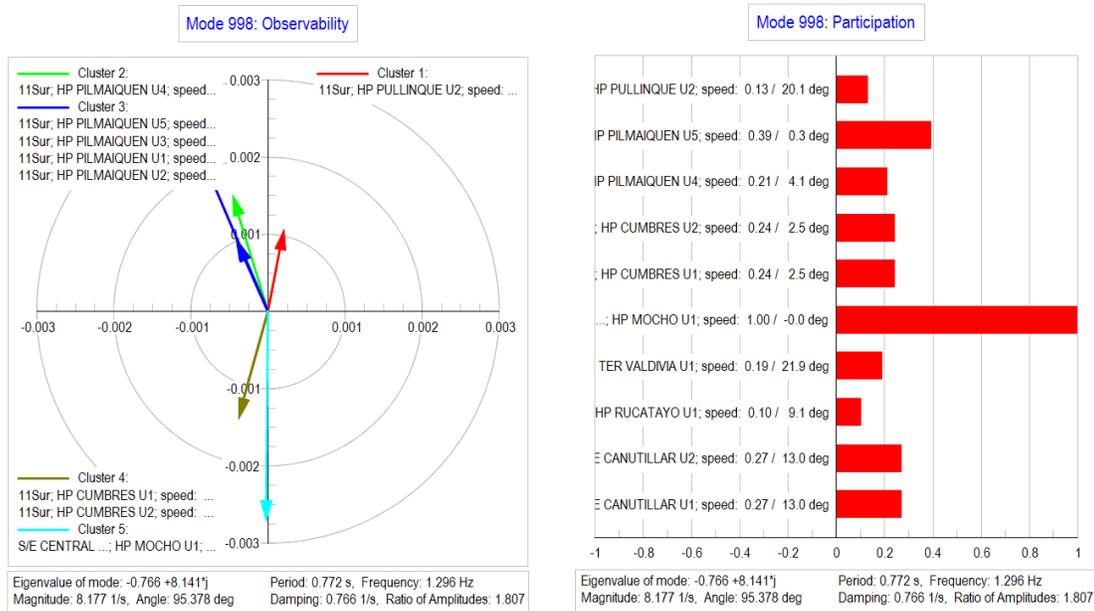


Figura 13: Modo Mocho – Pilmaiquén – Cumbre - Pullinque 1,30 [Hz] (Caso Testigo E4 DB Noche Dic 2024)

Tabla 14: Modo Mocho– Pilmaiquén – Canutillar 1,30 [Hz]

Escenario	Modo	P, Real [1/s]	P, Imag [rad/s]	Mag, [1/s]	Ang, [°]	Frec, [Hz]	Periodo [s]	Xi [%]	CTA [s]	A1/A2
E4	998	-0,77	8,14	8,18	95,38	1,30	0,77	9,37	1,30	1,81

Este modo se aprecia que se manifiesta predominantemente en las unidades Mocho y Pilmaiquén, mientras que, se presenta en menor medida en las unidades Cumbres y Pullinque. La frecuencia del modo es 1.30[Hz], correspondiente a un carácter más bien local y el factor de amortiguamiento es 9,37%, lo que es bastante cercano a lo que establece la NT SyCS.

Se puede apreciar que los factores de observabilidad se encuentran distribuidos en tres de los cuatro cuadrantes y con predominancia de la unidad de Mocho.

Respecto las participaciones, estas son predominan en las unidades de Mocho sobre 90%, luego Pilmaiquén sobre 33%, y las unidades Canutillar, Cumbre, Pullinque Valdivia y Rucatayo bajo 33%.

9.2.3 Capullo – Cumbres – Mocho – Pulelfu – Callao - Carilafquén 1,30 [Hz]

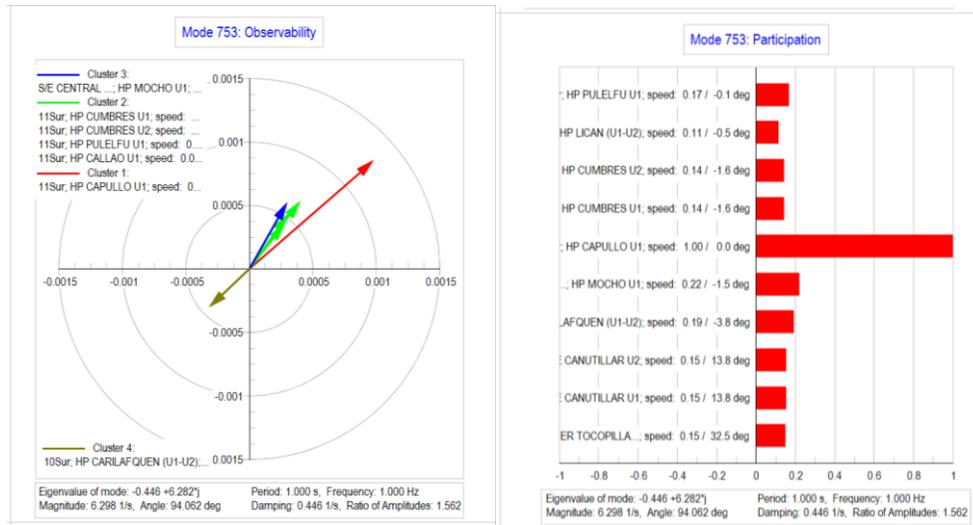


Figura 14: Modo Capullo – Cumbres – Mocho – Pulelfu – Callao – Carilafquén 1[Hz] (Caso Testigo E4 DB Noche Dic 2024)

Tabla 15: Capullo – Cumbres – Mocho – Pulelfu – Callao – Carilafquén 1 [Hz]

Escenario	Modo	P, Real [1/s]	P, Imag [rad/s]	Mag, [1/s]	Ang, [°]	Frec, [Hz]	Periodo [s]	Xi [%]	CTA [s]	A1/A2
E4	753	-0.446	6.282	6.298	94.062	1.000	1.000	7.08	2.242	1.562

Este modo se aprecia que se manifiesta predominantemente en las unidades Mocho y Pilmaiquén, mientras que, se presenta en menor medida en las unidades Cumbres y Pullinque. La frecuencia del modo es 1.30[Hz], correspondiente a un carácter más bien local y el factor de amortiguamiento es 9,37%, lo que es bastante cercano a lo que establece la NT SyCS.

Se puede apreciar que los factores de observabilidad se encuentran distribuidos en tres de los cuatro cuadrantes y con predominancia de la unidad de Mocho.

Respecto las participaciones, estas son predominan en las unidades de Mocho sobre 90%, luego Pilmaiquén sobre 33%, y las unidades Canutillar, Cumbre, Pullinque Valdivia y Rucatayo bajo 33%.

9.2.4 Pilmaiquén – Canutillar 1,62 [Hz]

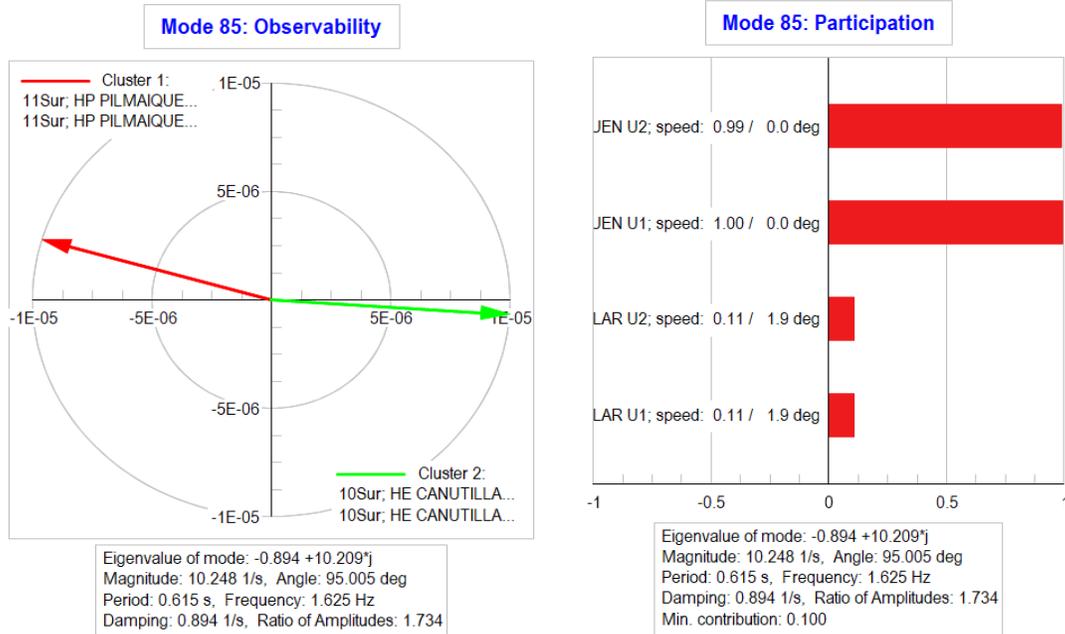


Figura 15: Modo Pilmaiquén – Canutillar 1,62 [Hz] (Caso Testigo E3 DB Día Abr 2024)

Tabla 16: Modo Pilmaiquén – Canutillar 1,62 [Hz]

Escenario	Modo	P, Real [1/s]	P, Imag [rad/s]	Mag, [1/s]	Ang, [°]	Frec, [Hz]	Periodo [s]	Xi [%]	CTA [s]	A1/A2
E3	85	-0,89	10,21	10,25	95,01	1,62	0,62	8,72	1,12	1,73

Este modo se aprecia que se manifiesta en las unidades U1-U2 de Pilmaiquén y Canutillar. La frecuencia del modo corresponde a 1,62[Hz], valores para un modo de carácter más bien local y el factor de amortiguamiento no es menor a 8,72% entre los escenarios analizados.

Se puede apreciar que los factores de observabilidad se encuentran distribuidos en 2 de los 4 cuadrantes manifestándose en las unidades U1-U2 de Pilmaiquén y U1-U2 de Canutillar.

Respecto las participaciones, estas predominan en la unidad U1-U2 de Pilmaiquén, con un valor cercano al 100% y las unidades U1-U2 de Canutillar con participaciones de alrededor de 11%.

9.2.5 Lautaro - Mocho 1,16 [Hz]

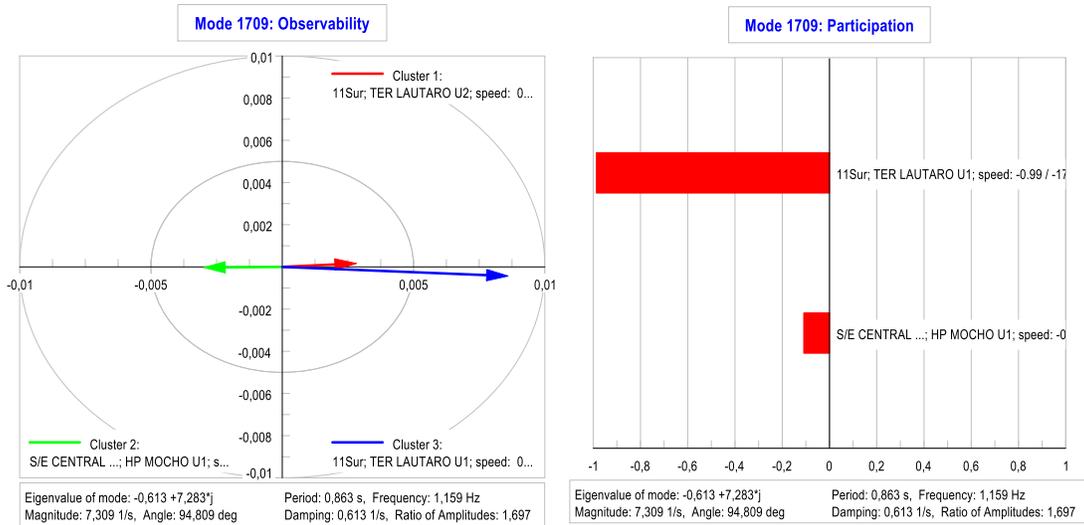


Figura 16: Modo Mocho – Lautaro 1,16 [Hz] (Caso Testigo E1 DA Día Mar 2024)

Tabla 17: Modo Lautaro - Mocho 1,16 [Hz]

Escenario	Modo	P, Real [1/s]	P, Imag [rad/s]	Mag, [1/s]	Ang, [°]	Frec, [Hz]	Periodo [s]	Xi	CTA [s]	A1/A2
E1	1709	-0,61	7,28	7,31	94,81	1,16	0,86	8,38	1,63	1,70

Este modo se aprecia que se manifiesta principalmente en las unidades U1-U2 de Lautaro y en menor medida en la unidad de Mocho. La frecuencia del modo corresponde a 1,16[Hz], lo que corresponde a modos de carácter local y el factor de amortiguamiento es 8,38%.

Se puede apreciar que los factores de observabilidad se encuentran distribuidos en 2 de los 4 cuadrantes manifestándose en las unidades U1-U2 de Lautaro y en la unidad de Mocho.

Respecto las participaciones, estas predominan en la unidad U1 de Lautaro, con un valor cercano al 100% y con menor participación destaca la unidad de Mocho entorno a un 10%.

9.2.6 Alto Renaico – Picoiqué 3,3[Hz]

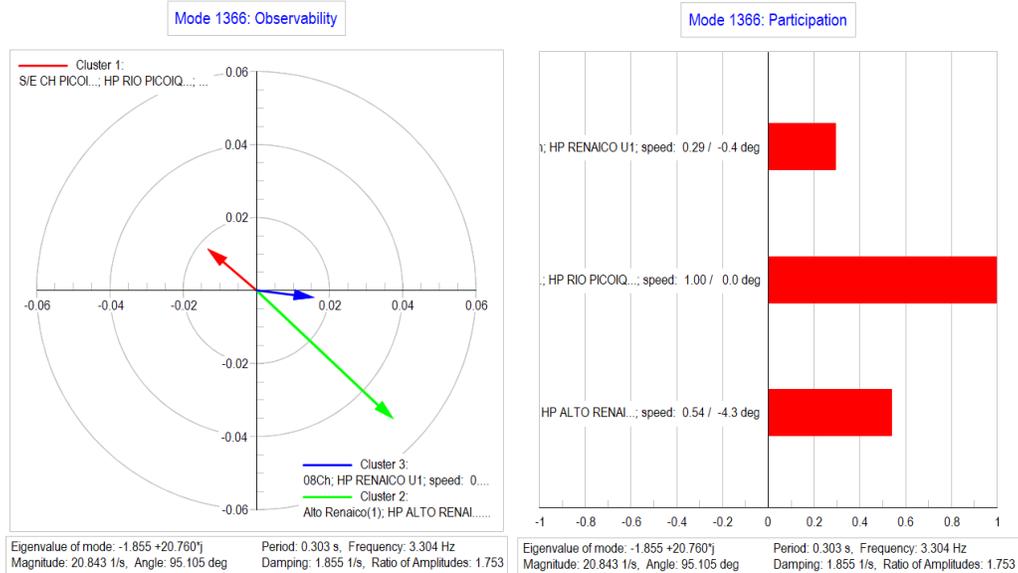


Figura 17: Modo Alto Renaico – Picoiqué 3,3 [Hz] (Caso Testigo E4 DB Noche Dic 2024)

Tabla 18: Modo Alto Renaico – Picoiqué 3,3 [Hz]

Escenario	Modo	P, Real [1/s]	P, Imag [rad/s]	Mag, [1/s]	Ang, [°]	Frec, [Hz]	Periodo [s]	Xi	CTA [s]	A1/A2
E3	181	-1,69	18,02	18,10	95,36	2,87	0,35	9,35	0,59	1,80
E4	1322	-1,58	17,07	17,14	95,28	2,72	0,37	9,20	0,63	1,79
E4	1366	-1.85	20.76	20.84	95.10	3.30	0.30	8.90	0.54	1.75

Este modo se aprecia que se manifiesta en las unidades de Alto Renaico y en menor medida en la unidad de Renaico y Picoiqué. Además este modo corresponde a un carácter más bien local de frecuencia sobre 2,7[Hz] y el factor de amortiguamiento supera 8.9% en todos los escenarios analizados.

Se puede apreciar que los factores de observabilidad se encuentran distribuidos en dos de los cuatro cuadrantes manifestándose en las unidades de Renaico, Picoiqué y Alto Renaico. Se aprecia que las unidades de Alto Renaico y Picoiqué oscilan en contrafase.

Respecto las participaciones, estas predominan en la unidad de Picoiqué, con un valor cercano al 100% y con menor participación destacan las unidades de Alto Renaico y Renaico.

9.2.7 Cipreses – Curillinque - Isla 1,11 [Hz]

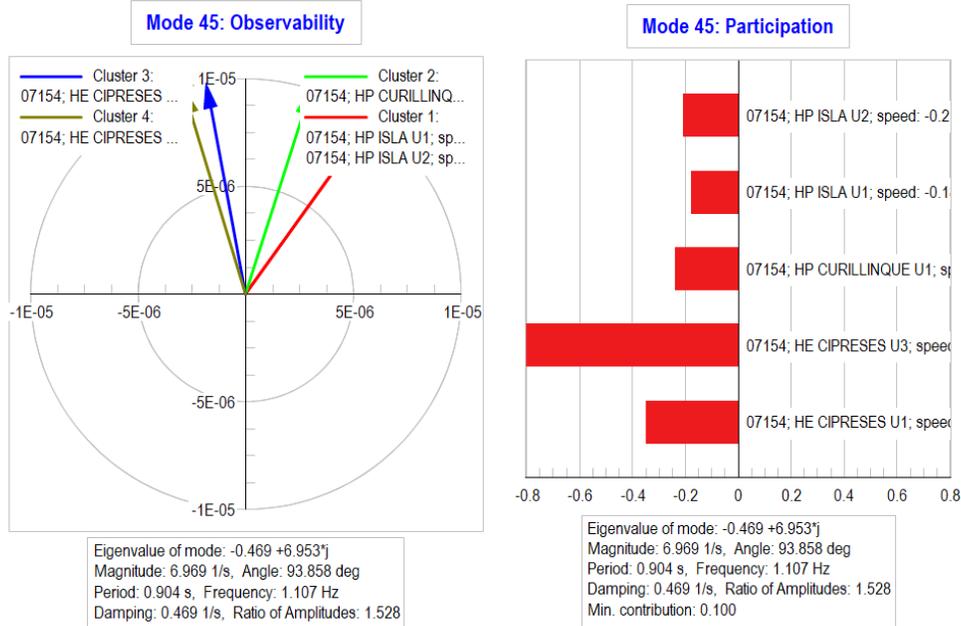


Figura 18: Modo Cipreses – Curillinque - Isla 1,11 [Hz] (Caso Testigo E3 DB Día Abr 2024)

Tabla 19: Modo Cipreses – Curillinque - Isla 1,11 [Hz]

Escenario	Modo	P, Real [1/s]	P, Imag [rad/s]	Mag, [1/s]	Ang, [°]	Frec, [Hz]	Periodo [s]	Xi	CTA [s]	A1/A2
E2	49	-0,49	7,15	7,17	93,93	1,14	0,88	6,86	2,03	1,54
E3	45	-0,47	6,95	6,97	93,86	1,11	0,90	6,73	2,13	1,53

Este modo se aprecia que se manifiesta en unidades ubicadas en la zona del Sistema de 154 kV, predominantemente en las unidades Cipreses, Curillinque e Isla. La frecuencia del modo va desde 1,11 a 1,14 [Hz] correspondiente a valores de modos de un carácter más bien local. El factor de amortiguamiento supera a 6,7% entre los escenarios analizados.

Se puede apreciar que los factores de observabilidad se encuentran distribuidos en 2 de los 4 cuadrantes y con leve predominancia de las unidades U1-U3 de Cipreses.

Respecto las participaciones, estas predominan en la unidad U3 de Cipreses, con un valor cercano al 80%. Con menor participación destacan la unidad U3 de Cipreses, U1 de Curillinque y las unidades U1-U2 de Isla.

9.2.8 Viñales - Celco 0,89 [Hz]

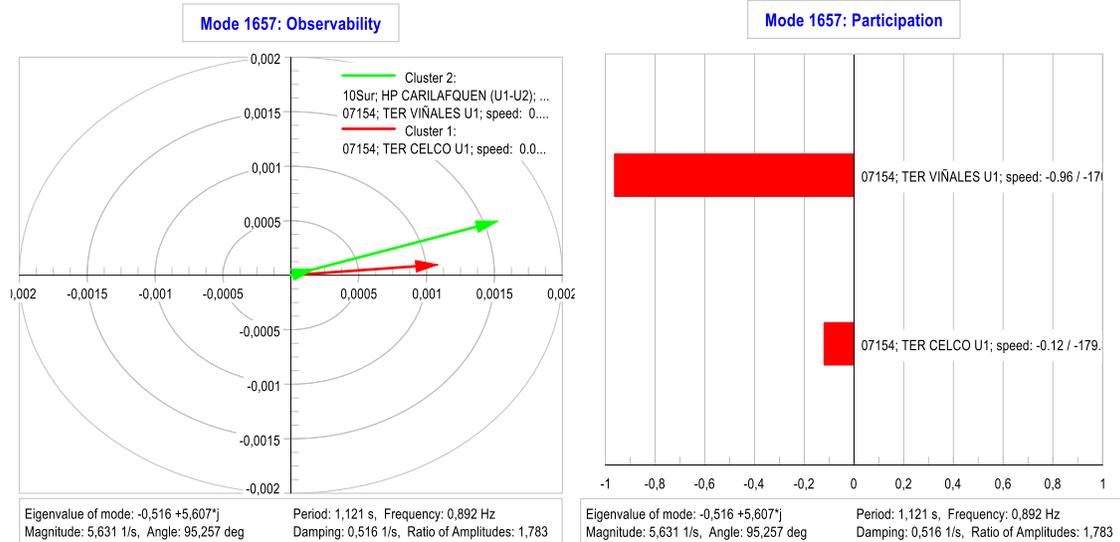


Figura 19: Modo Viñales – Celco 0,89 [Hz] (Caso Testigo E1 DA Día Mar 2024)

Tabla 20: Modo Viñales – Celco 0,89 [Hz]

Escenario	Modo	P. Real [1/s]	P. Imag [rad/s]	Mag. [1/s]	Ang. [°]	Frec. [Hz]	Periodo [s]	ξ	CTA [s]	A1/A2
E1	1657	-0,52	5,61	5,63	95,26	0,89	1,12	9,16	1,94	1,78

En este modo se aprecia que se manifiesta en unidades ubicadas en la zona del Sistema de 154 kV, predominantemente en la unidad U1 de Viñales y en menor medida en U1 de Celco. La frecuencia del modo corresponde a un carácter local y el factor de amortiguamiento alcanza 9,16% entre los escenarios analizados, lo que es bastante cercano a lo que establece la NT SyCS.

Se puede apreciar que los factores de observabilidad se encuentran distribuidos en uno de los cuatro cuadrantes y con leve predominancia de la unidad U1 de Viñales.

Respecto las participaciones, estas son predominan en la unidad U1 de Viñales, con un valor cercano al 95%. Con menor participación destaca la unidad U1 de Celco, aunque con participación baja que no supera el 20%.

9.2.9 Cipreses – Curillinque – Isla – Lautaro 1,19[Hz]

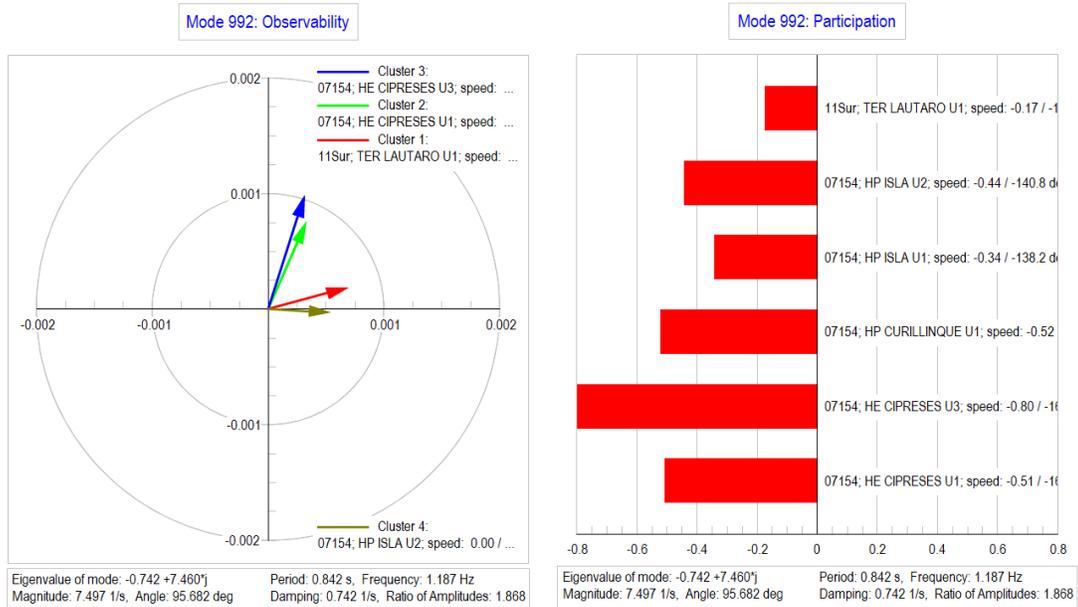


Figura 20: Modo Cipreses – Curillinque – Isla – Lautaro 1,19[Hz] (caso Testigo E4 DB noche Dic 2024).

Tabla 21: Modo Cipreses – Curillinque – Isla – Lautaro 1,19[Hz].

Escenario	Modo	P, Real [1/s]	P, Imag [rad/s]	Mag, [1/s]	Ang, [°]	Frec, [Hz]	Periodo [s]	Xi [%]	CTA [s]	A1/A2
E4	992	-0,74	7,46	7,50	95,68	1,19	0,84	9,90	1,35	1,87

Este modo se aprecia que se manifiesta en unidades ubicadas en la zona del Sistema de 154 kV, predominantemente en las unidades Cipreses, Isla pero también en Lautaro U1. La frecuencia del modo es 1,19 [Hz] correspondiente a valores de modos de un carácter más bien local. El factor de amortiguamiento es 9,9% por lo que se encuentra muy cerca de lo establecido en la NT SyCS.

Se puede apreciar que los factores de observabilidad se encuentran distribuidos en 2 de los 4 cuadrantes y con leve predominancia de las unidades U1-U3 de Cipreses.

Respecto las participaciones, estas predominan en la unidad U3 de Cipreses, con un valor cercano al 80%. Con menor participación destacan la unidad U3 de Cipreses, U1 de Curillinque y las unidades U1-U2 de Isla y Lautaro.

9.2.10 Chacayes – Sauzal – Sauzalito 1,25 [Hz]

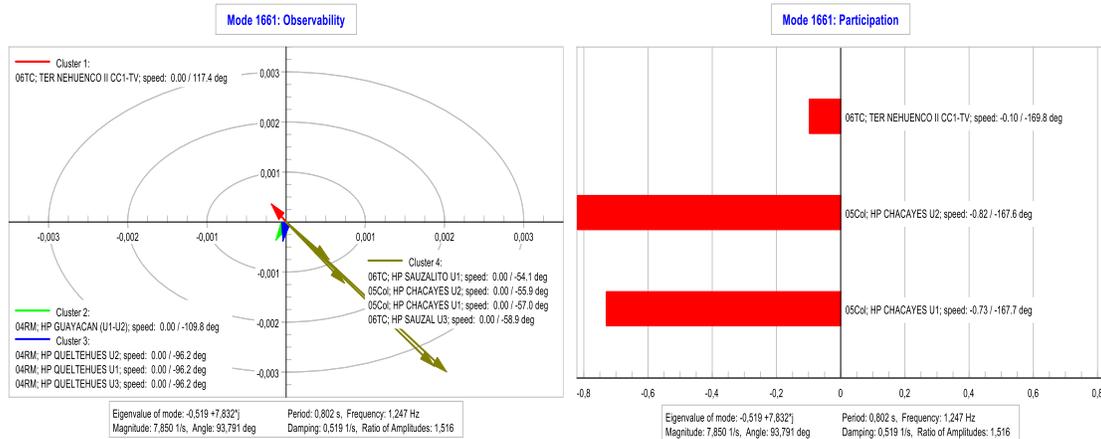


Figura 21: Modo Chacayes – Sauzal – Sauzalito 1,25 [Hz] (Caso Testigo E1 DA Día Mar 2024)

Tabla 22: Modo Chacayes 1,25 [Hz]

Escenario	Modo	P. Real [1/s]	P. Imag [rad/s]	Mag. [1/s]	Ang. [°]	Frec. [Hz]	Periodo [s]	Xi	CTA [s]	A1/A2
E1	1661	-0,52	7,83	7,85	93,79	1,25	0,80	6,61	1,93	1,52

En este modo se manifiesta de manera predominante en las Unidades 1 y 2 de la Central Chacayes. La frecuencia del modo es 1,25 correspondiente a un carácter local y el factor de amortiguamiento es de 6,61%

Se puede ver que los factores de observabilidad se encuentran distribuidos en 3 de los cuatro cuadrantes, pero estos son significativamente mayores para las Unidades 1 y 2 de la Central Chacayes, luego Sauzal U3 y Sauzalito. Se aprecia que este modo también se manifiesta levemente en unidades de Queltehues, Guayacán y Nehuenco II TV.

Respecto la participación, las Unidades 1 y 2 de la Central Chacayes, están en torno al 80% y Nehuenco II TV en torno al 10%.

9.2.11 Carena – CMPC Cordillera – Santa Marta 2,09 [Hz]

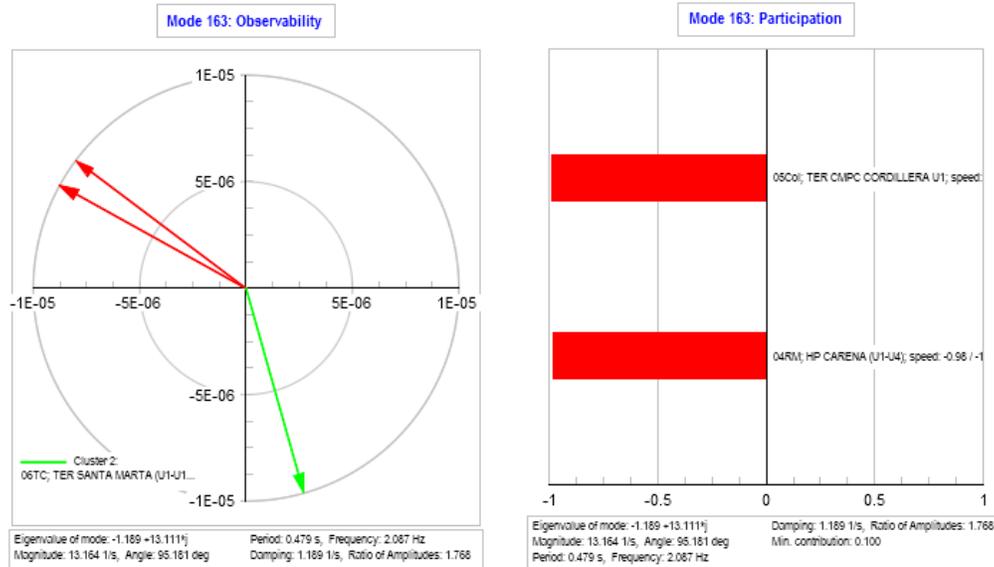


Figura 22: Modo Carena – CMPC Cordillera – Santa Marta 2,09 [Hz] (Caso Testigo E2 DA Noche Dic 2024)

Tabla 23: Modo Carena – CMPC Cordillera – Santa Marta 2,09 [Hz]

Escenario	Modo	P. Real [1/s]	P. Imag [rad/s]	Mag. [1/s]	Ang. [°]	Frec. [Hz]	Periodo [s]	Xi	CTA [s]	A1/A2
E2	163	-1,19	13,11	13,16	95,18	2,09	0,48	9,03	0,84	1,77

Este modo se aprecia que se manifiesta predominantemente en las unidades Carena, CMPC Cordillera y Santa Marta. La frecuencia del modo corresponde a un carácter más bien local y el factor de amortiguamiento es no menor a 9,03%.

Se puede apreciar que los factores de observabilidad se encuentran distribuidos en dos de los cuatro cuadrantes y donde se aprecia que oscilan en contrafase Carena – CMPC Cordillera con Sant Marta.

Respecto las participaciones, estas son predominantes en las unidades de CMPC Cordillera y Carena, con un valor cercano al 100%.

9.3 Modos Locales Intraplanta

A continuación, se caracterizan los modos de carácter local intraplanta.

9.3.1 Alfalfal 1,52 [Hz]

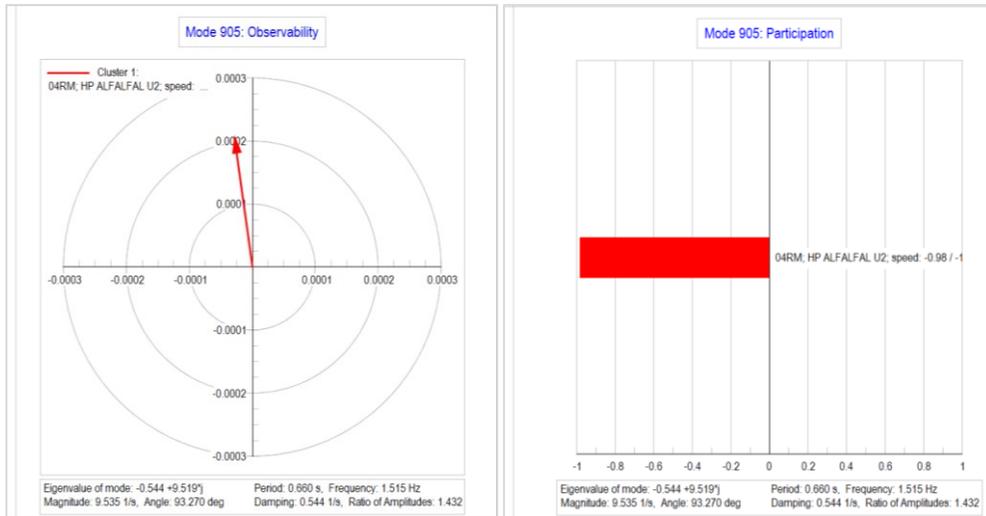


Figura 23: Modo Alfalfal 1,5 [Hz] (Caso Testigo E4 DB Noche Dic 2024)

Tabla 24: Modo Alfalfal 1,5 [Hz]

Escenario	Modo	P. Real [1/s]	P. Imag [rad/s]	Mag. [1/s]	Ang. [°]	Frec. [Hz]	Periodo [s]	Xi	CTA [s]	A1/A2
E4	905	-0.544	9.519	9.535	93.270	1.515	0.660	5.704	1.839	1.432

En este modo se aprecia que se manifiesta en todas las unidades (U1-U10) de la central Santa Marta, con una frecuencia de 1,12 [HZ], lo cual corresponde a un modo local y tiene un factor de amortiguamiento de 3,85%.

Respecto al factor de observabilidad, se presenta exclusivamente la central Santa Marta (U1-U10), en el cuarto cuadrante.

En el gráfico de participaciones, se observa que solo hay participación de la central Santa Marta(U1-U10) con un 100%.

9.3.2 Los Molles 2,11 [Hz]

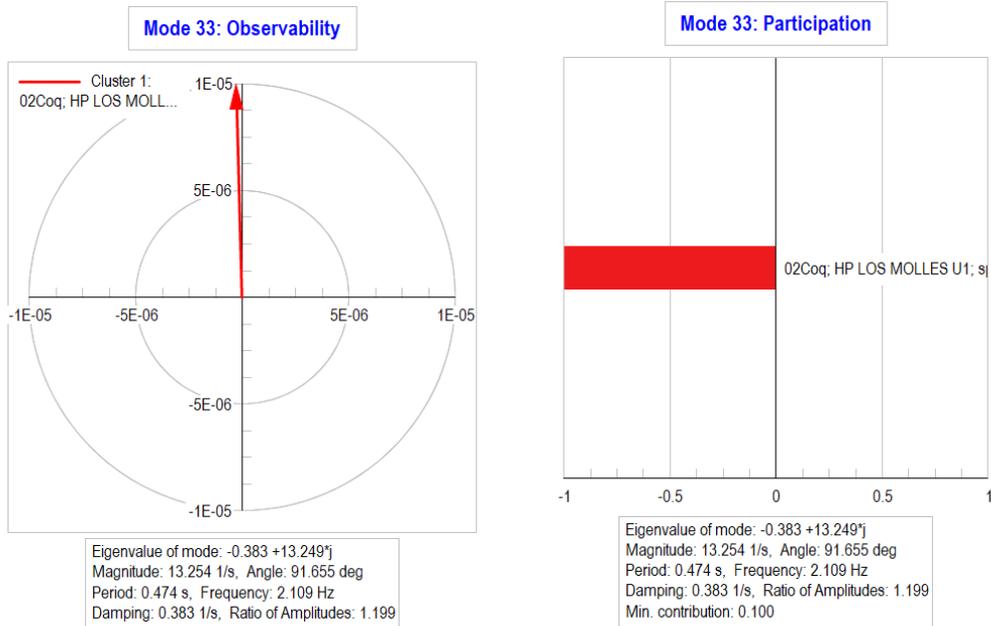


Figura 24: Modo Los Molles 2,11 [Hz] (Caso Testigo E3 DB Día Abr 2024)

Tabla 25: Modo Los Molles 2,11 [Hz]

Escenario	Modo	P. Real [1/s]	P. Imag [rad/s]	Mag. [1/s]	Ang. [°]	Frec. [Hz]	Periodo [s]	Xi	CTA [s]	A1/A2
E1	1539	-0,45	14,00	14,00	91,83	2,23	0,45	3,20	2,23	1,22
E2	29	-0,36	11,56	11,57	91,8	1,84	0,54	3,14	2,75	1,22
E2	117	-0,98	18,76	18,78	93,00	2,99	0,33	5,24	1,02	1,39
E3	33	-0,38	13,25	13,25	91,65	2,11	0,47	2,89	2,61	1,20
E4	700	-0,35	11,17	11,18	91,77	1,78	0,56	3,09	2,89	1,22
E4	1079	-0,97	18,52	18,55	93,01	2,95	0,34	5,25	1,03	1,39

Se puede apreciar que este modo se manifiesta en la unidad 1 de Central Los Molles, cuya frecuencia corresponde a un modo de carácter local, y su factor de amortiguamiento es de 2,89%. Por lo tanto también los casos en Red N-1 corresponden a modos críticos, cuyo detalle se observa en los anexos de este informe.

Los factores de observabilidad se encuentran distribuidos en solo uno de los cuatro cuadrantes, donde predomina la unidad 1 de la central Los Molles.

De acuerdo con el gráfico de las participaciones, estas son exclusivas de la unidad 1 de la central Los Molles, con un 100% de participación.

9.3.3 Machicura 1,15[Hz]

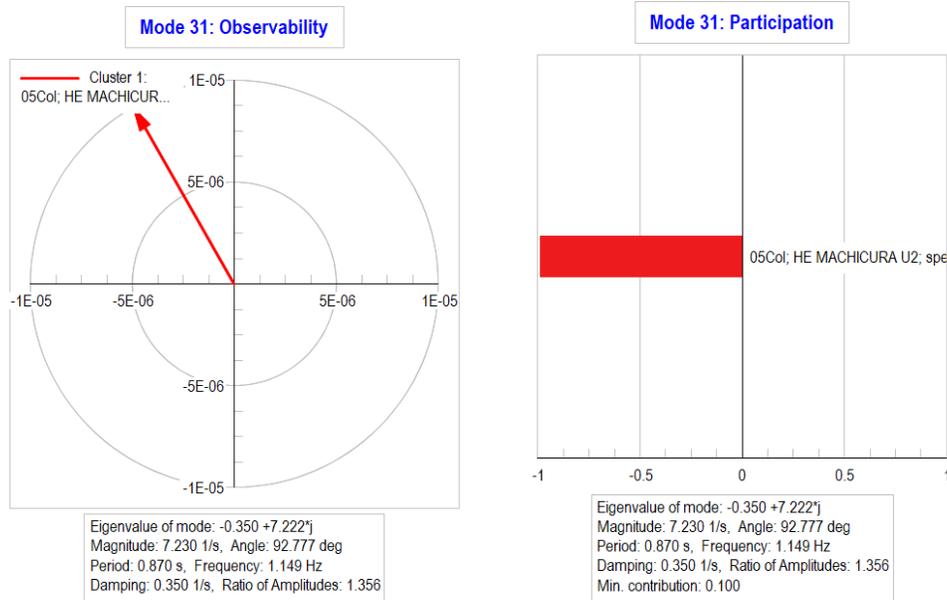


Figura 25: Modo Machicura 1,15 [Hz] (Caso Testigo E3 DB Día Abr 2024)

Tabla 19: Modo Machicura 1,15 [Hz]

Escenario	Modo	P. Real [1/s]	P. Imag [rad/s]	Mag. [1/s]	Ang. [°]	Frec. [Hz]	Periodo [s]	Xi	CTA [s]	A1/A2
E3	31	-0,35	7,22	7,23	92,78	1,15	0,87	4,84	2,86	1,36
E2	27	-0,36	7,09	7,1	92,88	1,13	0,89	5,03	2,8	1,37

En este modo se aprecia que se presenta exclusivamente en la unidad 2 de la centra Machicura, cuya frecuencia corresponde a un modo local y su factor de amortiguamiento es de 4,84%. Por lo tanto también los casos en Red N-1 corresponden a modos críticos, cuyo detalle se observa en los anexos de este informe

Con respecto al factor de observabilidad se encuentra solo en 1 de los 4 cuadrantes, y corresponde solo a la Unidad 2 de la central Machicura.

En el gráfico de las participaciones, se puede apreciar que solo existe participación de la unidad 2 de central Machicura con un 100%.

9.3.4 San Ignacio 1,44 [Hz]

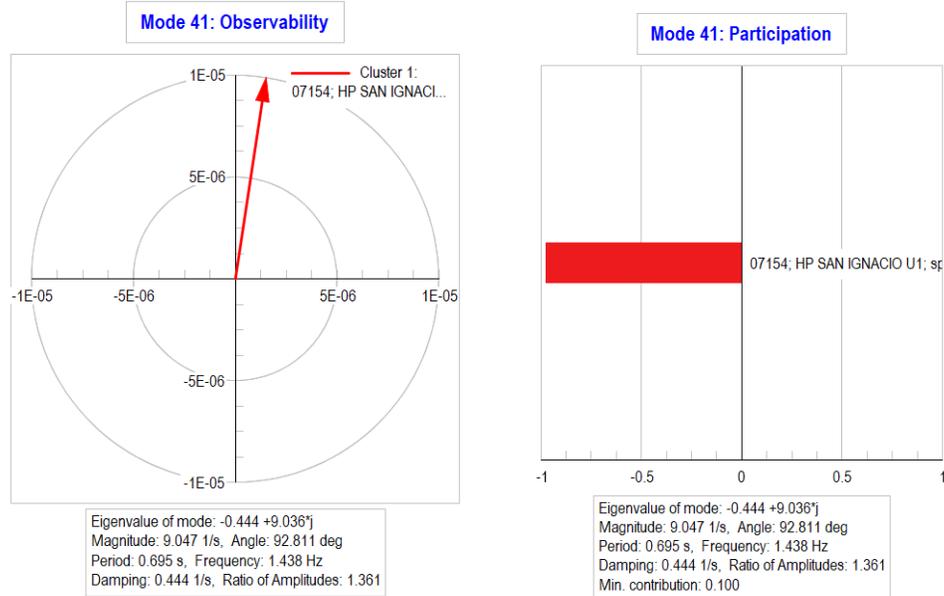


Figura 26: Modo San Ignacio 1,44 [Hz] (Caso Testigo E3 DB Día Abr 2024)

Tabla 26: Modo San Ignacio 1,44 [Hz]

Escenario	Modo	P. Real [1/s]	P. Imag [rad/s]	Mag. [1/s]	Ang. [°]	Frec. [Hz]	Periodo [s]	Xi	CTA [s]	A1/A2
E1	1543	-0,45	8,69	8,70	92,97	1,38	0,72	5,18	2,22	1,39
E3	41	-0,44	9,04	9,05	92,81	1,44	0,70	4,90	2,25	1,36
E2	45	-0,46	8,96	8,97	92,95	1,43	0,70	5,15	2,17	1,38
E4	954	-0,64	8,62	8,64	94,23	1,37	0,73	7,38	1,57	1,59

En este modo se manifiesta principalmente en la unidad U1 Central San Ignacio. La frecuencia del modo corresponde a un carácter más bien local y el factor de amortiguamiento de 4,90%. En el caso E3 también resulta ser modo crítico en los casos Red N-1 por tener amortiguamiento bajo 5%.

Se puede ver que los factores de observabilidad se encuentran distribuidos en 1 de los 4 cuadrantes, predominan la unidad U1 de la Central San Ignacio.

Respecto la participación, es predominante de la unidad U1 de la Central en cuestión, aproximándose al 100%.

9.3.5 Carilafquén 0,86 [Hz]

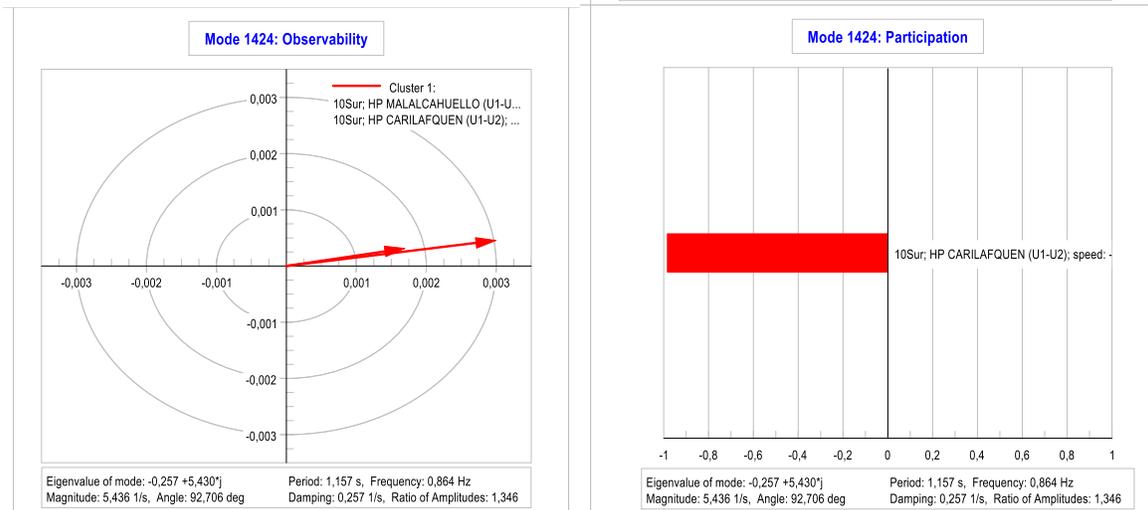


Figura 27: Modo Carilafquén 0,86 [Hz] (Caso Testigo E1 DA Día Mar 2024)

Tabla 27: Modo Carilafquén 0,86 [Hz]

Escenario	Modo	P. Real [1/s]	P. Imag [rad/s]	Mag. [1/s]	Ang. [°]	Frec. [Hz]	Periodo [s]	Xi	CTA [s]	A1/A2
E1	1424	-0,26	5,43	5,43	92,71	0,86	1,16	4,72	3,90	1,35
E3	19	-0,26	5,36	5,37	92,82	0,85	1,17	4,92	3,79	1,36
E2	25	-0,32	5,74	5,75	93,22	0,91	1,09	5,62	3,10	1,42
E4	677	-0,31	5,79	5,80	93,10	0,92	1,09	5,41	3,19	1,41

En este modo se manifiesta principalmente en la unidad U1-U2 Central Carilafquén. La frecuencia del modo corresponde a un carácter más bien local y el factor de amortiguamiento de 4,72%, considerando el menor alcanzado en todos los escenarios analizados. EN los casos Red N-1 también resultan corresponder a modos críticos por tener amortiguamiento bajo 5%.

Se puede ver que los factores de observabilidad se encuentran distribuidos en 1 de los 4 cuadrantes, predominan las unidades U1-U2 Central Carilafquén y Malalcahuello U1-U2.

Respecto la participación, es predominante de la unidad U1-U2 Central Carilafquén, aproximándose al 100%.

9.3.6 Cipreses 1,25 [Hz]

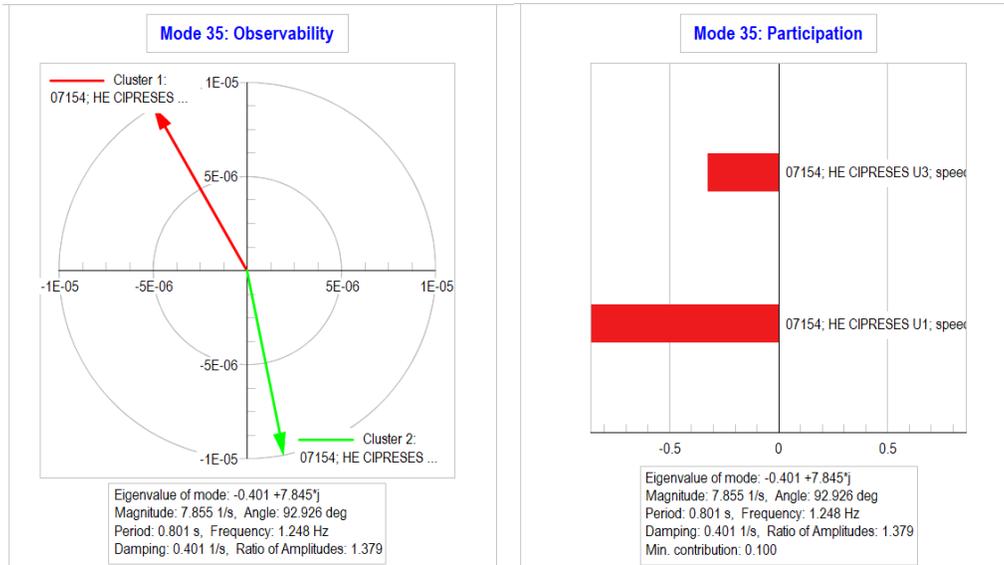


Figura 28: Modo Cipreses 1,25 [Hz] (Caso Testigo E3 DB Día Abr 2024)

Tabla 28: Modo Cipreses 1,25 [Hz]

Escenario	Modo	P. Real [1/s]	P. Imag [rad/s]	Mag. [1/s]	Ang. [°]	Frec. [Hz]	Periodo [s]	ξ	CTA [s]	A1/A2
E2	57	-0,55	8,34	8,36	93,8	1,33	0,75	6,62	1,81	1,52
E2	49	-0,49	7,15	7,17	93,93	1,14	0,88	6,86	2,03	1,54
E3	35	-0,40	7,84	7,85	92,93	1,25	0,80	5,11	2,49	1,38
E4	744	-0,43	8,39	8,40	92,95	1,34	0,75	5,13	2,31	1,38

En este modo, se aprecia que se manifiesta de manera predominante en las unidades U1 y U3 de la Central Cipreses, con una frecuencia de 1,25 [Hz], el cual corresponde a un modo local con un factor de amortiguamiento de 5,11%.

Respecto al factor de observabilidad, este se presenta solo en dos de los cuatro cuadrantes y corresponde a las unidades U1 y U3 de la Central Cipreses.

En el gráfico de participaciones, se observa que solo hay participación de las unidades U1 y U3 de la Central Cipreses, con una participación predominante de la unidad U1 de dicha central.

9.3.7 Convento Viejo 2,47 [Hz]

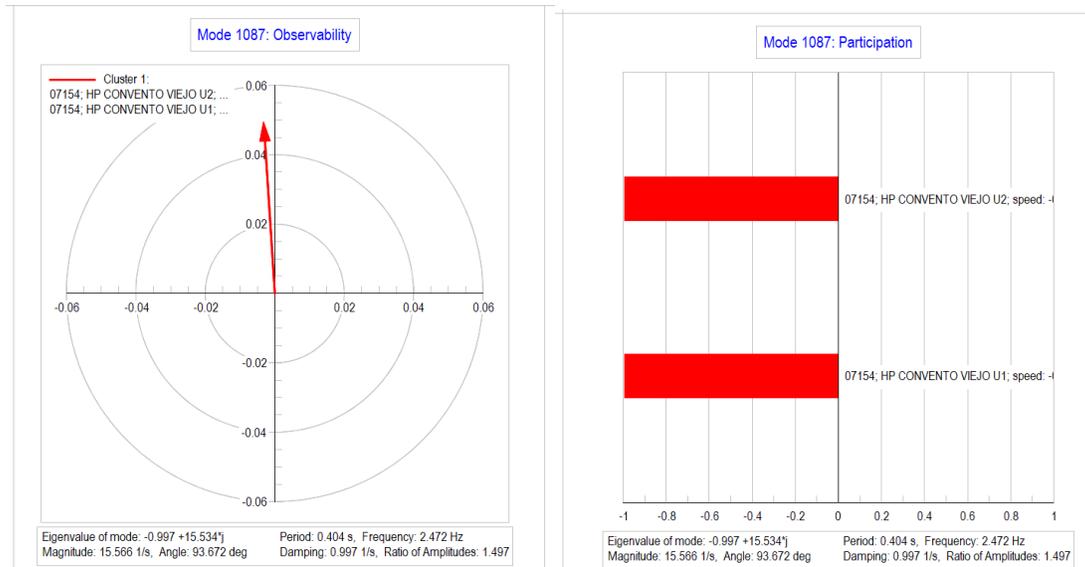


Figura 29: Modo Convento Viejo 2,47 [Hz] (Caso Testigo E4 DB Noche Dic 2024)

Tabla 29: Modo Convento Viejo 2,47 [Hz]

Escenario	Modo	P. Real [1/s]	P. Imag [rad/s]	Mag. [1/s]	Ang. [°]	Frec. [Hz]	Periodo [s]	ξ	CTA [s]	A1/A2
E1	2106	-1,08	16,18	16,22	93,83	2,58	0,39	6,67	0,93	1,52
E2	135	-1,03	15,72	15,75	93,76	2,50	0,40	6,55	0,97	1,51
E2	165	-1,21	17,19	17,23	94,03	2,74	0,37	7,04	0,82	1,56
E3	107	-1,08	16,26	16,30	93,80	2,59	0,39	6,62	0,93	1,52
E4	1087	-0,10	15,53	15,57	93,67	2,47	0,40	6,41	1,00	1,50
E4	1208	-1,17	16,95	16,99	93,95	2,70	0,37	6,90	0,85	1,54

En este modo se manifiesta principalmente en las unidades U1 y U2 de la Central Convento viejo. La frecuencia del modo corresponde a un carácter más bien local y el factor de amortiguamiento de 6,41%, considerando el menor alcanzado en todos los escenarios analizados.

Se puede ver que los factores de observabilidad se encuentran distribuidos en 1 de los 4 cuadrantes, predominando las unidades U1 y U2 de la Central Convento Viejo.

Respecto la participación, predominan las unidades U1 y U2 de la Central, aproximándose al 100% cada una.

9.3.8 Lautaro 1,64 [Hz]

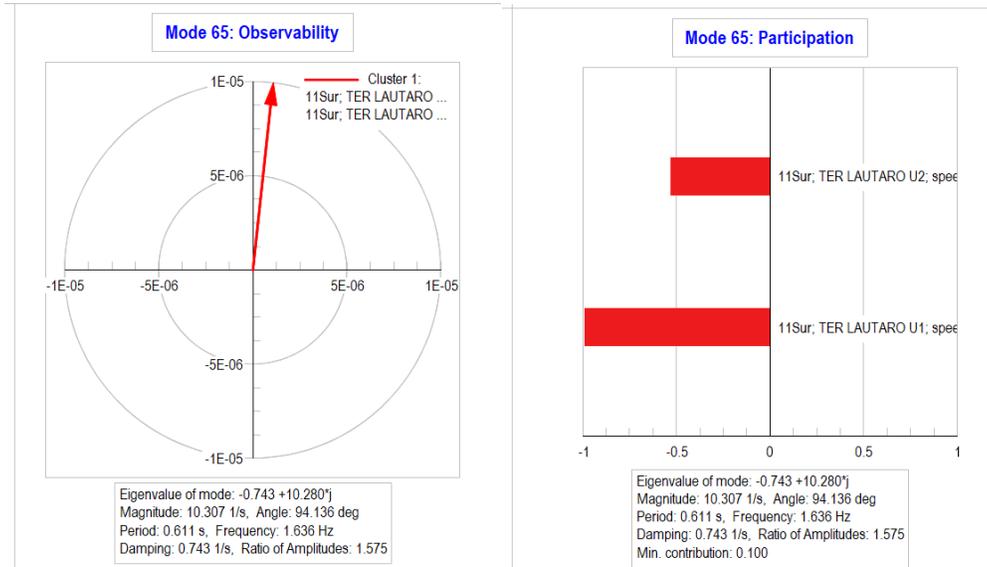


Figura 30: Modo Lautaro 1,64 [Hz] (Caso Testigo E3 DB Día Abr 2024)

Tabla 30: Modo Lautaro 1,64 [Hz]

Escenario	Modo	P. Real [1/s]	P. Imag [rad/s]	Mag. [1/s]	Ang. [°]	Frec. [Hz]	Periodo [s]	Xi	CTA [s]	A1/A2
E1	1858	-0,87	9,13	9,17	95,43	1,45	0,69	9,46	1,15	1,82
E2	67	-0,68	7,47	7,5	95,18	1,19	0,84	9,02	1,48	1,77
E3	65	-0,74	10,28	10,31	94,14	1,64	0,61	7,21	1,35	1,58
E3	99	-1,06	12,01	12,05	95,05	1,91	0,52	8,81	0,94	1,74
E4	962	-0,66	7,42	7,45	95,10	1,18	0,85	8,88	1,51	1,75

En este modo se manifiesta principalmente en las unidades U1 y U2 de la Central Lautaro y de manera predominante en la unidad U1 de dicha central. La frecuencia del modo corresponde a un carácter más bien local y el factor de amortiguamiento de 7,21%, considerando el menor alcanzado en todos los escenarios analizados.

Se puede ver que los factores de observabilidad se encuentran distribuidos en 1 de los 4 cuadrantes, predominan las unidades U1 y U2 de la Central Lautaro.

Respecto la participación, predomina la unidad U1 de la Central, aproximándose al 100%. La unidad U2 supera ligeramente el 50% de participación.

9.3.9 CMPC Pacífico 1,71 [Hz]

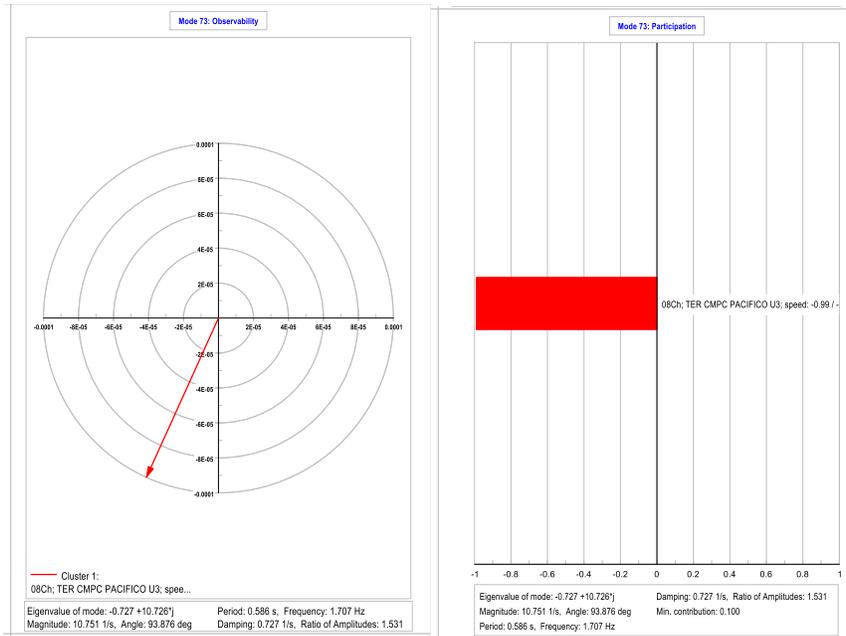


Figura 31: Modo CMPC Pacífico 1,71 [Hz] (Caso Testigo E2 DA Noche Dic 2024)

Tabla 31: Modo CMPC Pacífico 1,71 [Hz]

Escenario	Modo	P. Real [1/s]	P. Imag [rad/s]	Mag. [1/s]	Ang. [°]	Frec. [Hz]	Periodo [s]	ξ	CTA [s]	A1/A2
E2	73	-0,73	10,73	10,75	93,88	1,71	0,59	6,76	1,38	1,53
E3	67	-0,74	9,16	9,19	94,64	1,46	0,69	8,09	1,34	1,67

En este modo se manifiesta principalmente en la unidad U3 de la Central CMPC Pacífico. La frecuencia del modo corresponde a un carácter más bien local y el factor de amortiguamiento de 6,76%, considerando el menor alcanzado en todos los escenarios analizados.

Se puede ver que los factores de observabilidad se encuentran distribuidos en 1 de los 4 cuadrantes, predominan la unidad U3 de la Central CMPC Pacífico.

Respecto la participación, es predominante en la unidad U3 de la Central en cuestión, aproximándose al 100%.

9.3.10 Santa Marta 1,12 [Hz]

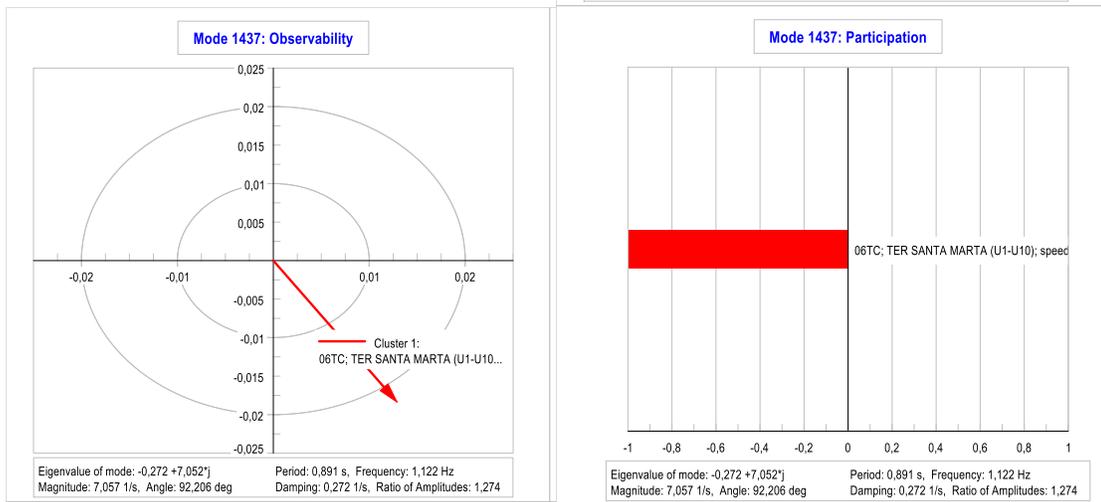


Figura 32: Modo Santa Marta 1,12 [Hz] (Caso Testigo E1 DA Día Mar 2024)

Tabla 32: Modo Santa Marta 1,12 [Hz]

Escenario	Modo	P. Real [1/s]	P. Imag [rad/s]	Mag. [1/s]	Ang. [°]	Frec. [Hz]	Periodo [s]	Xi	CTA [s]	A1/A2
E1	1437	-0,27	7,05	7,06	92,21	1,12	0,89	3,85	3,68	1,27
E2	141	-1,07	12,97	13,01	94,7	2,06	0,48	8,20	0,94	1,68
E3	101	-1,07	13,00	13,04	94,68	2,07	0,48	8,17	0,94	1,67
E4	1171	-1,06	12,91	12,95	94,69	2,05	0,49	8,17	0,95	1,67

En este modo se aprecia que se manifiesta en todas las unidades (U1-U10) de la central Santa Marta, con una frecuencia de 1,12 [HZ], lo cual corresponde a un modo local y tiene un factor de amortiguamiento de 3,85%.

Respecto al factor de observabilidad, se presenta exclusivamente la central Santa Marta (U1-U10), en el cuarto cuadrante.

En el gráfico de participaciones, se observa que solo hay participación de la central Santa Marta(U1-U10) con un 100%.

9.3.11 Mapa 2,72 [Hz]

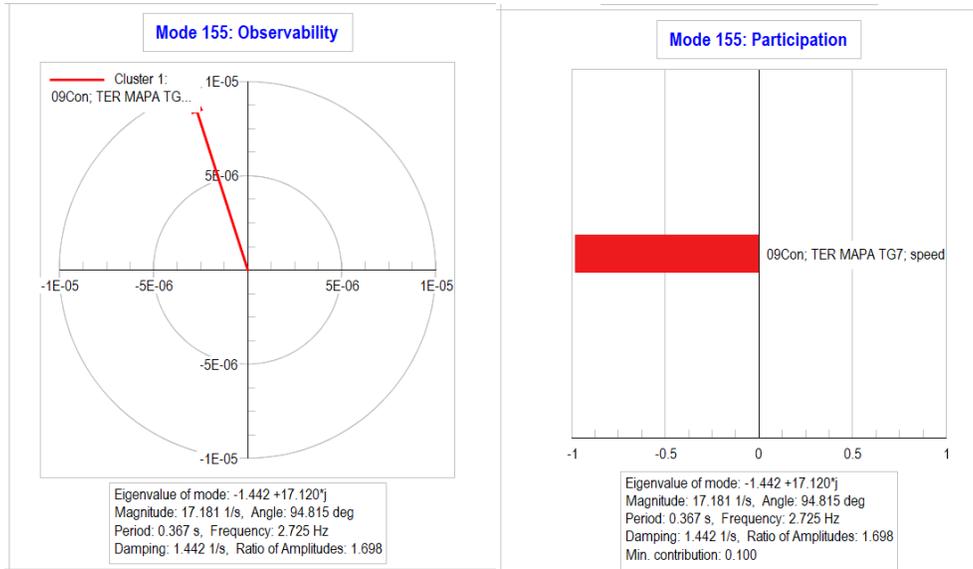


Figura 33: Modo Santa Mapa 2,72 [Hz] (Caso Testigo E3 DB Día Abr 2024)

Tabla 33: Modo Mapa 2,72 [Hz]

Escenario	Modo	P. Real [1/s]	P. Imag [rad/s]	Mag. [1/s]	Ang. [°]	Frec. [Hz]	Periodo [s]	Xi	CTA [s]	A1/A2
E3	155	-1,44	17,12	17,18	94,81	2,72	0,37	8,39	0,69	1.70

En este modo se manifiesta principalmente en la unidad TG7 de la Central TER Mapa. La frecuencia del modo corresponde a un carácter más bien local y el factor de amortiguamiento de 8,39%, considerando el menor alcanzado en todos los escenarios analizados.

Se puede ver que los factores de observabilidad se encuentran distribuidos en 1 de los 4 cuadrantes, predominan la unidad TG7 de la Central TER Mapa.

Respecto la participación, es predominante en la unidad TG7 de la Central en cuestión, aproximándose al 100%.

9.3.12 Los Quilos 1,71[Hz]

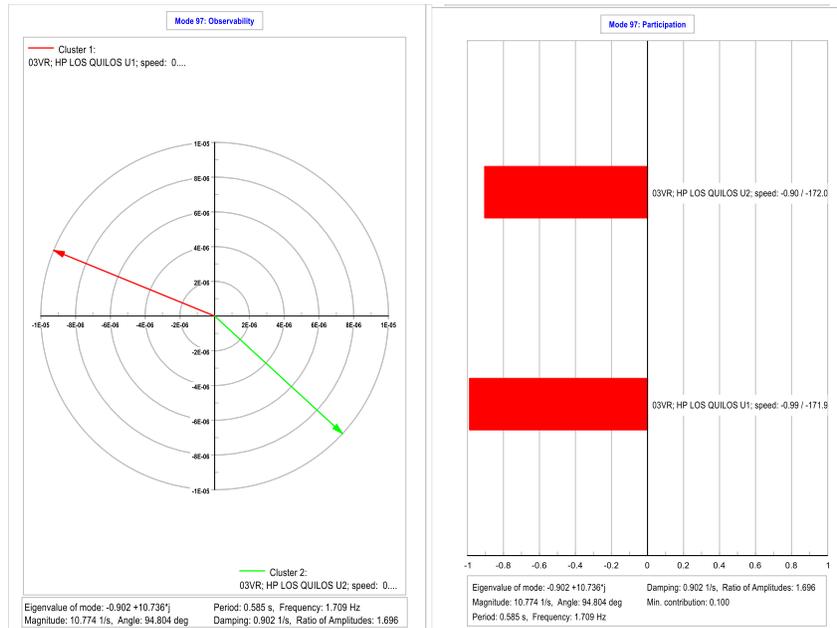


Figura 34: Modo Los Quilos 1,71 [Hz] (Caso Testigo E2 DA Noche Dic 2024)

Tabla 34: Modo Los Quilos 1,71 [Hz]

Escenario	Modo	P. Real [1/s]	P. Imag [rad/s]	Mag. [1/s]	Ang. [°]	Frec. [Hz]	Periodo [s]	Xi	CTA [s]	A1/A2
E1	1909	-0,96	10,27	10,32	95,37	1,63	0,61	9,35	1,04	1,80
E2	97	-0,90	10,74	10,77	94,8	1,71	0,59	8,37	1,11	1,7
E2	103	-0,93	10,43	10,47	95,11	1,66	0,60	8,90	1,07	1,75
E3	83	-0,87	10,33	10,37	94,84	1,64	0,61	8,43	1,14	1,70
E3	81	-0,87	10,15	10,19	94,89	1,62	0,62	8,52	1,15	1,71
E4	1055	-0,92	10,92	10,96	94,83	1,74	0,58	8,42	1,08	1,70
E4	1059	-0,93	10,66	10,70	94,98	1,70	0,59	8,68	1,08	1,73

En este modo se manifiesta principalmente en las unidades U1 y U2 de la Central Los Quilos. La frecuencia del modo corresponde a un carácter más bien local y el factor de amortiguamiento de 8,37%, considerando el menor alcanzado en todos los escenarios analizados.

Se puede ver que los factores de observabilidad se encuentran distribuidos en 2 de los 4 cuadrantes, predominan la unidad U1 y U2 de la Central Los Quilos.

Respecto la participación, predomina las unidades U1 y U2 de dicha Central, aproximándose al 100%.

9.3.13 Nueva Aldea 0,77 [Hz]

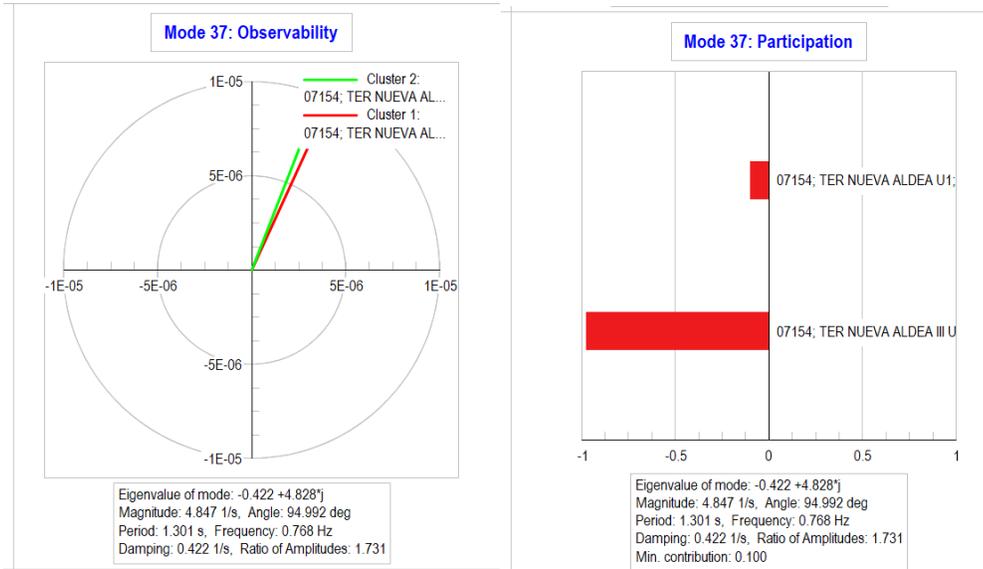


Figura 35: Modo Nueva Aldea 0,77 [Hz] (Caso Testigo E3 DB Día Abr 2024)

Tabla 35: Modo Nueva Aldea 0,77 [Hz]

Escenario	Modo	P. Real [1/s]	P. Imag [rad/s]	Mag. [1/s]	Ang. [°]	Frec. [Hz]	Periodo [s]	Xi	CTA [s]	A1/A2
E1	1537	-0,45	4,91	4,93	95,21	0,78	1,28	9,07	2,24	1,77
E2	43	-0,45	4,93	4,95	95,16	0,78	1,27	9,00	2,24	1,76
E3	37	-0,42	4,83	4,85	94,99	0,77	1,30	8,70	2,37	1,73
E4	771	-0,47	4,98	5,00	95,36	0,79	1,26	9,34	2,14	1,80

En este modo se manifiesta principalmente en la unidad III de la Central Nueva Aldea, y en menor medida en la unidad I de la misma central. La frecuencia del modo corresponde a un carácter más bien local y el factor de amortiguamiento de 8,70%, considerando el menor alcanzado en todos los escenarios analizados.

Se puede ver que los factores de observabilidad se encuentran distribuidos en 1 de los 4 cuadrantes, predominan las unidades I y III de la Central Nueva Aldea.

Respecto la participación, predomina la unidad III de la citada Central, aproximándose al 100%, la unidad I participa con menos del 5%.

9.3.14 Pilmaiquén 1,72 [Hz]

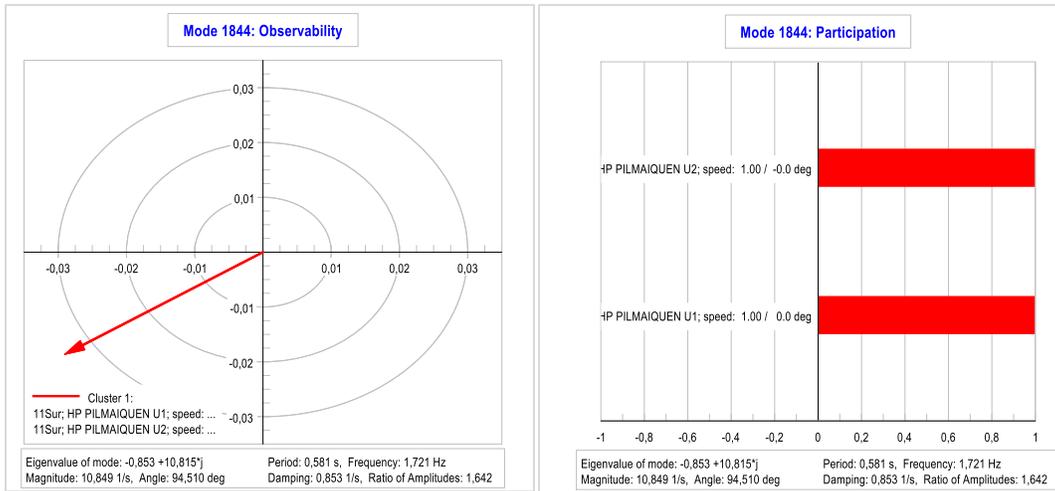


Figura 36: Modo Pilmaiquén 1,72 Hz) (Caso Testigo E1 DA Día Mar 2024)

Tabla 36: Modo Pilmaiquén 1,72 [Hz]

Escenario	Modo	P. Real [1/s]	P. Imag [rad/s]	Mag. [1/s]	Ang. [°]	Frec. [Hz]	Periodo [s]	Xi	CTA [s]	A1/A2
E1	1844	-0,85	10,82	10,85	94,51	1,72	0,58	7,86	1,17	1,64
E1	1895	-0,93	11,14	11,18	94,78	1,77	0,56	8,33	1,07	1,69
E2	91	-0,89	10,94	10,98	94,63	1,74	0,57	8,07	1,13	1,66
E2	95	-0,89	10,88	10,92	94,69	1,73	0,58	8,17	1,12	1,67
E2	93	-0,89	10,63	10,67	94,77	1,69	0,59	8,31	1,13	1,69
E2	77	-0,76	8,32	8,36	95,22	1,32	0,75	9,09	1,32	1,77
E3	89	-0,94	10,39	10,43	95,17	1,65	0,60	9,00	1,07	1,76
E4	1042	-0,90	11,01	11,05	94,66	1,75	0,57	8,13	1,11	1,67
E4	1047	-0,91	10,95	10,99	94,73	1,74	0,57	8,24	1,10	1,68
E4	1057	-0,93	10,69	10,73	94,96	1,70	0,59	8,65	1,08	1,73

En este modo se visualiza que se presenta en las unidades 1 y 2 de la central Pilmaiquén, con una frecuencia de 1,72 [Hz], corresponde a un modo local y su factor de amortiguamiento de 7,86%.

Respecto a los factores de observabilidad, estos se distribuyen en 1 de los 4 cuadrantes, predominando las unidades U1 y U2 de la central Pilmaiquén.

Se puede apreciar según los factores de participación que las unidades U1 y U2 de la central Pilmaiquén tienen un 100% de participación.

9.3.15 Canutillar 1,79 [Hz]

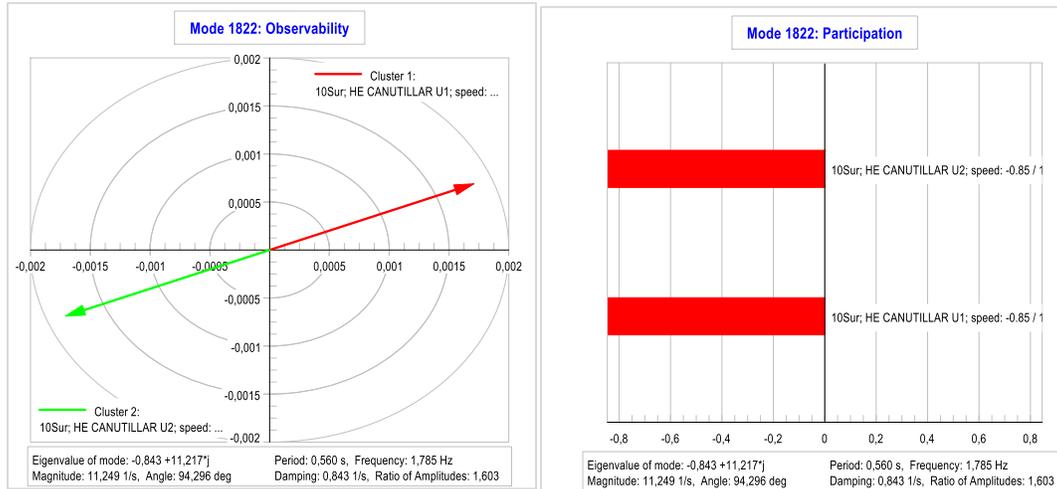


Figura 37: Modo Canutillar 1,79 [Hz] (Caso Testigo E1 DA Día Mar 2024)

Tabla 37: Modo Canutillar 1,79 [Hz]

Escenario	Modo	P. Real [1/s]	P. Imag [rad/s]	Mag. [1/s]	Ang. [°]	Frec. [Hz]	Periodo [s]	ξ	CTA [s]	A1/A2
E1	1822	-0,84	11,22	11,25	94,30	1,79	0,56	7,49	1,19	1,60
E3	113	-1,12	11,30	11,36	95,64	1,80	0,56	9,83	0,90	1,86
E2	101	-0,93	11,36	11,40	94,69	1,81	0,55	8,17	1,07	1,67

En este modo se aprecia que se manifiesta únicamente en las unidades U1 y U2 de la Central Canutillar cuya frecuencia corresponde a un modo de carácter local, y su factor de amortiguamiento es de 7,49%.

Respecto al factor de observabilidad, este se presenta solo en 2 de los cuatro cuadrantes y corresponde a las unidades U1 y U2 de la central Canutillar.

En el gráfico de participaciones, se observa que solo hay participación de la unidad U1 y U2 de la central Canutillar, ambas unidades con un 85%.

9.3.16 Angostura 0,76 [Hz]

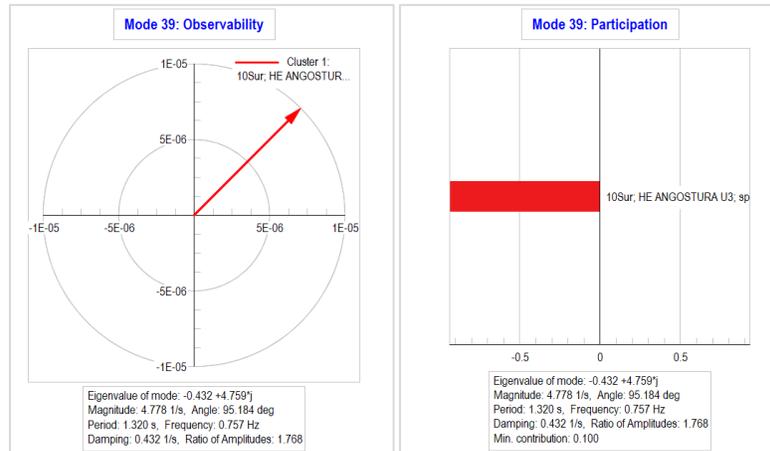


Figura 38: Modo Angostura 0,76 [Hz] (Caso Testigo E3 DB Día Abr 2024)

Tabla 38: Modo Angostura 0,76 [Hz]

Escenario	Modo	P. Real [1/s]	P. Imag [rad/s]	Mag. [1/s]	Ang. [°]	Frec. [Hz]	Periodo [s]	Xi	CTA [s]	A1/A2
E3	39	-0,43	4,76	4,78	95,18	0,76	1,32	9,04	2,32	1,77

En este modo se aprecia que se manifiesta únicamente en la U3 de la Central Angostura con una frecuencia de 0,76 [HZ], lo cual corresponde a un modo local y tiene un factor de amortiguamiento de 9,04%.

Respecto al factor de observabilidad, este se presenta solo en 1 de los 4 cuadrantes y corresponde solo a la Unidad 3 de la Central Angostura.

En el gráfico de participaciones, se observa que solo hay participación de la unidad U3 de la central Angostura, con un 95%

9.3.17 Ancoa 1,28 [HZ]

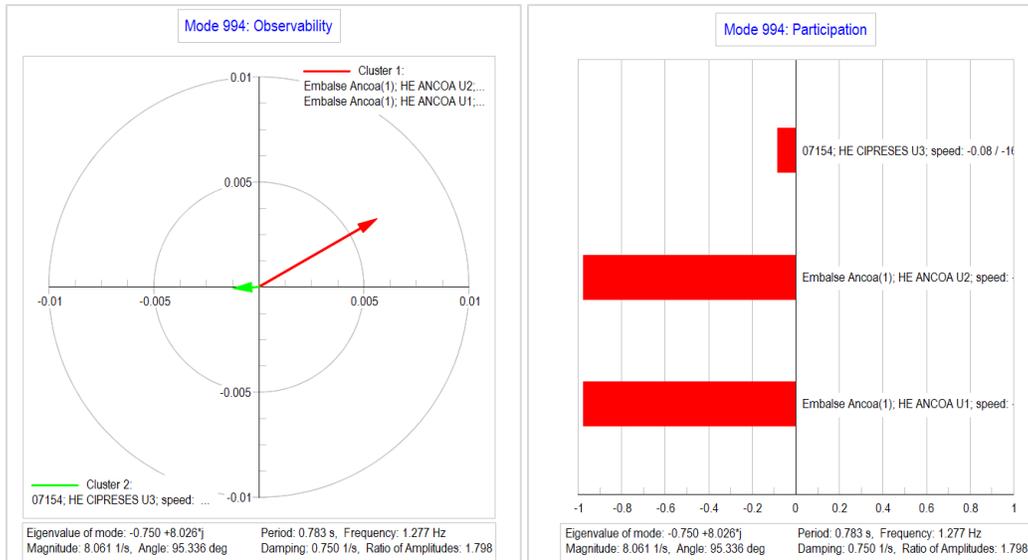


Figura 39: Modo Ancoa 1,28 [Hz] (Caso Testigo E4 DB Día Sept 2024)

Tabla 39: Modo Ancoa 1,28 [Hz]

Escenario	Modo	P. Real [1/s]	P. Imag [rad/s]	Mag. [1/s]	Ang. [°]	Frec. [Hz]	Periodo [s]	Xi	CTA [s]	A1/A2
E2	83	-0,82	8,18	8,22	95,71	1,30	0,77	9,94	1,22	1,87
E3	63	-0,74	7,80	7,84	95,42	1,24	0,81	9,45	1,35	1,82
E4	994	-0,75	8,03	8,06	95,34	1,28	0,78	9,30	1,33	1,80

En este modo, se aprecia que se manifiesta de manera predominante en las unidades U1 y U2 de la Central Ancoa, con una frecuencia de 1,28 [Hz], el cual corresponde a un modo local con un factor de amortiguamiento de 9,3%.

Respecto al factor de observabilidad, este se presenta significativamente solo en uno de los cuatro cuadrantes y corresponde a las unidades U1 y U2 de la Central Ancoa.

En el gráfico de participaciones, se observa que solo hay participación de las unidades U1 y U2 de la Central Ancoa, con una participación de 99% de ambas unidades.

9.3.18 Energía Pacífico 1,39 [Hz]

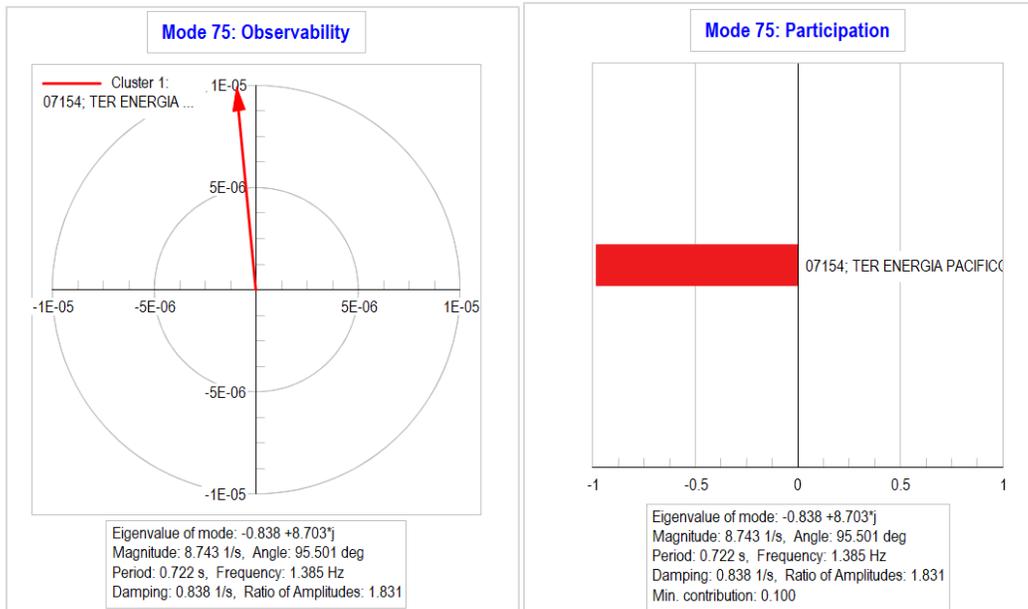


Figura 40: Modo Energía Pacífico 1,39 [Hz] (Caso Testigo E3 DB Día Abr 2024)

Tabla 40: Modo Energía Pacífico 1,39 [Hz]

Escenario	Modo	P. Real [1/s]	P. Imag [rad/s]	Mag. [1/s]	Ang. [°]	Frec. [Hz]	Periodo [s]	Xi	CTA [s]	A1/A2
E1	1853	-0,87	8,79	8,84	95,62	1,40	0,72	9,79	1,16	1,86
E3	75	-0,84	8,70	8,74	95,50	1,39	0,72	9,59	1,19	1,83

En este modo se manifiesta en las unidades U1 de la Central Energía Pacífico, con una frecuencia de 1,39 [HZ], lo cual corresponde a un modo local con un factor de amortiguamiento alrededor de 9%.

Respecto al factor de observabilidad, este se presenta solo en 1 de los 4 cuadrantes, donde predomina notoriamente la central U1 Energía Pacífico.

Con respecto a las participaciones, se observa que solo hay participación dicha unidad alcanzando valor cercano al 100%.

9.3.19 Palmucho 1,90 [Hz]

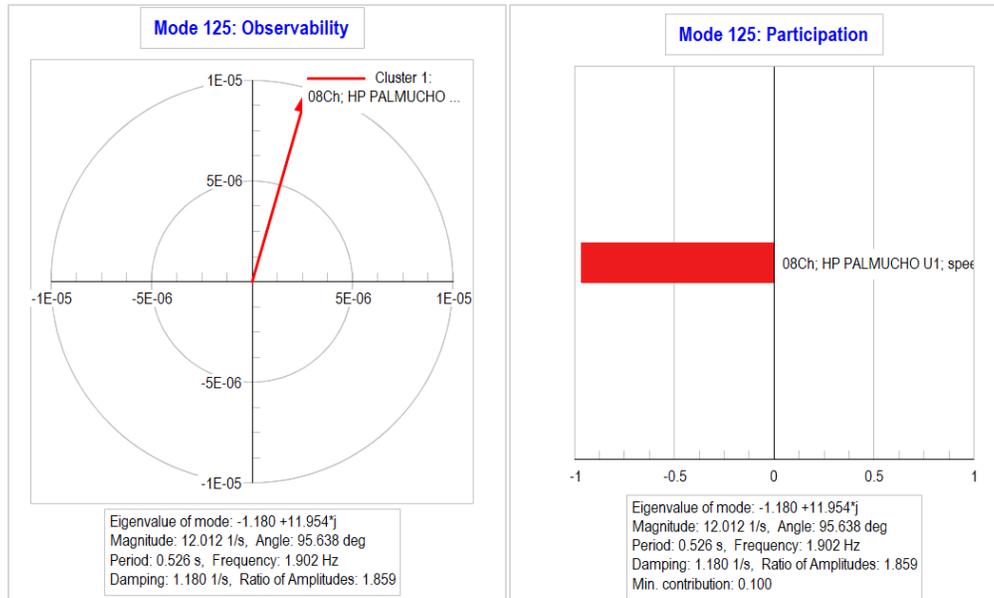


Figura 41: Modo Palmucho 1,9 [Hz] (Caso Testigo E3 DB Día Abr 2024)

Tabla 41: Modo Palmucho 1,9 [Hz]

Escenario	Modo	P. Real [1/s]	P. Imag [rad/s]	Mag. [1/s]	Ang. [°]	Frec. [Hz]	Periodo [s]	Xi	CTA [s]	A1/A2
E3	125	-1,18	11,95	12,01	95,64	1,90	0,53	9,82	0,85	1,86

En este modo, se aprecia que se manifiesta en la unidad U1 de la Central Palmucho, con una frecuencia de 1,9 [Hz], el cual corresponde a un modo local con un factor de amortiguamiento de 8,03%.

Respecto al factor de observabilidad, este se presenta solo en uno de los cuatro cuadrantes y corresponde a la unidad U1 de la Central Palmucho.

En el gráfico de participaciones, se observa que solo hay participación de la unidad U1 Central Palmucho, la cual tiene un 100% de participación.

9.3.20 Malalcahuello 1,33 [Hz]

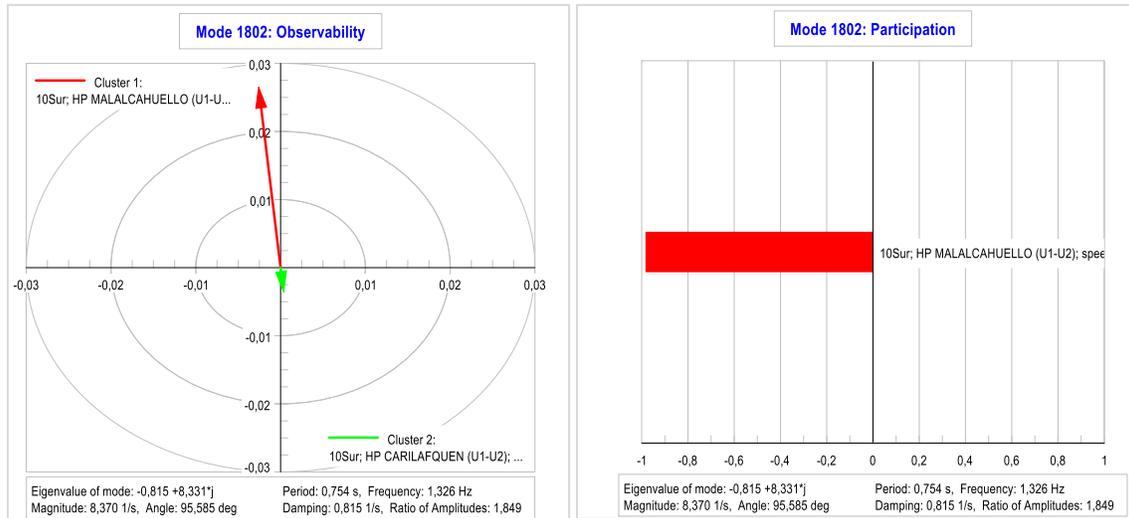


Figura 42: Modo Malalcahuello 1,33 [Hz] (Caso Testigo E1 DA Día Mar 2024)

Tabla 42: Modo Malalcahuello 1,33 [Hz]

Escenario	Modo	P. Real [1/s]	P. Imag [rad/s]	Mag. [1/s]	Ang. [°]	Frec. [Hz]	Periodo [s]	Xi	CTA [s]	A1/A2
E1	1802	-0,82	8,33	8,37	95,59	1,33	0,75	9,73	1,23	1,85
E3	77	-0,84	8,50	8,54	95,65	1,35	0,74	9,85	1,19	1,86

En este modo se manifiesta en Central Malalcahuello. La frecuencia del modo es de carácter local, con un factor de amortiguamiento cercano al 10%.

Se puede ver que los factores de observabilidad se encuentran distribuidos de manera significativa, en solo uno de los cuatro cuadrantes, correspondiente a las Unidades 1 y 2 de la Central Malalcahuello.

Respecto la participación, la Central Malalcahuello alcanza 100%.

9.3.21 Colbún 1,61 [Hz]

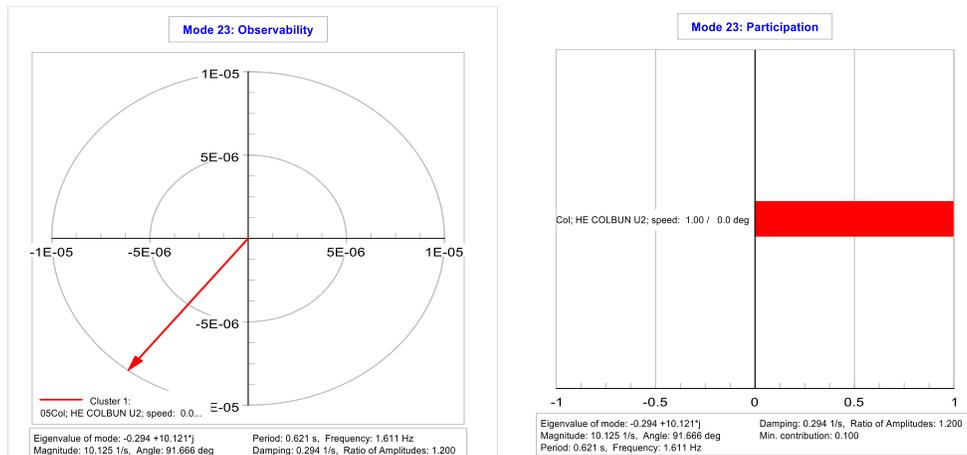


Figura 43: Modo Colbún 1,61 [Hz] (Caso Testigo E2 DA Noche Dic 2024)

Tabla 43: Modo Colbún 1,61 [Hz]

Escenario	Modo	P. Real [1/s]	P. Imag [rad/s]	Mag. [1/s]	Ang. [°]	Frec. [Hz]	Periodo [s]	Xi	CTA [s]	A1/A2
E2	23	-0,29	10,12	10,13	91,67	1,61	0,62	2,91	3,40	1,20
E3	91	-0,96	9,66	9,71	95,66	1,54	0,65	9,86	1,04	1,86
E4	960	-0,66	9,93	9,95	93,81	1,58	0,63	6,65	1,51	1,52

En este modo se manifiesta en la unidad U2 Colbún. La frecuencia del modo es de carácter local. En el E2 este se presenta con el menor factor de amortiguamiento, cuyo valor es de 2,91%.

Se puede ver que los factores de observabilidad se encuentran distribuidos en solo uno de los cuatro cuadrantes, correspondiente solo a la Unidad 2 de Colbún.

Respecto la participación, es predominante la Unidad 2 Colbún, alcanzando 100%.

9.3.22 Palmar 1,49 [Hz]

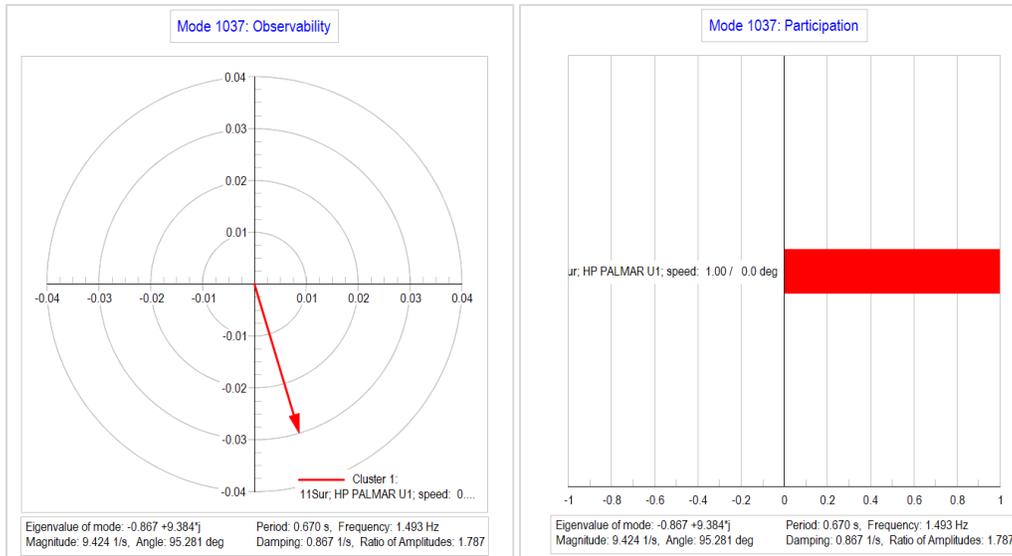


Figura 44: Modo Palmar 1,49 [Hz] (Caso Testigo E4 DB Noche Dic 2024)

Tabla 44: Modo Palmar 1,49 [Hz]

Escenario	Modo	P. Real [1/s]	P. Imag [rad/s]	Mag. [1/s]	Ang. [°]	Frec. [Hz]	Periodo [s]	Xi	CTA [s]	A1/A2
E1	1882	-0,89	9,28	9,32	95,48	1,48	0,68	9,55	1,12	1,83
E2	87	-0,87	9,26	9,30	95,35	1,47	0,68	9,33	1,15	1,80
E3	87	-0,90	9,02	9,07	95,71	1,44	0,70	9,95	1,11	1,87
E4	1037	-0,87	9,38	9,42	95,28	1,49	0,67	9,20	1,15	1,79

En este modo se manifiesta en la unidad U1 Central Palmar. La frecuencia del modo corresponde a un carácter local y el factor de amortiguamiento se encuentra en torno al 9 %, considerando los escenarios analizados.

Se puede ver que los factores de observabilidad se encuentran distribuidos en 1 de los 4 cuadrantes, donde se manifiesta la unidad.

Respecto la participación, es predominante de la unidad U1 de la Central en cuestión, aproximándose al 100%.

9.3.23 Puntilla 1,77 [Hz]

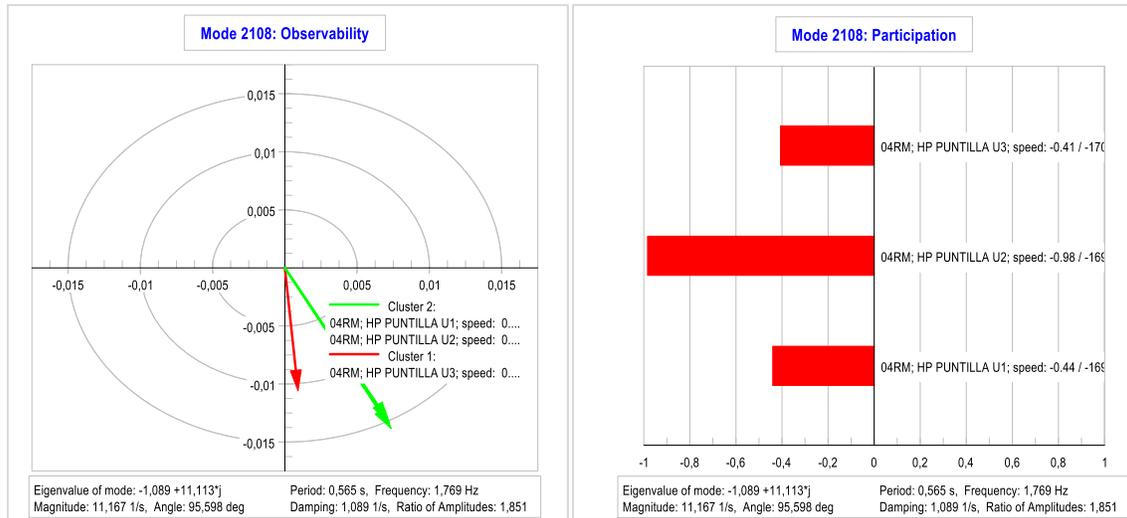


Figura 45: Modo Puntilla 1,77 [Hz] (Caso Testigo E1 DA Día Mar 2024)

Tabla 45: Modo Puntilla 1,77 [Hz]

Escenario	Modo	P. Real [1/s]	P. Imag [rad/s]	Mag. [1/s]	Ang. [°]	Frec. [Hz]	Periodo [s]	Xi	CTA [s]	A1/A2
E1	2108	-1,09	11,11	11,17	95,60	1,77	0,57	9,76	0,92	1,85
E3	119	-1,14	11,36	11,41	95,74	1,81	0,55	10,00	0,88	1,88

En este modo se manifiesta en las Unidades 1,2 y 3 de la Central Puntilla. La frecuencia del modo corresponde a un carácter local y el factor de amortiguamiento cercano al 10%, considerando los escenarios analizados.

Se puede ver que los factores de observabilidad se encuentran distribuidos en 1 de los 4 cuadrantes, donde se manifiestan las tres unidades de la Central.

Respecto la participación, es predominante de la unidad U2 de la Central Puntilla, con un 98%. Las Unidades 1 y 3 tienen una participación de 44% y 41%, respectivamente.

9.3.24 Correntoso 1,66 [Hz]

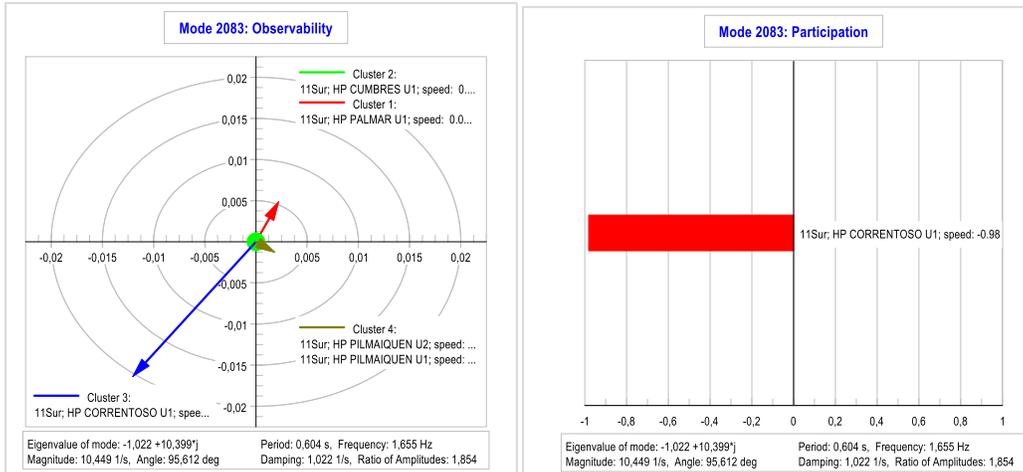


Figura 46: Modo Correntoso 1,66 [Hz] (Caso Testigo E1 DA Día Mar 2024)

Tabla 46: Modo Correntoso 1,66 [Hz]

Escenario	Modo	P. Real [1/s]	P. Imag [rad/s]	Mag. [1/s]	Ang. [°]	Frec. [Hz]	Periodo [s]	ξ	CTA [s]	A1/A2
E1	2083	-1,02	10,40	10,45	95,61	1,66	0,60	9,78	0,98	1,85
E2	139	-1,04	10,45	10,50	95,67	1,66	0,60	9,88	0,96	1,87

En este modo se manifiesta en la Unidad 1 de la Central Correntoso. La frecuencia del modo corresponde a un carácter local y el factor de amortiguamiento es de 9,78%.

Se puede ver que los factores de observabilidad se encuentran distribuidos en tres cuadrantes, pero predomina notoriamente la Unidad 1 de la Central Correntoso.

Respecto a las participaciones, se observa que solo hay participación de dicha unidad alcanzando un 98%.

9.3.25 Juncal 1,45 [Hz]

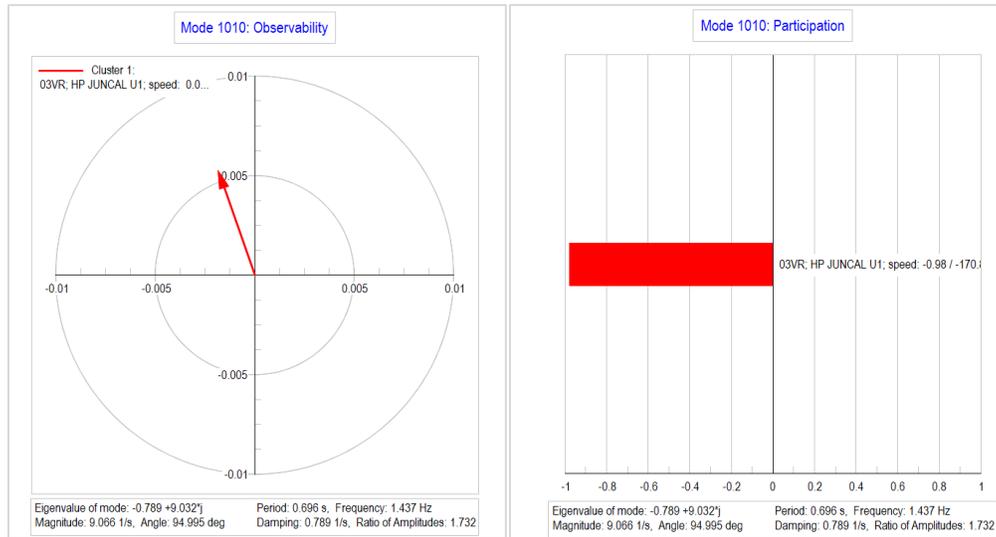


Figura 47: Modo Juncal 1,44 [Hz] (Caso Testigo E4 DB Noche Dic 2024)

Tabla 47: Modo Juncal 1,44 [Hz]

Escenario	Modo	P. Real [1/s]	P. Imag [rad/s]	Mag. [1/s]	Ang. [°]	Frec. [Hz]	Periodo [s]	Xi	CTA [s]	A1/A2
E2	81	-0,79	8,64	8,68	95,25	1,38	0,73	9,15	1,26	1,78
E4	1010	-0,79	9,03	9,07	95,00	1,44	0,70	8,71	1,27	1,73

En este modo se manifiesta en las unidades U1 de la Central Juncal, con una frecuencia de 1,44 [Hz], lo cual corresponde a un modo local con un factor de amortiguamiento de 8,71 %.

Respecto al factor de observabilidad, este se presenta solo en uno de los cuatro cuadrantes, correspondiente solo a la U1 de la Central Juncal.

Con respecto a las participaciones, se observa que solo hay participación de la unidad U1 de Juncal, alcanzando un valor de 98%.

9.3.26 Itata 1,02 [Hz]

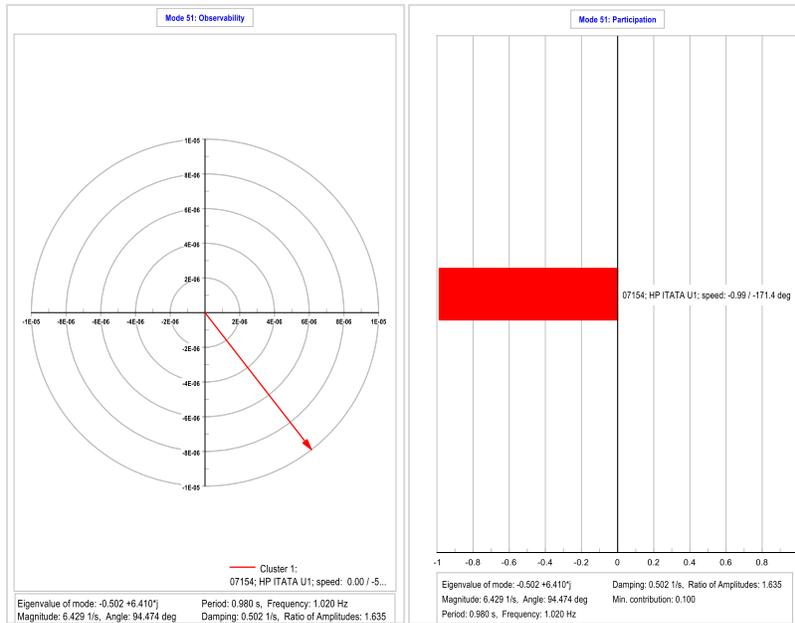


Figura 48: Modo Itata 1,97 [Hz] (Caso Testigo E2 DA Noche Dic 2024)

Tabla 48: Modo Itata 1,97 [Hz]

Escenario	Modo	P. Real [1/s]	P. Imag [rad/s]	Mag. [1/s]	Ang. [°]	Frec. [Hz]	Periodo [s]	Xi	CTA [s]	A1/A2
E2	51	-0,50	6,41	6,43	94,47	1,02	0,98	7,80	1,99	1,64
E4	885	-0,50	6,39	6,41	94,50	1,02	0,98	7,85	1,99	1,64

En este modo se manifiesta en las unidades U1 de la Central Itata, con una frecuencia de 1,02 [HZ], lo cual corresponde a un modo local con un factor de amortiguamiento de 7,8 %.

Respecto al factor de observabilidad, este se presenta solo en uno de los cuatro cuadrantes, correspondiente solo a la U1 de la Central Itata.

Con respecto a las participaciones, se observa que solo hay participación de la unidad U1 de Itata, alcanzando un valor de 99%.

9.3.27 Las Lajas 0,77 [Hz]

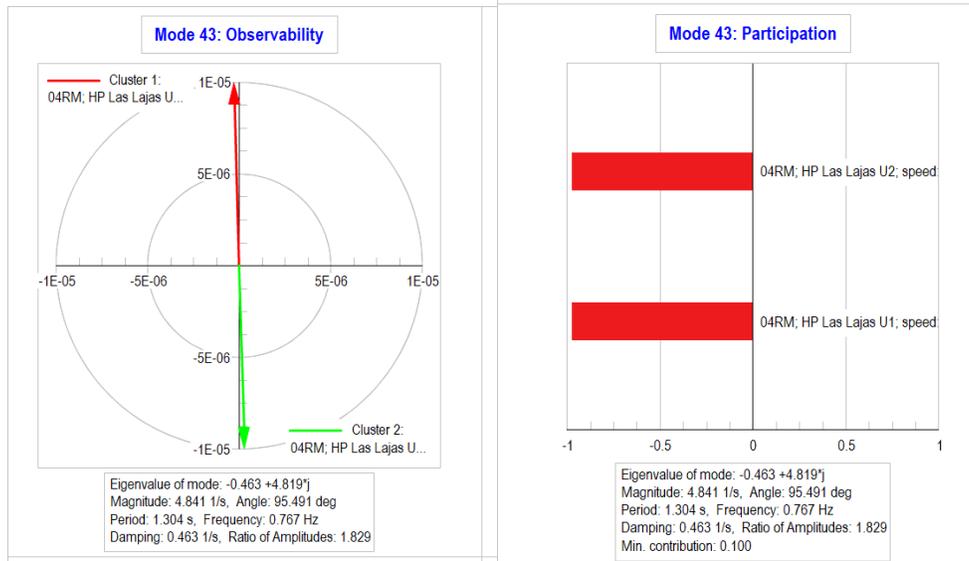


Figura 49: Modo Itata 1,97 [Hz] (Caso Testigo E3 DB día Abr 2024)

Tabla 49: Modo Las Lajas 0,77 [Hz]

Escenario	Modo	P. Real [1/s]	P. Imag [rad/s]	Mag. [1/s]	Ang. [°]	Frec. [Hz]	Periodo [s]	Xi	CTA [s]	A1/A2
E3	43	-0.46	4.82	4.84	95.49	0.77	1.30	9.57%	2.16	1.83
E4	704	-0.357	5.261	5.273	93.884	0.837	1.194	6.773	2.800	1.532

En este modo se manifiesta en las unidades U1 de la Central Las Lajas, con una frecuencia de 1,02 [Hz], lo cual corresponde a un modo local con un factor de amortiguamiento de alrededor de 9,6%.

Respecto al factor de observabilidad, este se presenta solo en dos de los 4 cuadrantes, donde se aprecia que ambas unidades oscilan en contrafase una de otra.

Con respecto a las participaciones, se observa que las unidades U1 y U2 de Las Lajas alcanzan un valor de 99%.

9.4 Modos Locales ERV

En los modos caracterizados a continuación, se aprecia una participación de parques eólicos. No es posible obtener los diagramas fasoriales para las velocidades rotóricas ni tampoco las participaciones para estas variables de estado. Lo anterior se debe a que estos parques son modelados mediante generadores estáticos con sus correspondientes modelos de planta, los cuales no cuentan con una variable con una nomenclatura estandarizada, como es el caso de los generadores sincrónicos donde es sencillo identificar la variable de estado que corresponde a la velocidad angular. Además, los factores de observabilidad y participación asociada a las velocidades

rotóricas para generadores sincrónicos no alcanzan valores significativos, por lo que no representan completamente cómo se manifiestan los modos y a qué unidades debe incorporarse torque de amortiguación en su eje.

9.4.1 Modo PE Monte Redondo

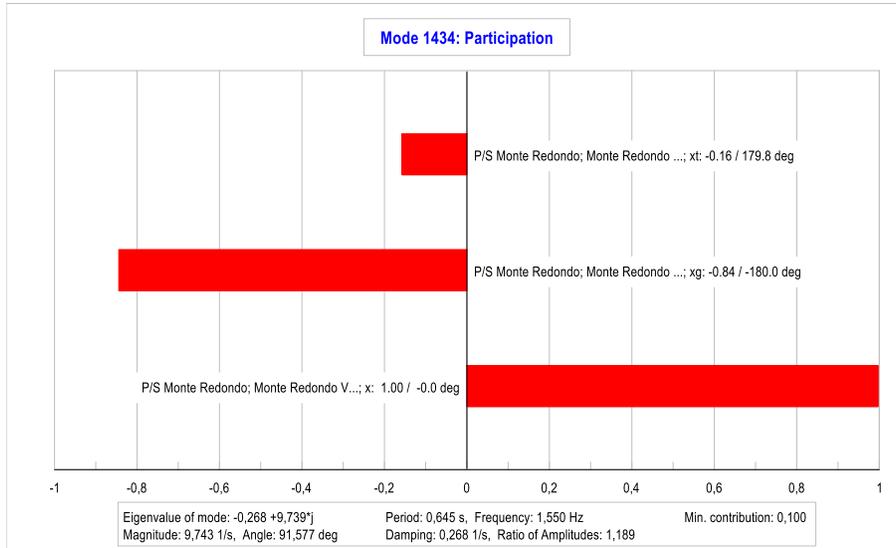


Figura 50: Modo Monte Redondo 1,55 [Hz] (Caso Testigo E1 DA día Mar 2024)

Tabla 50: Modo Monte Redondo

Escenario	Modo	P. Real [1/s]	P. Imag [rad/s]	Mag. [1/s]	Ang. [°]	Frec. [Hz]	Periodo [s]	Xi	CTA [s]	A1/A2
E1	1434	-0,27	9,74	9,74	91,58	1,55	0,64	2,75	3,73	1,19
E2	19	-0,25	9,73	9,74	91,49	1,55	0,65	2,60	3,94	1,18
E3	27	-0,29	9,75	9,75	91,72	1,55	0,64	3,00	3,42	1,21
E4	660	-0,27	9,74	9,74	91,62	1,55	0,65	2,82	3,64	1,19

Este modo se manifiesta exclusivamente en el PE Monte Redondo, con una frecuencia de 1,55 [Hz], lo que corresponde a un modo local, su amortiguamiento es un 70% inferior a lo exigido en el caso Red-N. Con respecto a las participaciones, se puede observar que no existen unidades sincrónicas donde se pueda adicionar de amortiguamiento mecánico en el eje y que las participaciones significativas corresponden únicamente al Parque eólico Monte Redondo. Tanto para los distintos escenarios como para los casos red N y N-1, este modo no presenta grandes cambios en su frecuencia ni tampoco en su amortiguamiento.

9.4.2 Modo PE Sierra Gorda

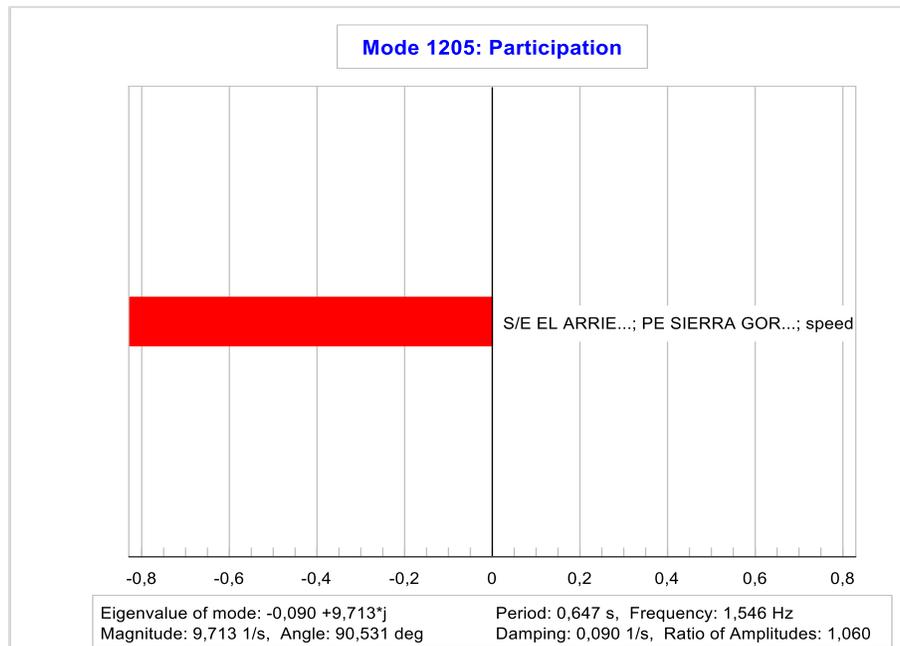


Figura 51: Modo Sierra Gorda 1,56 [Hz] (Caso Testigo E1 DA Día Mar 2024)

Tabla 51: Modo Sierra Gorda

Escenario	Modo	P. Real [1/s]	P. Imag [rad/s]	Mag. [1/s]	Ang. [°]	Frec. [Hz]	Periodo [s]	Xi	CTA [s]	A1/A2
E1	1205	-0,09	9,71	9,71	90,53	1,55	0,65	0,93	11,12	1,06
E3	79	-0,86	10,39	10,43	94,76	1,65	0,60	8,29	1,16	1,69
E4	935	-0,59	9,80	9,81	93,47	1,56	0,64	6,05	1,68	1,46

Este modo se manifiesta exclusivamente en el PE Sierra Gorda, con una frecuencia de 1,55 [Hz], lo que corresponde a un modo local, su amortiguamiento es un 90% inferior a lo exigido en el caso Red-N. Con respecto a las participaciones, se puede observar que no existen unidades sincrónicas donde se pueda adicionar de amortiguamiento mecánico en el eje y que las participaciones significativas corresponden únicamente al Parque eólico Sierra Gorda

9.4.3 Modo PE Cabo Leones

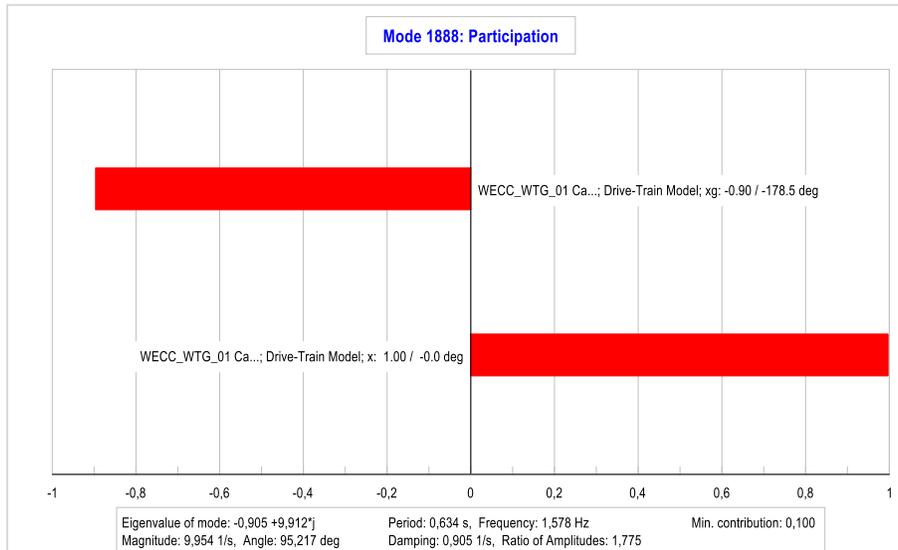


Figura 52: Modo Cabo Leones I Fase 2 y III 1,58 [Hz] (Caso Testigo E1 DA Día Mar 2024)

Tabla 52: Modo Cabo Leones I Fase 2

Escenario	Modo	P. Real [1/s]	P. Imag [rad/s]	Mag. [1/s]	Ang. [°]	Frec. [Hz]	Periodo [s]	Xi	CTA [s]	A1/A2
E1	1921	-0,98	9,92	9,97	95,63	1,58	0,63	9,81	1,02	1,86
E2	121	-0,99	9,92	9,97	95,68	1,58	0,63	9,9	1,01	1,87
E2	123	-0,99	9,92	9,97	95,68	1,58	0,63	9,9	1,01	1,87

Tabla 53: Modo Cabo Leones III

Escenario	Modo	P. Real [1/s]	P. Imag [rad/s]	Mag. [1/s]	Ang. [°]	Frec. [Hz]	Periodo [s]	Xi	CTA [s]	A1/A2
E1	1888	-0,91	9,91	9,95	95,22	1,58	0,63	9,09	1,11	1,78

Este modo se presenta para una frecuencia de 1,58 Hz en Cabo Leones I Fase 2 y en Cabo Leones III, con la misma frecuencia.

El modo asociado a Cabo Leones I fase 2 y Cabo Leones III se presenta para una frecuencia de 1,58 Hz. Este modo tiene una amortiguación por sobre el 9%. Con respecto a las participaciones, se puede observar que no existen unidades sincrónicas donde se pueda adicionar de amortiguamiento mecánico en el eje y que las participaciones significativas corresponden únicamente a los Parque Eólico Cabo Leones I y III.

9.4.4 Modo PE Aurora

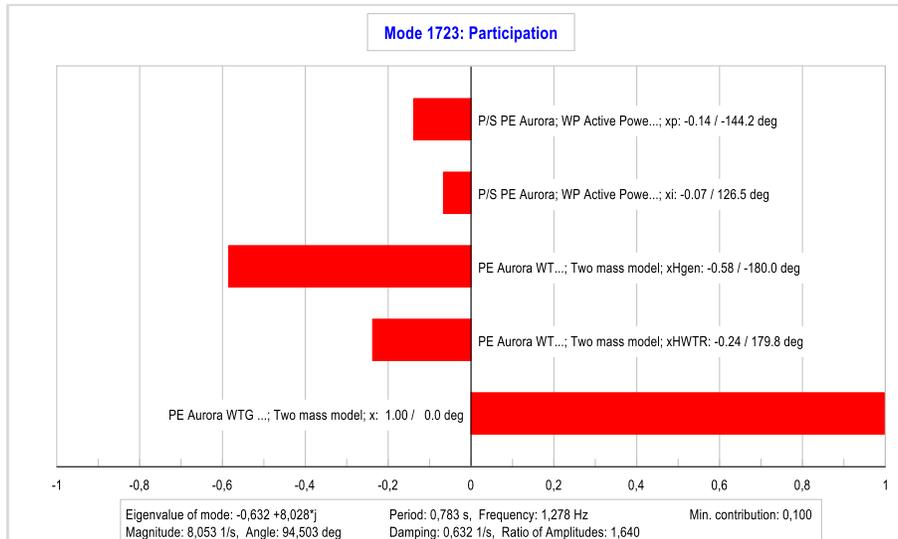


Figura 53: Modo Aurora 1,56 [Hz] (Caso Testigo E4 DA Noche Dic 2024)

Tabla 54: Modo Aurora

Escenario	Modo	P. Real [1/s]	P. Imag [rad/s]	Mag. [1/s]	Ang. [°]	Frec. [Hz]	Periodo [s]	Xi	CTA [s]	A1/A2
E1	1723	-0,63	8,03	8,05	94,50	1,28	0,78	7,85	1,58	1,64
E2	61	-0,59	8,04	8,06	94,19	1,28	0,78	7,30	1,70	1,58

Este modo se manifiesta exclusivamente en el PE Aurora, con una frecuencia de 1,28 [Hz], lo que corresponde a un modo local, su amortiguamiento es un 30% aproximadamente inferior a lo exigido en el caso red N. Con respecto a las participaciones, se puede observar que no existen unidades sincrónicas donde se pueda adicionar de amortiguamiento mecánico en el eje y que las participaciones significativas corresponden únicamente al Parque eólico Sierra Gorda.

9.4.5 Modo PE Valle de los Vientos

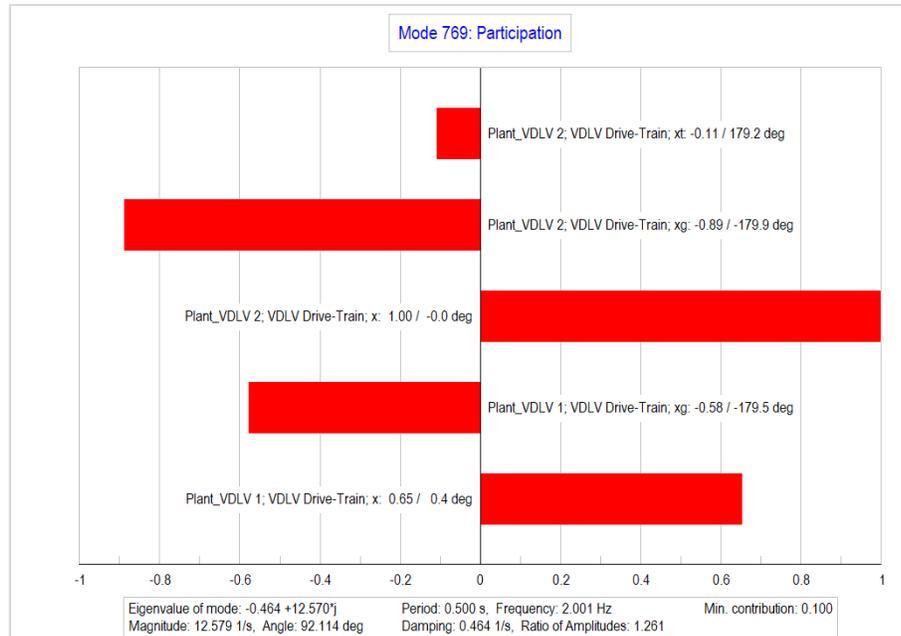


Figura 54: Modo Valle de los Vientos 2 [Hz] (Caso Testigo E4 DB Noche Dic 2024)

Tabla 55: Modo Valle de los Vientos

Escenario	Modo	P. Real [1/s]	P. Imag [rad/s]	Mag. [1/s]	Ang. [°]	Frec. [Hz]	Periodo [s]	Xi	CTA [s]	A1/A2
E2	107	-0,97	12,35	12,39	94,47	1,97	0,51	7,79	1,04	1,63
E2	109	-0,97	12,35	12,39	94,48	1,97	0,51	7,80	1,03	1,64
E3	123	-1,17	12,26	12,31	95,47	1,95	0,51	9,54	0,85	1,83
E3	127	-1,19	12,27	12,33	95,52	1,95	0,51	9,62	0,84	1,83
E4	767	-0,46	12,57	12,58	92,11	2,00	0,50	3,69	2,16	1,26
E4	769	-0,46	12,57	12,58	92,11	2,00	0,50	3,69	2,16	1,26

Este modo se manifiesta exclusivamente en el PE Valle de los Vientos, con una frecuencia de 2 [Hz], lo que corresponde a un modo local. En el E2 se presenta con el amortiguamiento más bajo, con un 63% aproximadamente inferior a lo exigido en el caso Red-N. Con respecto a las participaciones, se puede observar que no existen unidades sincrónicas donde se pueda adicionar de amortiguamiento mecánico en el eje y que las participaciones significativas corresponden únicamente al Parque eólico Valle de los Vientos.

9.4.6 Modo PE El Arrayán

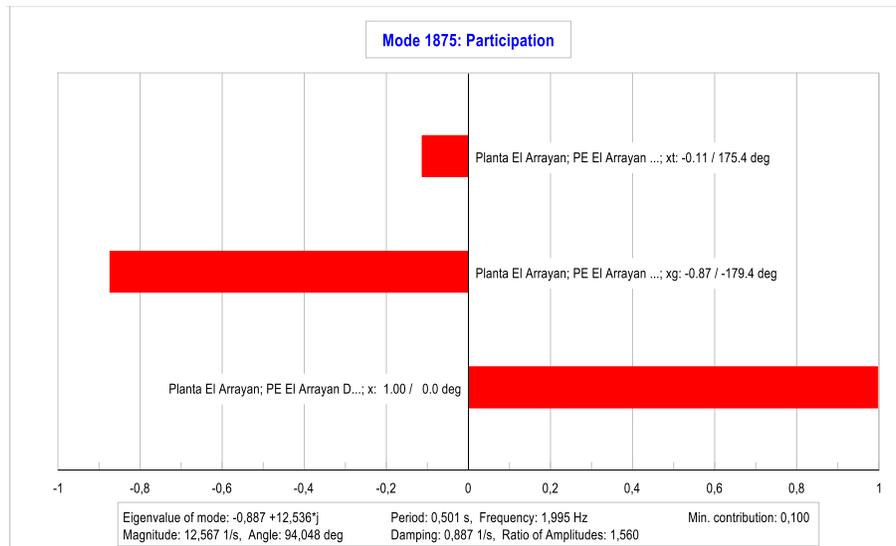


Figura 55: Modo El Arrayan 2,01 [Hz](Caso Testigo E1 DA día Mar 2024)

Tabla 56: Modo El Arrayan

Escenario	Modo	P. Real [1/s]	P. Imag [rad/s]	Mag. [1/s]	Ang. [°]	Frec. [Hz]	Periodo [s]	Xi	CTA [s]	A1/A2
E1	1875	-0,89	12,54	12,57	94,05	1,99	0,50	7,06	1,13	1,56
E2	33	-0,39	12,64	12,65	91,77	2,01	0,5	3,09	2,56	1,21
E3	105	-1,08	12,49	12,54	94,93	1,99	0,50	8,60	0,93	1,72
E4	973	-0,70	12,58	12,60	93,16	2,00	0,50	5,52	1,44	1,42

Este modo se manifiesta exclusivamente en el PE El Arrayán con una frecuencia que ronda los 2 [Hz], lo que corresponde a un modo local. En el E2 se presenta con el amortiguamiento más bajo, con un 70% aproximadamente inferior a lo exigido en el caso Red-N. Con respecto a las participaciones, se puede observar que no existen unidades sincrónicas donde se pueda adicionar de amortiguamiento mecánico en el eje y que las participaciones significativas corresponden únicamente al Parque eólico El Arrayan.

9.4.7 Modo PE Talinay Oriente

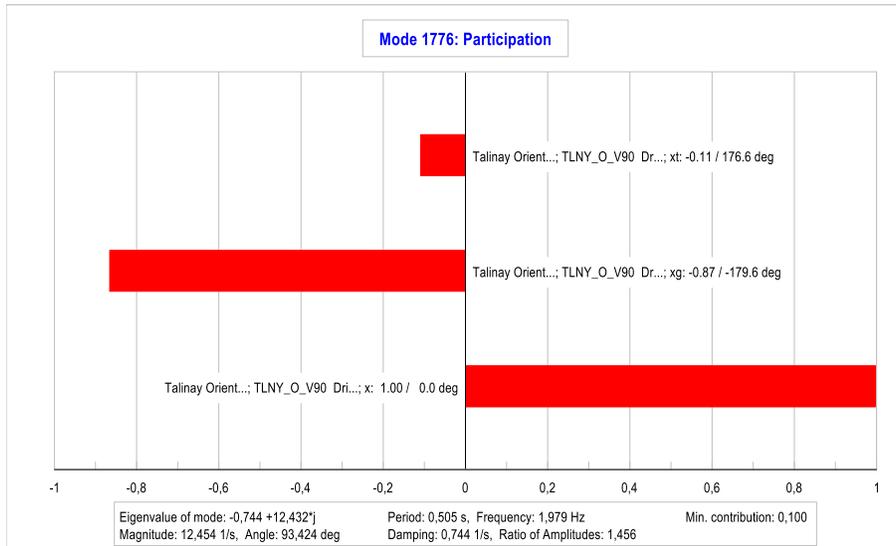


Figura 56: Modo Talinay Oriente 2 [Hz] (Caso Testigo E2 DA Noche Dic 2024)

Tabla 57: Modo Talinay Oriente

Escenario	Modo	P. Real [1/s]	P. Imag [rad/s]	Mag. [1/s]	Ang. [°]	Frec. [Hz]	Periodo [s]	Xi	CTA [s]	A1/A2
E1	1776	-0,74	12,43	12,45	93,42	1,98	0,51	5,97	1,34	1,46
E2	35	-0,39	12,58	12,59	91,78	2	0,5	3,11	2,55	1,22
E3	69	-0,83	12,39	12,42	93,82	1,97	0,51	6,67	1,21	1,52
E3	71	-0,83	12,40	12,42	93,83	1,97	0,51	6,67	1,21	1,52
E4	1034	-0,86	12,38	12,41	93,97	1,97	0,51	6,93	1,16	1,55

Este modo se manifiesta exclusivamente en el PE Talinay Oriente con una frecuencia que ronda los 2 [Hz], lo que corresponde a un modo local. En el E2 se presenta con el amortiguamiento más bajo, con un 70% aproximadamente inferior a lo exigido en el caso Red-N. Con respecto a las participaciones, se puede observar que no existen unidades sincrónicas donde se pueda adicionar de amortiguamiento mecánico en el eje y que las participaciones significativas corresponden únicamente al Parque eólico Talinay Oriente.

9.4.8 Modo PE Los Cururos

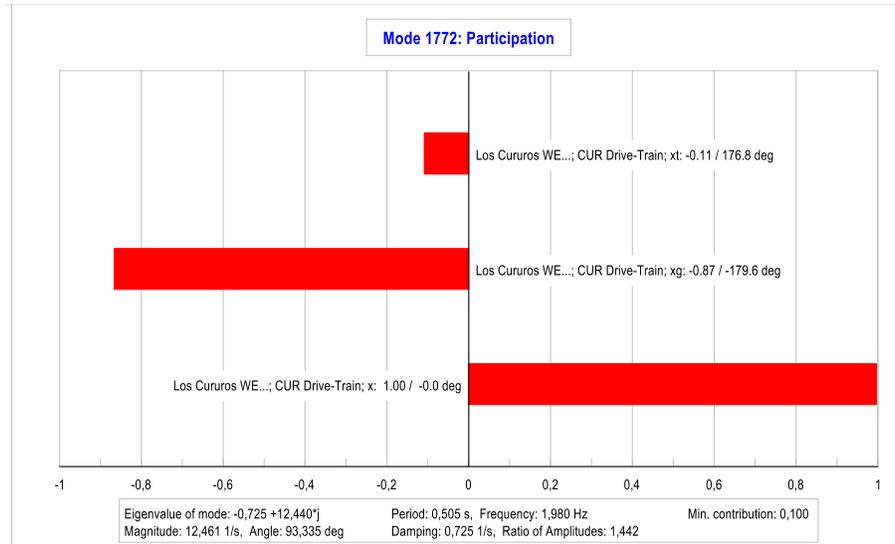


Figura 57: Modo Los Cururos (Caso Testigo E2 DA Noche Dic 2024)

Tabla 58: Modo Los Cururos

Escenario	Modo	P. Real [1/s]	P. Imag [rad/s]	Mag. [1/s]	Ang. [°]	Frec. [Hz]	Periodo [s]	Xi	CTA [s]	A1/A2
E1	1772	-0,73	12,44	12,46	93,34	1,98	0,51	5,82	1,38	1,44
E2	37	-0,39	12,58	12,59	91,78	2	0,5	3,11	2,55	1,22
E3	53	-0,67	12,46	12,48	93,06	1,98	0,50	5,34	1,50	1,40

Este modo se manifiesta exclusivamente en el PE Los Cururos con una frecuencia que ronda los 2 [Hz], lo que corresponde a un modo local. En el E2 se presenta con el amortiguamiento más bajo, con un 70% aproximadamente inferior a lo exigido en el caso Red-N. Con respecto a las participaciones, se puede observar que no existen unidades sincrónicas donde se pueda adicionar de amortiguamiento mecánico en el eje y que las participaciones significativas corresponden únicamente al Parque eólico Los Cururos.

9.4.9 Modo PE Sarco

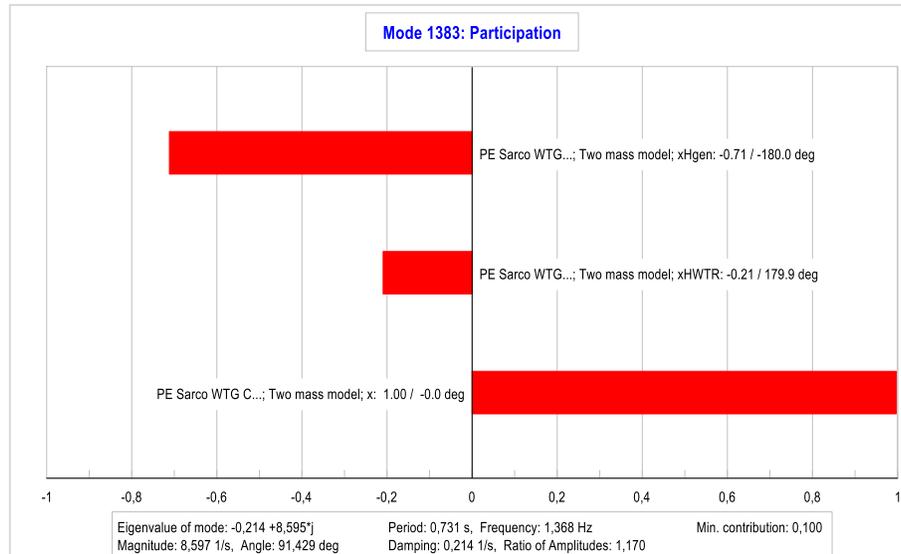


Figura 58: Modo Sarco 1,37 [Hz] (Caso Testigo E1 DA Día Mar 2024)

Tabla 59: Modo Sarco

Escenario	Modo	P. Real [1/s]	P. Imag [rad/s]	Mag. [1/s]	Ang. [°]	Frec. [Hz]	Periodo [s]	Xi	CTA [s]	A1/A2
E1	1383	-0,21	8,60	8,60	91,43	1,37	0,73	2,49	4,67	1,17
E2	21	-0,28	8,37	8,38	91,9	1,33	0,75	3,32	3,6	1,23

Este modo se manifiesta exclusivamente en el PE Sarco con una frecuencia que ronda los 1,3 [Hz], lo que corresponde a un modo local. En el E1 se presenta con el amortiguamiento más bajo, con un 75% aproximadamente inferior a lo exigido en el caso Red-N. Con respecto a las participaciones, se puede observar que no existen unidades sincrónicas donde se pueda adicionar de amortiguamiento mecánico en el eje y que las participaciones significativas corresponden únicamente al Parque eólico Sarco.

9.4.10 Modo PE Tchama

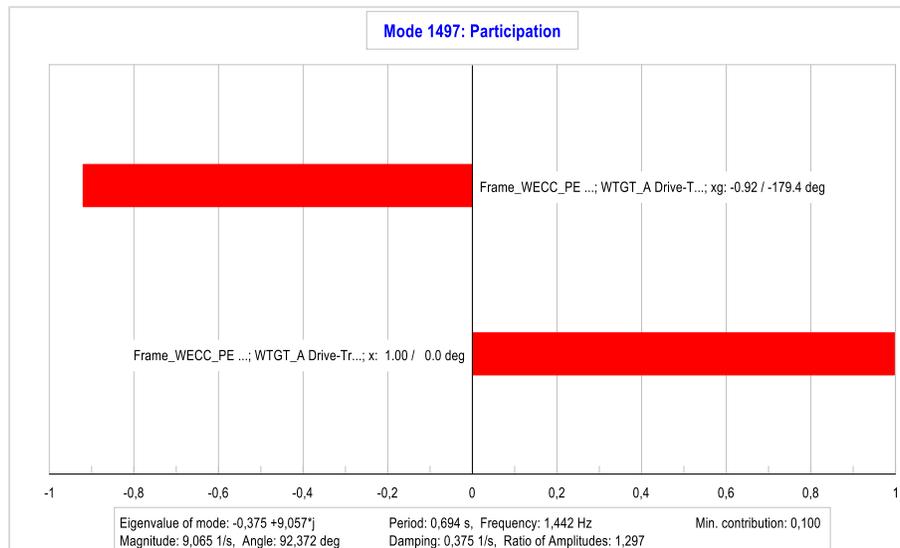


Figura 59: Modo Tchama 1,44 [Hz](Caso Testigo E1 DA Día Mar 2024)

Tabla 60: Modo Tchama

Escenario	Modo	P. Real [1/s]	P. Imag [rad/s]	Mag. [1/s]	Ang. [°]	Frec. [Hz]	Periodo [s]	Xi	CTA [s]	A1/A2
E1	1497	-0,38	9,06	9,07	92,37	1,44	0,70	4,14	2,67	1,30
E2	41	-0,44	9,05	9,06	92,79	1,44	0,69	4,87	2,27	1,36
E3	23	-0,28	9,04	9,04	91,79	1,44	0,70	3,13	3,53	1,22

Este modo se manifiesta exclusivamente en el PE Tchama con una frecuencia de 1,44 [Hz], lo que corresponde a un modo local. En el E2 se presenta con el amortiguamiento más bajo, con un 77% aproximadamente inferior a lo exigido en el caso Red-N. Con respecto a las participaciones, se puede observar que no existen unidades sincrónicas donde se pueda adicionar de amortiguamiento mecánico en el eje y que las participaciones significativas corresponden únicamente al Parque eólico Tchama.

9.4.11 Modo PE Los Olmos

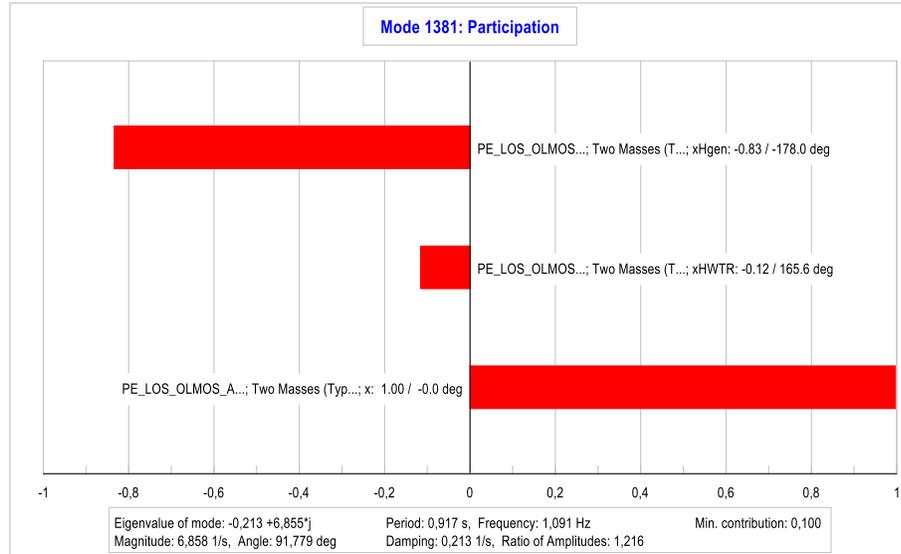


Figura 60: Modo Los Olmos 1,09 [Hz] (Caso Testigo E1 DA Día Mar 2024)

Tabla 61: Modo Los Olmos

Escenario	Modo	P. Real [1/s]	P. Imag [rad/s]	Mag. [1/s]	Ang. [°]	Frec. [Hz]	Periodo [s]	Xi	CTA [s]	A1/A2
E1	1381	-0,21	6,86	6,86	91,78	1,09	0,92	3,11	4,70	1,22
E3	25	-0,29	7,00	7,01	92,34	1,11	0,90	4,09	3,49	1,29

Este modo se manifiesta exclusivamente en el PE Los Olmos con una frecuencia que ronda los 1,1 [Hz], lo que corresponde a un modo local. En el E1 se presenta con el amortiguamiento más bajo, con un 70% aproximadamente inferior a lo exigido en el caso Red-N. Con respecto a las participaciones, se puede observar que no existen unidades sincrónicas donde se pueda adicionar de amortiguamiento mecánico en el eje y que las participaciones significativas corresponden únicamente al Parque eólico Los Olmos.

9.4.12 Modo PE Puelche Sur

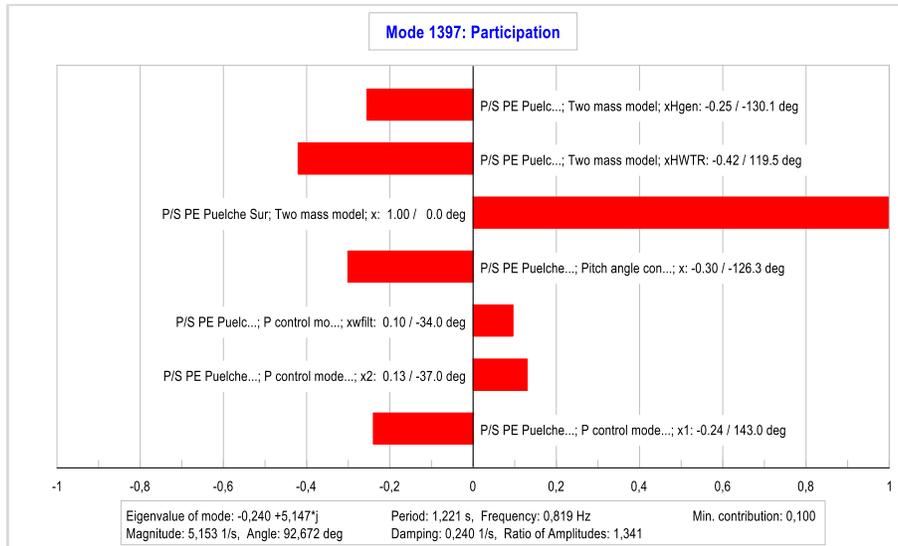


Figura 61: Modo Puelche Sur 2,49 [Hz] (Caso Testigo E1 DA Día Mar 2024)

Tabla 62: Modo Puelche Sur

Escenario	Modo	P. Real [1/s]	P. Imag [rad/s]	Mag. [1/s]	Ang. [°]	Frec. [Hz]	Periodo [s]	Xi	CTA [s]	A1/A2
E1	1397	-0,24	5,15	5,15	92,67	0,82	1,22	4,66	4,16	1,34
E2	39	-0,4	5	5,02	94,59	0,8	1,26	7,99	2,49	1,66
E3	21	-0,27	5,13	5,14	93,01	0,82	1,22	5,24	3,71	1,39
E4	736	-0,43	4,97	4,98	94,91	0,79	1,27	8,56	2,34	1,72

Este modo se manifiesta exclusivamente en el PE Puelche Sur con una frecuencia que ronda los 0,8 [Hz], lo que corresponde a un modo local. En el E1 se presenta con el amortiguamiento más bajo, con un 50% aproximadamente inferior a lo exigido en el caso Red-N. Con respecto a las participaciones, se puede observar que no existen unidades sincrónicas donde se pueda adicionar de amortiguamiento mecánico en el eje y que las participaciones significativas corresponden únicamente al Parque eólico Puelche Sur.

9.4.13 Modo PE El Totoral

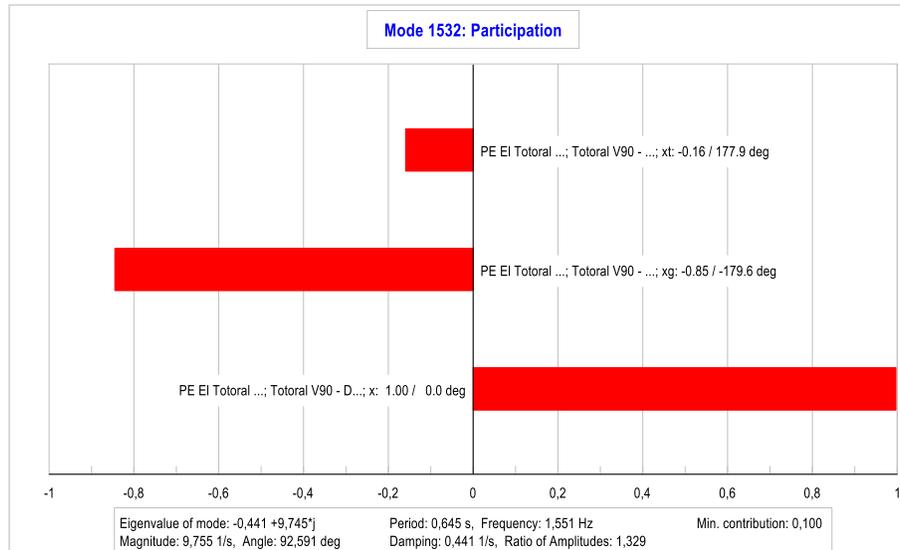


Figura 62: Modo El Totoral 1,55 [Hz] (Caso Testigo E1 DA Día Mar 2024)

Tabla 63: Modo El Totoral

Escenario	Modo	P. Real [1/s]	P. Imag [rad/s]	Mag. [1/s]	Ang. [°]	Frec. [Hz]	Periodo [s]	Xi	CTA [s]	A1/A2
E1	1532	-0,44	9,75	9,76	92,59	1,55	0,65	4,52	2,27	1,33
E3	55	-0,68	9,76	9,78	93,97	1,55	0,64	6,93	1,48	1,55
E4	918	-0,56	9,75	9,77	93,28	1,55	0,64	5,72	1,79	1,43

Este modo se manifiesta exclusivamente en el PE El Totoral con una frecuencia de 1,55 [Hz], lo que corresponde a un modo local. En el E1 se presenta con el amortiguamiento más bajo, con un 55% aproximadamente inferior a lo exigido en el caso Red-N. Con respecto a las participaciones, se puede observar que no existen unidades sincrónicas donde se pueda adicionar de amortiguamiento mecánico en el eje y que las participaciones significativas corresponden únicamente al Parque eólico El Totoral.

9.4.14 Modo PE Alena

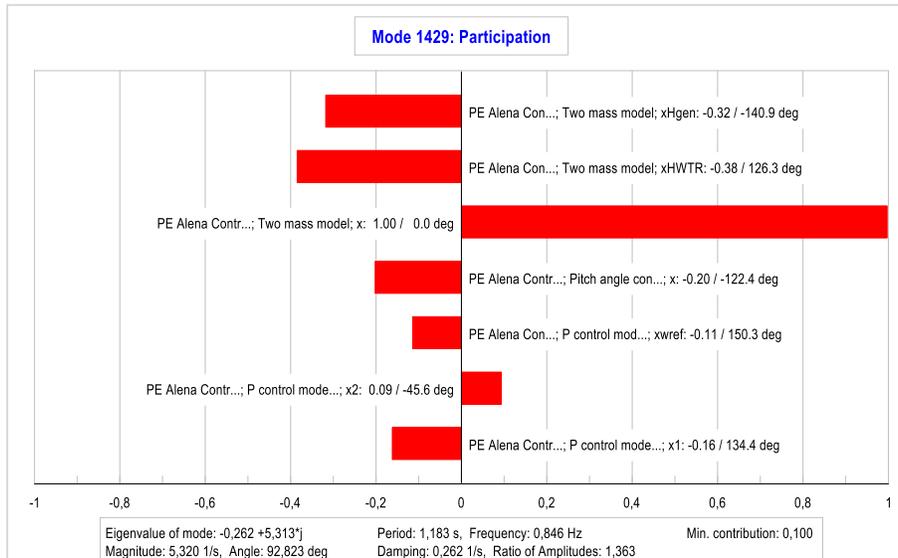


Figura 63: Modo Alena 0,85 [Hz] (Caso Testigo E1 DA Día Mar 2024)

Tabla 64: Modo Alena

Escenario	Modo	P. Real [1/s]	P. Imag [rad/s]	Mag. [1/s]	Ang. [°]	Frec. [Hz]	Periodo [s]	Xi	CTA [s]	A1/A2
E1	1429	-0,26	5,31	5,32	92,82	0,85	1,18	4,93	3,82	1,36
E2	53	-0,5	5,08	5,1	95,67	0,81	1,24	9,88	1,98	1,87

Este modo se manifiesta exclusivamente en el PE Alena con una frecuencia que ronda los 0,8 [Hz], lo que corresponde a un modo local. En el E1 se presenta con el amortiguamiento más bajo, con un 50% aproximadamente inferior a lo exigido en el caso Red-N. Con respecto a las participaciones, se puede observar que no existen unidades sincrónicas donde se pueda adicionar de amortiguamiento mecánico en el eje y que las participaciones significativas corresponden únicamente al Parque eólico Alena.

9.4.15 Modo PE Calama

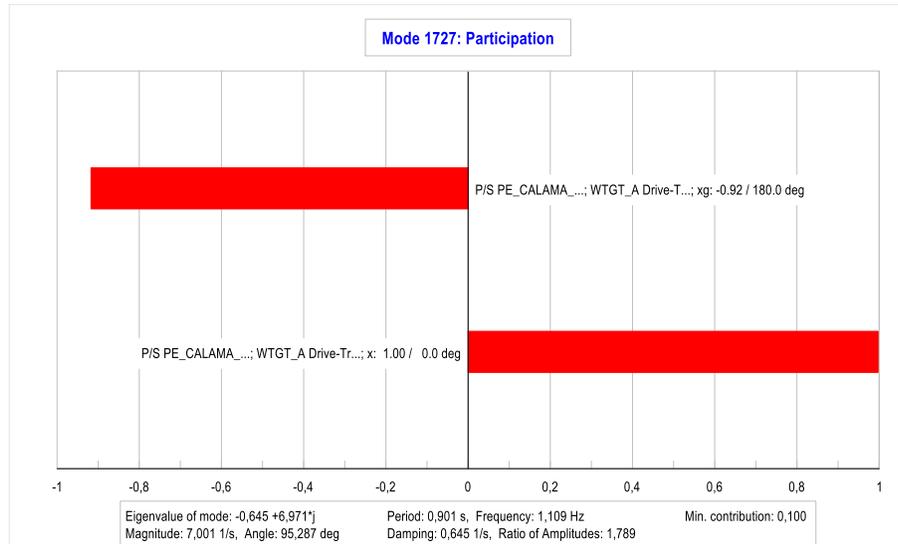


Figura 64: Modo Calama 1,11 [Hz] (Caso Testigo E1 DA día Mar 2024)

Tabla 65: Modo Calama

Escenario	Modo	P. Real [1/s]	P. Imag [rad/s]	Mag. [1/s]	Ang. [°]	Frec. [Hz]	Periodo [s]	Xi	CTA [s]	A1/A2
E1	1727	-0,65	6,97	7,00	95,29	1,11	0,90	9,21	1,55	1,79
E2	71	-0,71	6,98	7,02	95,8	1,11	0,9	10,1	1,41	1,89
E3	47	-0,54	6,97	6,99	94,44	1,11	0,90	7,74	1,85	1,63

Este modo se manifiesta exclusivamente en el PE Calama con una frecuencia de 1,1 [Hz], lo que corresponde a un modo local. En el E3 se presenta con el amortiguamiento más bajo, con un 20% aproximadamente inferior a lo exigido en el caso Red-N. Con respecto a las participaciones, se puede observar que no existen unidades sincrónicas donde se pueda adicionar de amortiguamiento mecánico en el eje y que las participaciones significativas corresponden únicamente al Parque eólico Calama.

9.4.16 Modo PE Punta Colorada

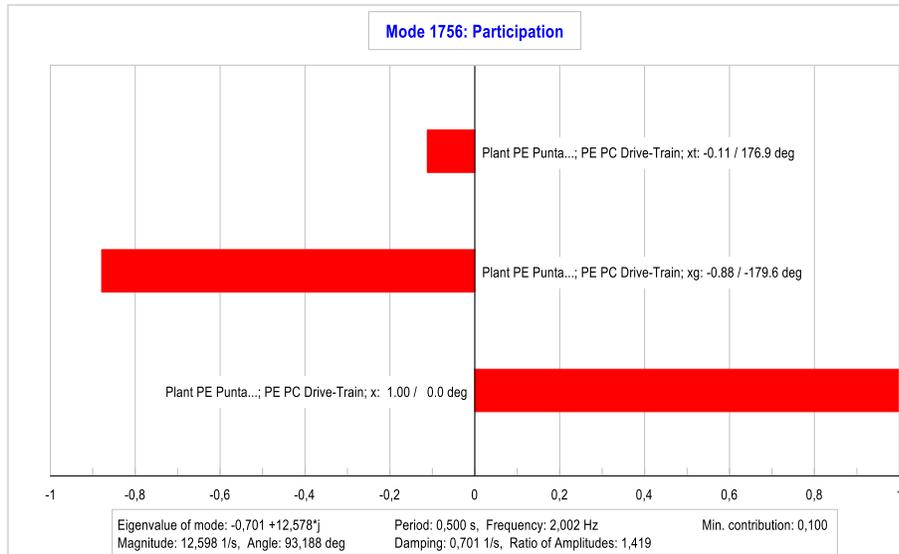


Figura 65: Modo Punta Colorada 2 [Hz] (Caso Testigo E1 DA Día Mar 2024)

Tabla 66: Modo Punta Colorada

Escenario	Modo	P. Real [1/s]	P. Imag [rad/s]	Mag. [1/s]	Ang. [°]	Frec. [Hz]	Periodo [s]	Xi	CTA [s]	A1/A2
E1	1756	-0,70	12,58	12,60	93,19	2,00	0,50	5,56	1,43	1,42

Este modo se manifiesta exclusivamente en el PE Punta Colorada con una frecuencia de 2 [Hz], lo que corresponde a un modo local, su amortiguamiento es un 45% aproximadamente inferior a lo exigido en el caso Red-N. Con respecto a las participaciones, se puede observar que no existen unidades sincrónicas donde se pueda adicionar de amortiguamiento mecánico en el eje y que las participaciones significativas corresponden únicamente al Parque eólico Punta Colorada.

9.4.17 Modo PE Llanos del Viento

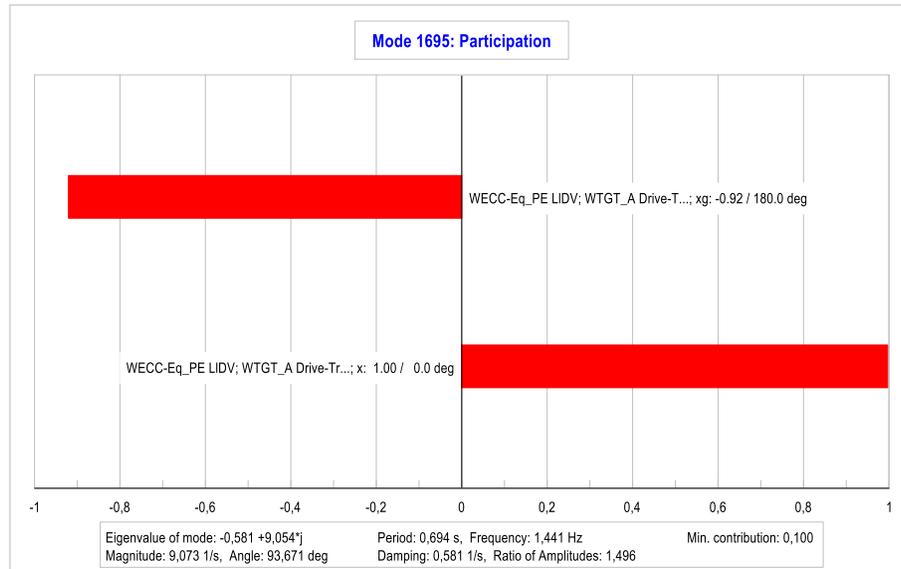


Figura 66: Modo Llanos del Viento 1,44 [Hz] (Caso Testigo E1 DA Día Mar 2024))

Tabla 67: Modo Llanos del Viento

Escenario	Modo	P. Real [1/s]	P. Imag [rad/s]	Mag. [1/s]	Ang. [°]	Frec. [Hz]	Periodo [s]	Xi	CTA [s]	A1/A2
E1	1695	-0,58	9,05	9,07	93,67	1,44	0,69	6,40	1,72	1,50

Este modo se manifiesta exclusivamente en el PE Llanos del Viento con una frecuencia de 1,44 [Hz], lo que corresponde a un modo local, su amortiguamiento es un 35% aproximadamente inferior a lo exigido en el caso Red-N. Con respecto a las participaciones, se puede observar que no existen unidades sincrónicas donde se pueda adicionar de amortiguamiento mecánico en el eje y que las participaciones significativas corresponden únicamente al Parque eólico Llanos del Viento.

9.4.18 Conclusiones Modos Locales ERV

En relación con los modos críticos donde se aprecia que existe una participación significativa asociada predominantemente a unidades de parques eólicos se puede señalar que:

- Según establece la NT SyCS vigente, las exigencias en relación con PSS son aplicables solo a las unidades sincrónicas y no se establece ni especifica qué requerimiento es exigible para los parques ERV (fotovoltaicos y eólicos).
- Los factores de observabilidad y participación para las velocidades rotóricas de unidades sincrónicas son significativamente bajos respecto variables de estado asociadas a parques eólicos. Además, las frecuencias de modos son en la gran mayoría sobre 1Hz, por lo que se podría concluir que corresponden a modos de carácter local con características de electromecánicas.

- Debido a que los factores de participación de las velocidades rotóricas son despreciables, no existen unidades sincrónicas que puedan adicionar amortiguamiento mecánico al eje.
- La gran mayoría de estos modos tienen un amortiguamiento sobre 5% e incluso cercano a 10%, por lo que no se traducen en problemas de bajo amortiguamiento de transferencias de potencia, respecto lo establecido en el art 5-38 NT SyCS, excepto para los casos de PE Monte Redondo y PE Aurora.
- Actualmente, no se considera necesario dar recomendaciones para parques eólicos respecto al amortiguamiento de oscilaciones electromecánicas. Sin embargo, en vista de la evolución dinámica del SEN y las tendencias en otros sistemas con alta penetración de energía basada en inversores, en el mediano plazo se podría requerir la implementación de soluciones análogas a los PSS para los parques eólicos.

Por lo tanto, no se contempla que sea requerido por el momento dar recomendaciones para plantas eólicas en cuanto al amortiguamiento de oscilaciones de carácter electromecánico.

10 ANÁLISIS MODOS INESTABLES

Tal como fue señalado en los resultados de los análisis modales, fueron encontrados modos inestables, los cuales si bien no corresponden a modos electromecánicos, cobra relevancia incluir análisis al respecto.

Cabe señalar que estos modos, al no corresponder a modos electromecánicos, su amortiguamiento no puede modificarse mediante la incorporación de PSS. Por lo tanto, no forma parte del alcance de este estudio definir mejoras en los controladores o donde corresponda para corregir el amortiguamiento de dichos modos.

En este contexto, los análisis están más bien enfocados en detallar y caracterizar los modos inestables, en lo posible detectar qué elementos participan, y posibles acciones para mitigar su impacto en la operación.

Los modos inestables más relevantes están asociados a las unidades de Central Kelar y también fueron observados modos asociados a parques eólicos.

10.1 Modos Locales Kelar

La central Kelar cuenta con tres unidades: TG1 con una potencia nominal de 180 [MW], TG2 con una potencia nominal de 177 [MW] y TV con una potencia nominal de 170 [MW]. Por lo tanto, como estas unidades tienen una potencia nominal superior a 50[MW], cada una de ellas debe contar con PSS según establece la NT SyCS. Por otra parte, de acuerdo con los antecedentes considerados, se establece que dichas unidades efectivamente cuentan con sus PSS homologados y habilitados.

Dada la evidencia de inestabilidad de pequeña señal para las unidades de la Central Kelar, a continuación, se caracterizan en detalle los modos inestables no oscilatorios observados.

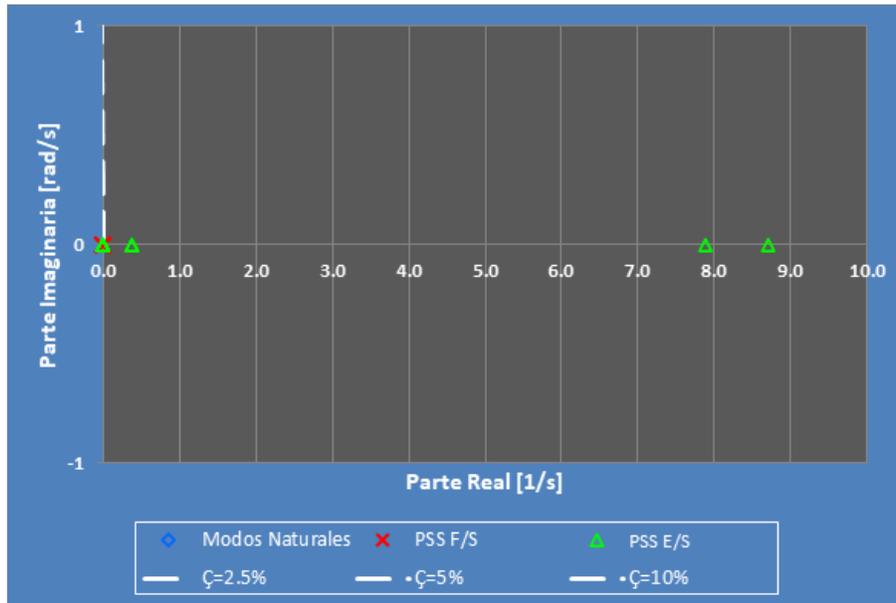


Figura 67: Modos Kelar (Caso Testigo E2 DA Noche Dic 2024)

10.1.1 Caracterización del Modo

Las participaciones más relevantes para estos modos corresponden a la TG1 y la TG2, no observándose una participación significativa para la unidad TV.

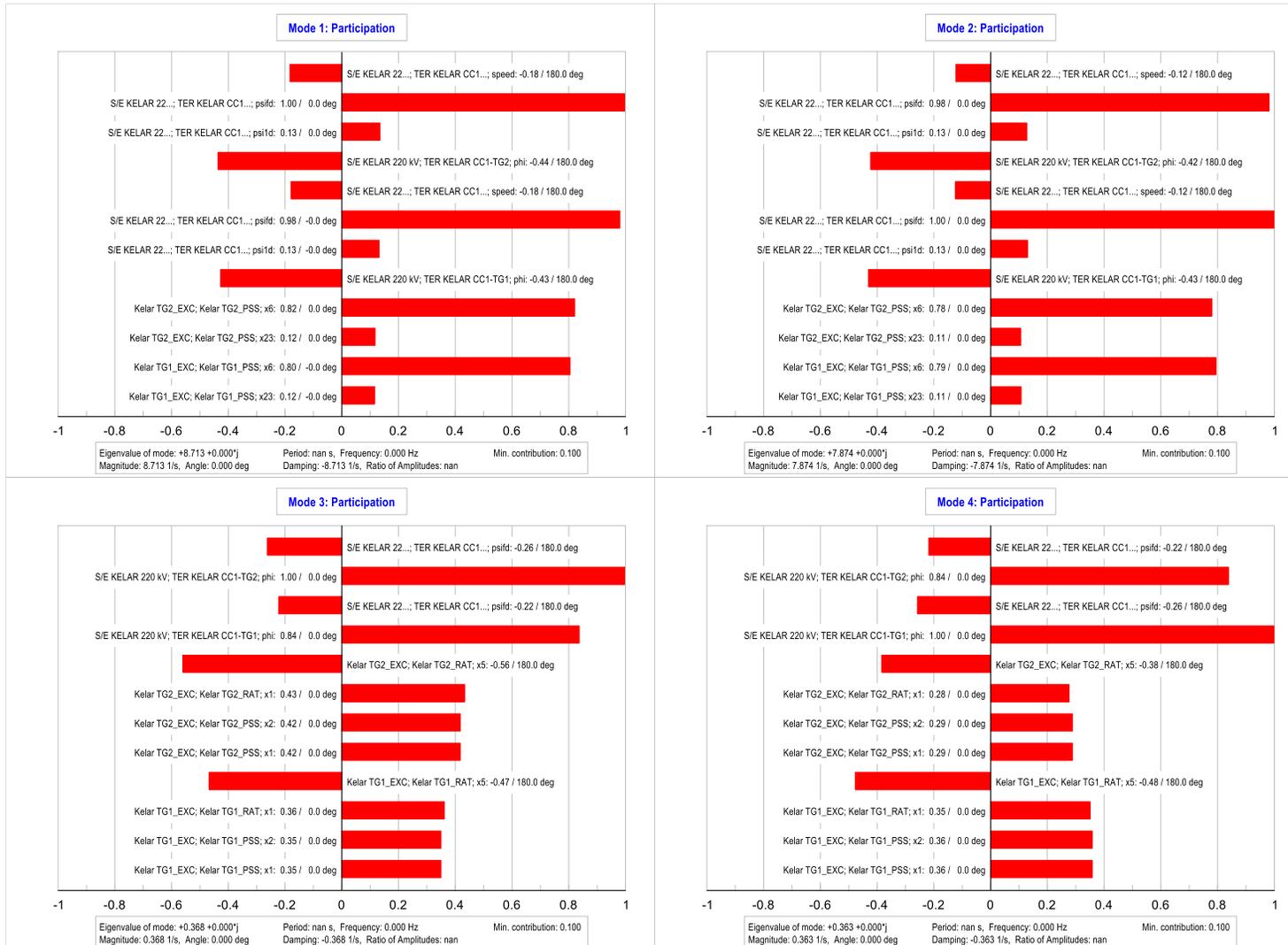


Figura 68: Participaciones en Modos Kelar (Caso Testigo E2 DA Noche Dic 2024)

Tabla 68: Modos Kelar¹

Escenario	Modo	P. Real [1/s]	P. Imag [rad/s]	Mag. [1/s]	Ang. [°]	Frec. [Hz]	Periodo [s]	Xi	CTA [s]	A1/A2
E2_N	1	8.71	0.00	8.71	0.00	0.00	inf	-100.00%	0.11	0.00
E2_N	2	7.87	0.00	7.87	0.00	0.00	inf	-100.00%	0.13	0.00
E2_N	3	0.37	0.00	0.37	0.00	0.00	inf	-100.00%	2.72	0.00
E2_N	4	0.36	0.00	0.36	0.00	0.00	inf	-100.00%	2.76	0.00
E2_C1	1	8.70	0.00	8.70	0.00	0.00	inf	-100.00%	0.11	0.00
E2_C1	2	7.85	0.00	7.85	0.00	0.00	inf	-100.00%	0.13	0.00
E2_C1	4	0.36	0.00	0.36	0.00	0.00	inf	-100.00%	2.75	0.00
E2_C1	3	0.37	0.00	0.37	0.00	0.00	inf	-100.00%	2.71	0.00
E2_C2	1	8.71	0.00	8.71	0.00	0.00	inf	-100.00%	0.11	0.00
E2_C2	2	7.86	0.00	7.86	0.00	0.00	inf	-100.00%	0.13	0.00
E2_C2	3	0.37	0.00	0.37	0.00	0.00	inf	-100.00%	2.71	0.00
E2_C2	4	0.36	0.00	0.36	0.00	0.00	inf	-100.00%	2.76	0.00
E2_C3	1	8.71	0.00	8.71	0.00	0.00	inf	-100.00%	0.11	0.00
E2_C3	2	7.87	0.00	7.87	0.00	0.00	inf	-100.00%	0.13	0.00
E2_C3	3	0.37	0.00	0.37	0.00	0.00	inf	-100.00%	2.72	0.00
E2_C3	4	0.36	0.00	0.36	0.00	0.00	inf	-100.00%	2.76	0.00

Según se detalla en la Tabla 68, estos modos se manifiestan tanto en Red-N, como en Red N-1, pudiéndose apreciar que los modos son prácticamente insensibles a las contingencias analizadas.

10.1.2 Análisis de Sensibilidad del Modo

Para estudiar la sensibilidad del modo Kelar mediante análisis modal, se realiza un barrido desde una consigna de tensión en bornes de 0,95[pu] hasta 1,02[pu]. Lo anterior, considerando que en estas condiciones alcanzaría valores de potencia reactiva admisibles según la carta PQ implementada en la BD DigSILENT Powerfactory del SEN.

Como se puede observar en las gráficas presentadas en la Figura 69 y Figura 70, existe una relación entre el aumento de la tensión en bornes y el comportamiento de los modos inestables 1 y 2, vinculados a Kelar. A medida que la tensión en bornes se incrementa, se evidencia un desplazamiento de estos modos hacia la izquierda en el semiplano derecho. Este fenómeno indica que, aunque los modos tienen una dependencia con la tensión en bornes, y mejoran con un incremento en la misma, el desplazamiento hacia la izquierda es insuficiente para cruzar hacia el semiplano izquierdo antes de que la tensión en bornes alcance el límite superior de 1.05[pu].

¹N: PSS E/S Red N, C1: PSS E/S Red N-1: Changos - Parinas 500kV, C2: PSS E/S Red N-1: Nva. P. Azúcar - Polpaico 500kV y C3: PSS E/S Red N-1: Charrúa - Ancoa 500kV

Por otro lado, el análisis de las gráficas de la Figura 71 y Figura 72 revelan que, a medida que la tensión en bornes se reduce, se observa un desplazamiento de los modos inestables 3 y 4, asociados a Kelar, hacia la izquierda en el semiplano derecho. Este comportamiento sugiere que, aunque estos modos dependen de la tensión en bornes y mejoran con una disminución de esta, el desplazamiento hacia la izquierda es insuficiente para que crucen hacia el semiplano izquierdo antes de que la tensión en bornes descienda al límite inferior de 0.95[pu].

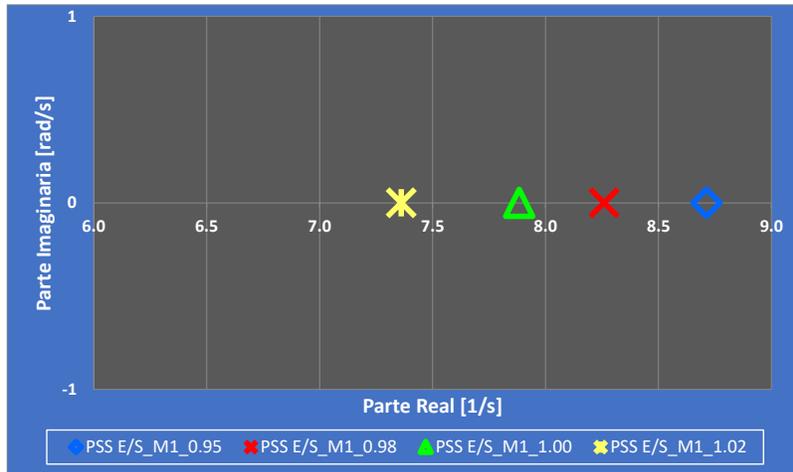


Figura 69: Modo 1 inestable Kelar en función de tensión en bornes (E2 DA Noche Dic 2024)

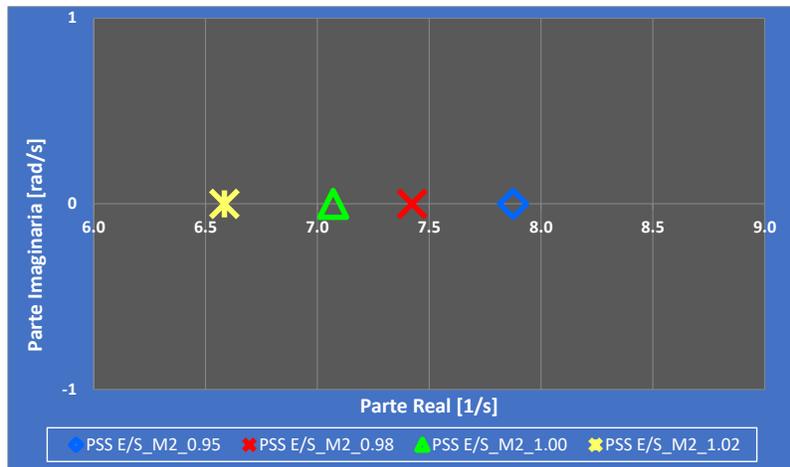


Figura 70: Modo 2 inestable Kelar en función de tensión en bornes (E2 DA Noche Dic 2024)

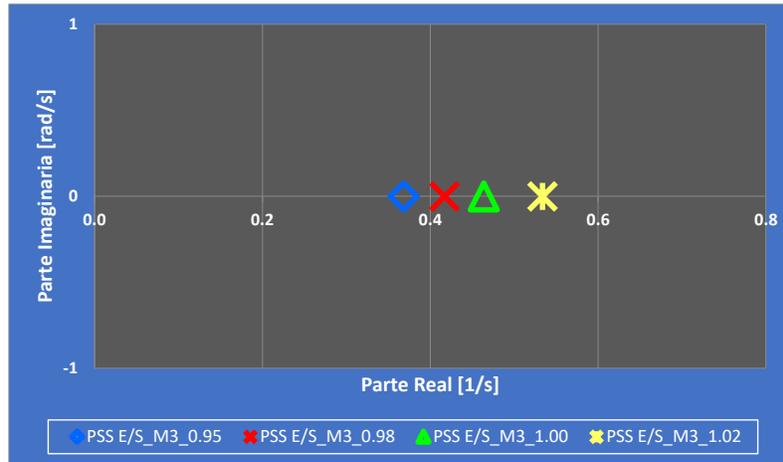


Figura 71: Modo 3 inestable Kelar en función de tensión en bornes (E2 DA Noche Dic 2024)

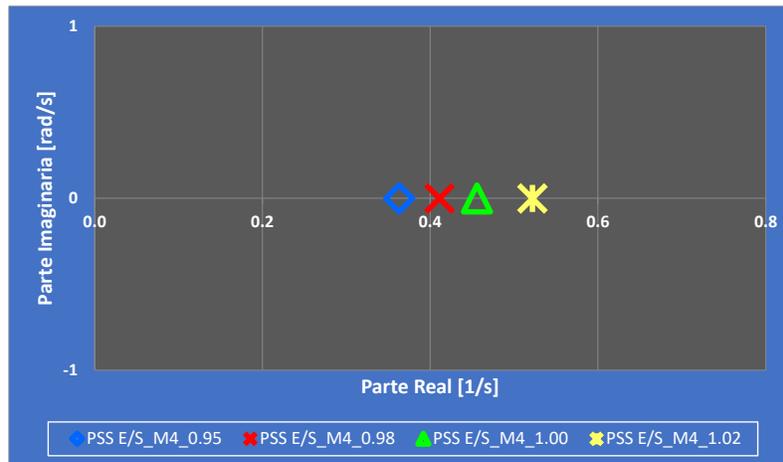


Figura 72: Modo 4 inestable Kelar en función de tensión en bornes (E2 DA Noche Dic 2024)

Por otro lado, según se aprecia en la Figura 67, no se observan participaciones significativas asociadas a velocidades rotóricas en los modos caracterizados. Sino que, más bien hay participaciones significativas para otras variables de estado como la correspondiente al flujo de la excitación y su eventual interacción con variables de estado asociadas a los PSS, especialmente en las unidades TG1 y TG2.

Por lo tanto, se realizó un análisis modal considerando los PSS F/S para las unidades TG1, TG2 y TV, sin apreciar modos inestables.

En conclusión, en caso de que las unidades de Central Kelar se encuentren con sus PSS F/S no habría problemas de inestabilidad de pequeña señal. Sin embargo, por tratarse de unidades cuya potencia nominal es mayor a 50 [MW], lo anterior no estaría en consonancia con la NT SyCS. A lo anterior, debe sumarse el hecho de que no hay evidencia en la operación real de problemas con Central Kelar.

Adicionalmente, se llevará a cabo un estudio detallado del comportamiento dinámico de las unidades de la Central Kelar frente a distintas perturbaciones, utilizando para ello el modelo íntegro

del Sistema Eléctrico Nacional (SEN) sin linealizar. Este enfoque incorpora todos los componentes no lineales que, en un análisis modal, se suelen tratar mediante aproximaciones de primer orden.

10.1.3 Análisis Estabilidad ante Perturbaciones

Se realiza una verificación de la respuesta dinámica de las unidades de Central Kelar ante las siguientes contingencias.

- Severidad 4 de la Línea Kelar – Kapatur 220 kV
- Severidad 5 de una unidad de Central Angamos

Cabe señalar que, este es un ejercicio teórico para buscar la excitación del modo inestable. Los resultados para las simulaciones descritas se muestran en la Figura 73 y en la Figura 74, y cuyos resultados se resumen en la Tabla 69.

Tabla 69. Resultados Simulación Dinámica Pullinque.

Elemento Fallado	Tipo Falla	Estabilidad							Comportamiento Tensión			Frecuencia
		Amortiguamiento						Ángulo $\delta < 120^a$	Vmin $\geq 0,7$ en 10ms	V $\geq 0,8$ en 1s	V en $\pm 10\%$ en 20s	fmin $\geq 48,3$
		Línea	Transf. Perm. [MW]	Transf. Peak A1 [MW]	Transf. Peak A2 [MW]	A1/A2	Fact. Amort.					
Kelar – Kapatur 220 kV C1	Falla 2F-T Despeje en 120 ms	Kelar – Kapatur 220 kV C2	374.7	502.5	447.2	1.8	9.0%	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple
TER ANGAMOS U1	Desconexión Intempestiva	Kelar – Kapatur 2x220 kV	207.2	227.3	213.7	3.1	17.7%	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple

Con los resultados anteriores se pueden descartar los riesgos de inestabilidad transitoria debido a que la simulación dinámica considera todas la dinámica asociada a los modelos de los elementos del sistema, mientras que el análisis modal es una aproximación lineal del mismo.

Por otra parte, en los informes de revisión de los modelos de Central Kelar [7] se encontraron inestabilidades de carácter numérico asociadas al modelo y no a la Central.

- Una de las causas probables de esta inestabilidad, es una mal parametrización en el control de la turbina a gas. La oscilación del modelo se verifica con y sin PSS.
- Se observa, que al aumentar el paso de integración² a 5 [ms] y a 10 [ms], el modelo es estable, lo que pudiera significar algún modo inestable en el modelo, entre otros.
- Se concluye que se recomienda revisar el modelo por esta inestabilidad (y consultar paralelamente con DlgSILENT por posibles incompatibilidades en el algoritmo de simulación de la versión).

² Valor paso de integración base de datos = 2 [ms].

Finalmente, se recomienda la instruir la revisión de los modelos para las unidades de Central Kelar tal que haya evidencia de amortiguamiento de oscilaciones electromecánicas de carácter local e interárea, además de resolver los problemas de estabilidad de carácter numérico. Cabe señalar que, los pasos de integración usualmente empleados corresponden al orden de 1-2 [ms] para mantener un equilibrio entre modelos ERV, FACTS y unidades sincrónicas. Por lo tanto, aumentar en un orden de magnitud los pasos de integración no puede ser una solución de carácter definitivo.

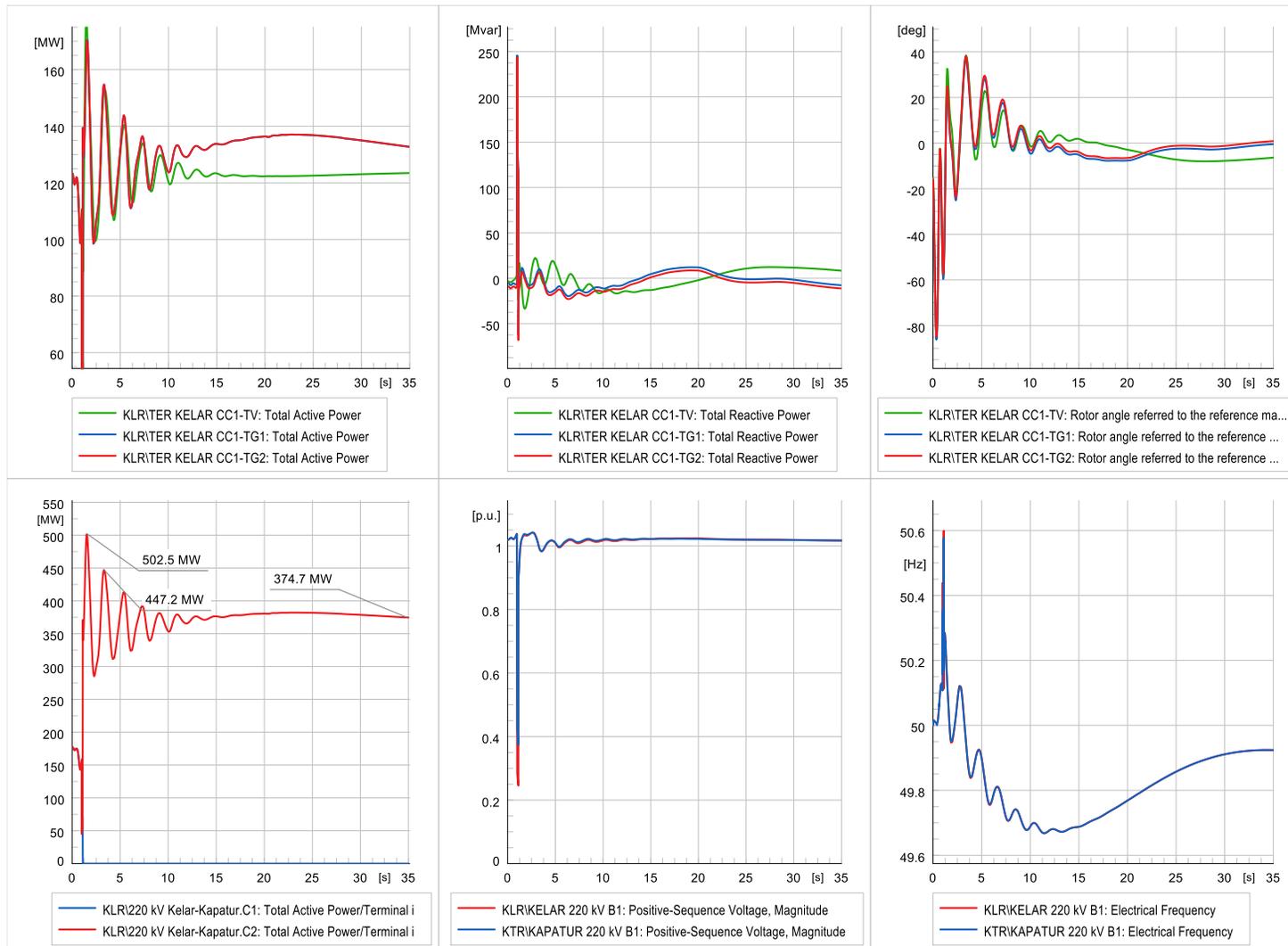


Figura 73: Respuesta ante Contingencia de Severidad 4 de la Línea Kelar – Kapatur 220kV

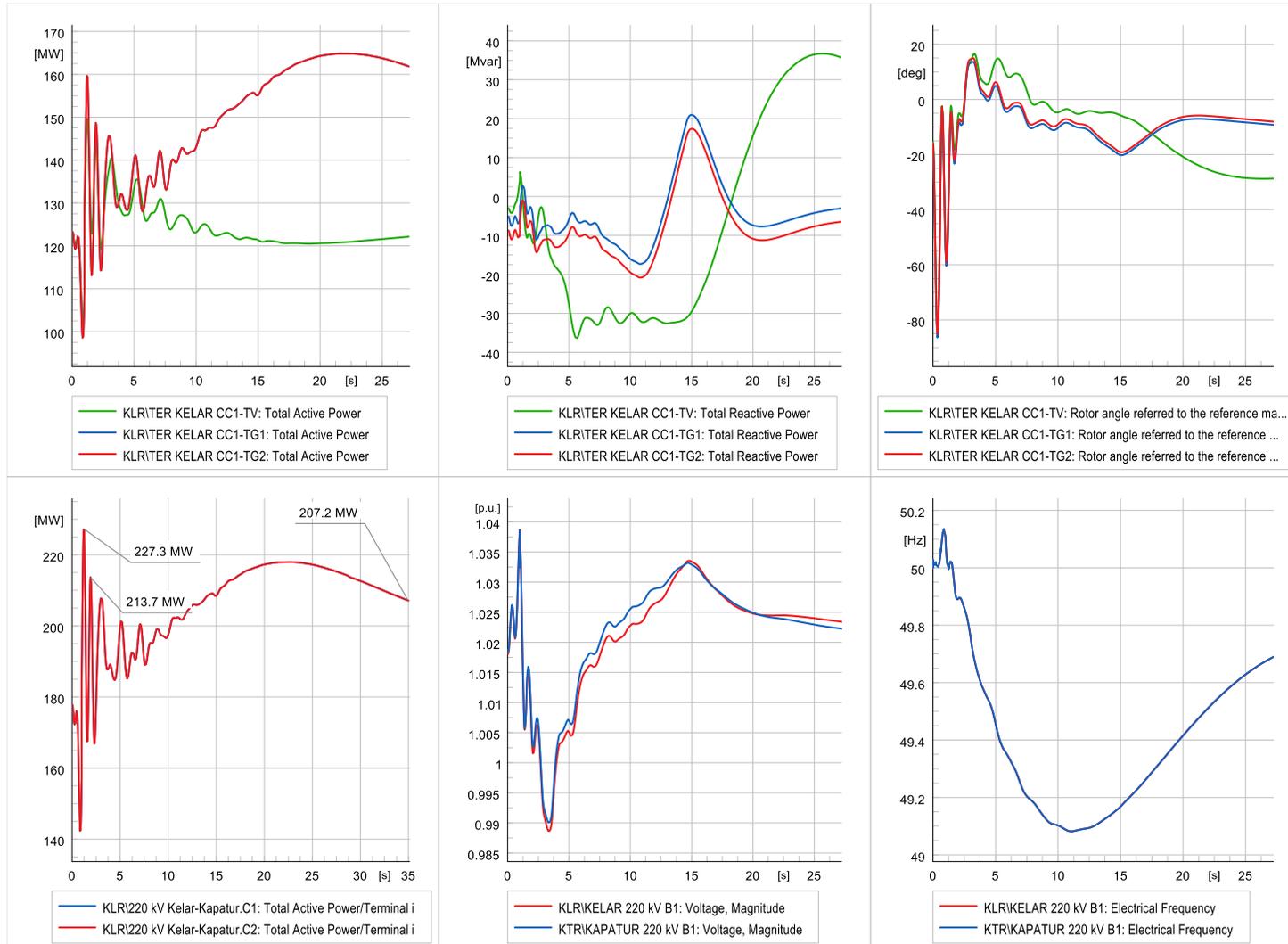


Figura 74: Respuesta ante Contingencia de Severidad 5 de una unidad de Central Angamos

10.2 Modos Locales inestables con participación significativa de Plantas ERV

10.2.1 Modo PFV Machicura

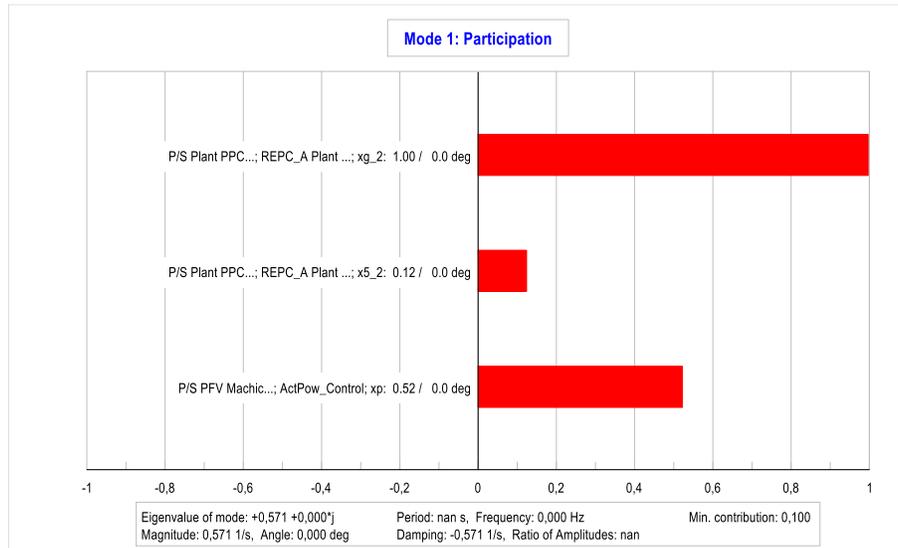


Figura 75: Modo Machicura (Caso Testigo E3 DB Día Abr 2024)

Tabla 70: Modo Machicura

Escenario	Modo	P. Real [1/s]	P. Imag [rad/s]	Mag. [1/s]	Ang. [°]	Frec. [Hz]	Periodo [s]	Xi	CTA [s]	A1/A2
E1	1	0.57	0.00	0.57	0.00	0.00	inf	-100.00	1.75	0.00
E3	1	0.57	0.00	0.57	0.00	0.00	inf	-100.00	1.75	0.00

Este modo se manifiesta de manera exclusiva en el Parque fotovoltaico Machicura, específicamente en el controlador de planta, presentándose como un modo no oscilatorio inestable. En cuanto a las participaciones, se observa la ausencia de unidades sincrónicas, siendo las contribuciones significativas atribuibles únicamente al Parque fotovoltaico Machicura.

10.2.2 Modo PFV Cerro Dominador

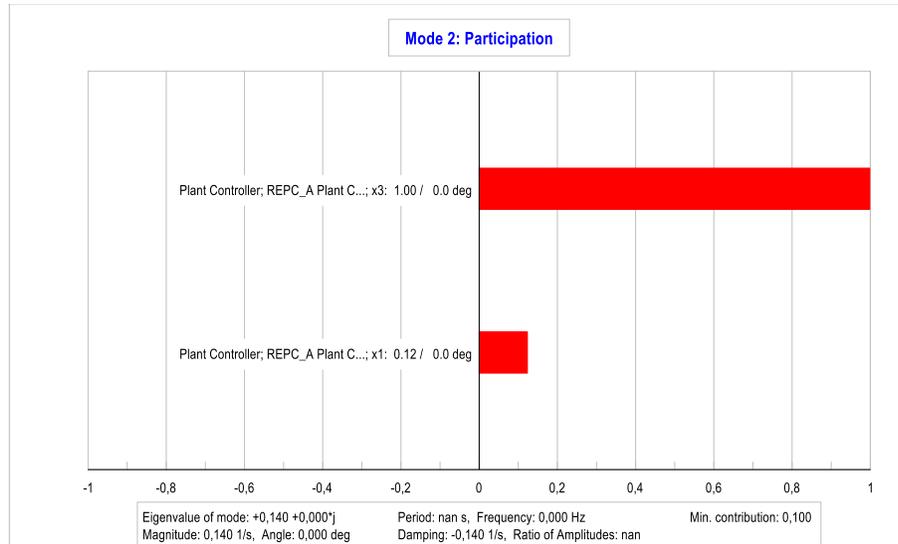


Figura 76: Modo PFV Cerro Dominador (Caso Testigo E1 DA Mar 2024)

Tabla 71: Modo PFV Cerro Dominador

Escenario	Modo	P. Real [1/s]	P. Imag [rad/s]	Mag. [1/s]	Ang. [°]	Frec. [Hz]	Periodo [s]	Xi	CTA [s]	A1/A2
E1	2	0.14	0.00	0.14	0.00	0.00	inf	-100.00	7.15	0.00

Este modo se manifiesta de manera exclusiva en el Parque fotovoltaico Cerro Dominador, presentándose como un modo no oscilatorio inestable. En cuanto a las participaciones, se observan participaciones significativas en variables de estado del control de planta de PFV Cerro Dominador con ausencia de participación de unidades sincrónicas.

10.2.3 Modo PE Sierra Gorda

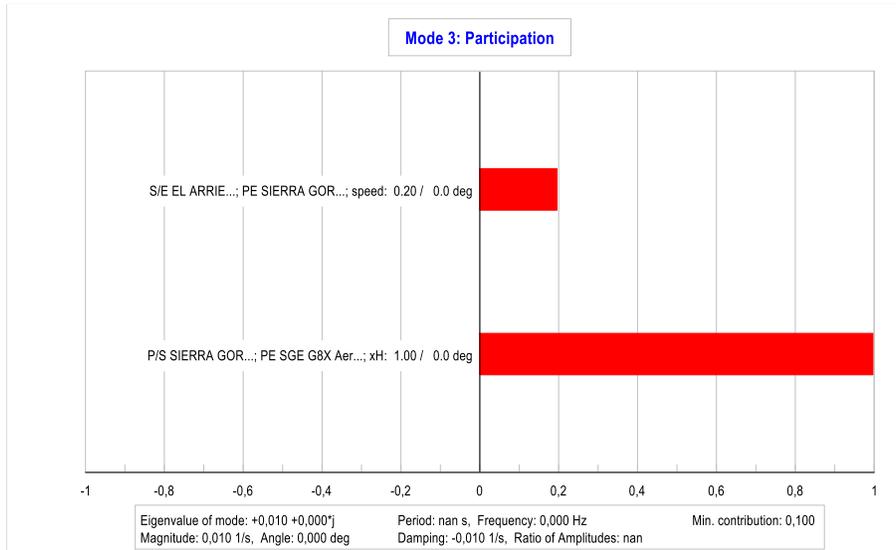


Figura 77: Modo Sierra Gorda (Caso Testigo E1 DA Mar 2024)

Tabla 72: Modo Sierra Gorda

Escenario	Modo	P. Real [1/s]	P. Imag [rad/s]	Mag. [1/s]	Ang. [°]	Frec. [Hz]	Periodo [s]	ξ	CTA [s]	A1/A2
E1	3	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	inf	-100.00	96.34	0.00

Este modo se manifiesta de manera exclusiva en el Parque eólico Sierra Gorda, presentándose como un modo no oscilatorio inestable. En cuanto a las participaciones, se observa la ausencia de unidades sincrónicas, siendo las contribuciones significativas atribuibles únicamente al Parque eólico Sierra Gorda. Cabe señalar que las participaciones significativas se encuentran asociadas a la velocidad del modelo de generador asincrónico y al control aeromecánico.

10.2.4 Modo PE Los Olmos

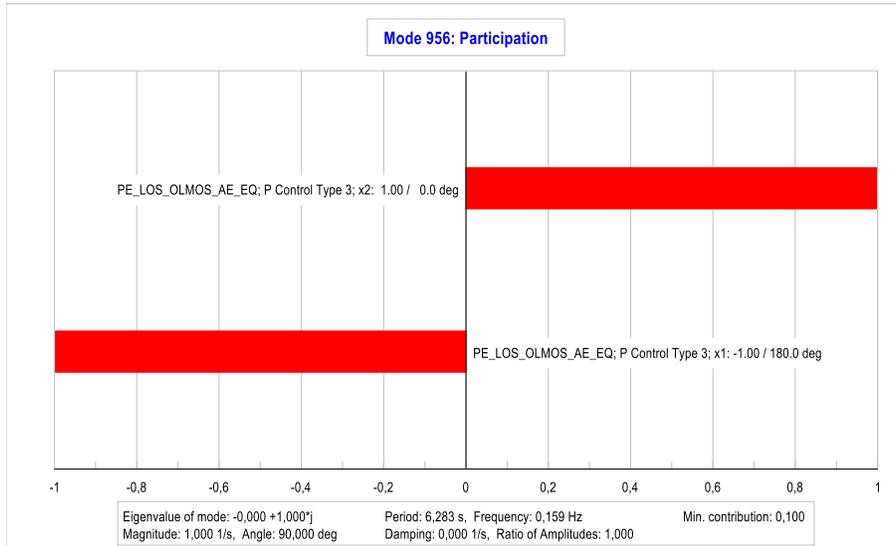


Figura 78: Modo Los Olmos (Caso Testigo E1 DA Día Mar 2024)

Tabla 73: Modo Los Olmos

Escenario	Modo	P. Real [1/s]	P. Imag [rad/s]	Mag. [1/s]	Ang. [°]	Frec. [Hz]	Periodo [s]	Xi	CTA [s]	A1/A2
E1	956	0.00	1.00	1.00	90.00	0.16	6.28	0.00	inf	1.00
E3	15	0.00	1.00	1.00	90.00	0.16	6.28	0.00	inf	1.00

Este modo se manifiesta de manera exclusiva en el Parque eólico Los Olmos, presentándose como un modo oscilatorio no amortiguado con una frecuencia de 0,16 [Hz]. En cuanto a las participaciones, se observa la ausencia de unidades sincrónicas, siendo las contribuciones significativas atribuibles únicamente al Parque eólico Los Olmos.

10.2.5 Modo PE Llano del viento

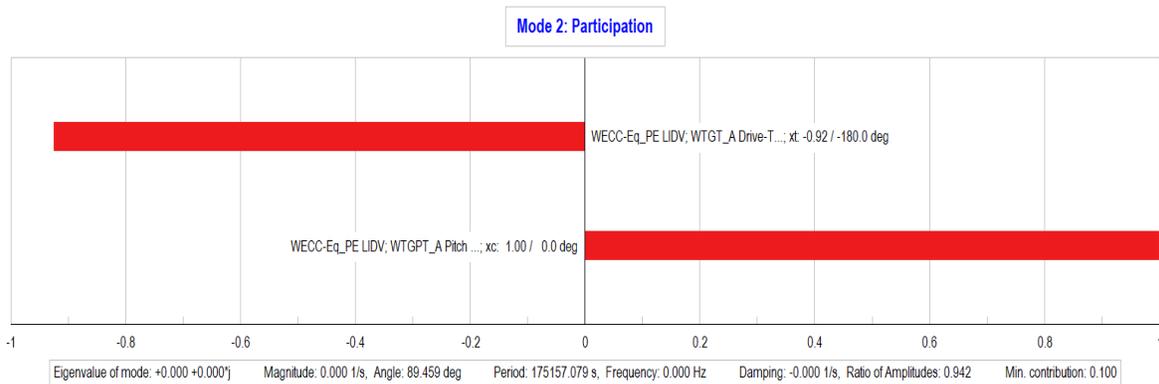


Figura 79: Modo Llano del Viento (Caso Testigo E3 DB Día Abr 2024)

Tabla 74: Modo Llano del Viento

Escenario	Modo	P. Real [1/s]	P. Imag [rad/s]	Mag. [1/s]	Ang. [°]	Frec. [Hz]	Periodo [s]	Xi	CTA [s]	A1/A2
E3	2	0.00	3.60E-05	0.00	90.00	0.00	174532.93	0.00	inf	1.00

Este modo se manifiesta de manera exclusiva en el Parque eólico Llano del Viento, presentándose como un modo oscilatorio no amortiguado con una frecuencia en torno a cero [Hz]. En cuanto a las participaciones, se observa la ausencia de unidades sincrónicas, siendo las contribuciones significativas atribuibles únicamente al Parque eólico Llano del Viento.

10.2.6 Conclusiones Modos Locales inestables ERV

En relación con los modos inestables donde se aprecia que existe una participación significativa asociada predominantemente a unidades de plantas ERV se puede señalar que:

- Según establece la NT SyCS vigente, las exigencias en relación con PSS son aplicables solo a las unidades sincrónicas y no se establece ni especifica qué requerimiento es exigible para los parques ERV (fotovoltaicos y eólicos).
- Debido a que los factores de participación de las velocidades rotóricas son despreciables, no existen unidades sincrónicas que puedan adicionar amortiguamiento mecánico al eje.
- La mayoría de estos modos corresponde a modos inestables no oscilatorios, excepto en los modos asociados al PE Los Olmos y al PE Llano del Viento, los cuales corresponden a modos oscilatorios no amortiguados. Por otra parte, la casi totalidad de las variables de estado que participan en estos modos corresponde a variables de control asociadas a unidades ERV.
- No existe evidencia en la operación real del SEN de problemas de oscilaciones inestables indeseadas asociadas a unidades ERV.

Por lo tanto, no se contempla que sea requerido por el momento dar recomendaciones para plantas ERV en cuanto al comportamiento asociado a eventuales modos inestables.

11 RESUMEN RESULTADOS CARACTERIZACIÓN MODOS ELECTROMECAÑICOS CRÍTICOS Y RECOMENDACIONES

A partir de los análisis efectuados, es posible determinar los modos críticos que es necesario amortiguar por cada una de las centrales y unidades que tienen una participación apreciable (sobre 0,1 [pu]). Cabe señalar que los modos críticos están definidos en base a los códigos establecidos a lo largo de este informe, los cuales se caracterizan por la zona donde ubican las unidades que tienen una participación apreciable y además con el rango de frecuencias de oscilación.

A continuación, se presenta una tabla resumen del análisis de estabilidad de pequeña señal para el SEN, incluyendo los modos más críticos relevantes, las unidades con mayor participación, el estado de homologación de éstas, incluyendo sus PSS y las recomendaciones de sintonización de PSS.

Se recuerda que, conforme lo indicado en punto 6.4. las unidades que deberán ser homologadas deben verificar que no producen oscilaciones indeseadas.

Tabla 75: Resumen Resultados Caracterización Modos Electromecánicos Críticos Relevantes

UNIDAD	MODOS CRÍTICOS	PARTICIPACIÓN	MODELOS HOMOLOGADOS	PSS HOMOLOGADO	POTENCIA [MW]	COMENTARIOS	RECOMENDACIÓN
HP ALFALFAL U2	Alfalfal 1,5 [Hz] 5,7%	Alta	SI	SI	80,75	Unidad con alta participación en modos intraplanta	Se propone revisión de ajustes de sus PSS. Conforme lo Indicado en punto 6.4.
HP ALTO RENAICO U1	Alto Renaico - Renaico – Picoiquén 3,3 [Hz] 8,9%	Media	SI	NO	1,445	Unidad con participación media en modos críticos interplanta.	Se propone seguir con la situación actual
HE ANCOA U1	Ancoa 1,28 [Hz] 9,3%	Alta	SI	NO	14,4	Unidad con alta participación en modos críticos intraplanta.	Se propone seguir con la situación actual
HE ANCOA U2	Ancoa 1,28 [Hz] 9,3%	Alta	SI	NO	14,4	Unidad con alta participación en modos críticos intraplanta.	Se propone seguir con la situación actual
HE ANGOSTURA U3	Angostura 0,76 [Hz] 9,0%	Alta	SI	SI	45,18	Unidad con alta participación en modos críticos intraplanta.	Se propone seguir con la situación actual
HE CANUTILLAR U1	Mocho – Pilmaiquén – Cumbre - Pullinque 1,30 [Hz] 9,37%	Baja	SI	SI	66,5	Unidad con alta o media participación en modos críticos intraplanta e interplanta.	Se propone revisión de ajustes de sus PSS. Conforme lo Indicado en punto 6.4.
	Pilmaiquén - Canutillar 1,62[Hz] 8,72%	Baja					
	Área Sur: Palmar - Correntoso - Cumbres - Rucatayo - Canutillar 1,57 [Hz] 9,75%	Media					
	Canutillar 1,79 [Hz]	Alta					
Capullo – Cumbres – Mocho – Pulelfu – Callao – Carilafquén 1 [Hz]	Baja						
HE CANUTILLAR U2	Mocho – Pilmaiquén – Cumbre - Pullinque 1,30 [Hz] 9,37%	Baja	SI	SI	66,5	Unidad con alta o media participación en modos críticos intraplanta e interplanta.	Se propone revisión de ajustes de sus PSS. Conforme lo Indicado en punto 6.4.
	Pilmaiquén - Canutillar 1,62[Hz] 8,72%	Baja					
	Área Sur: Palmar - Correntoso - Cumbres - Rucatayo - Canutillar 1,57 [Hz] 9,75%	Media					
	Canutillar 1,79 [Hz]	Alta					
Capullo – Cumbres – Mocho – Pulelfu – Callao – Carilafquén 1 [Hz]	Baja						
HP CAPULLO U1	Área Sur: Palmar - Correntoso - Cumbres - Rucatayo - Canutillar 1,57 [Hz] 9,75%	Baja	NO	NO	14,45	Unidad con baja participación en modos críticos interplanta.	Se propone homologación de modelos
	Capullo – Cumbres – Mocho – Pulelfu – Callao – Carilafquén 1 [Hz] 7,1%	Alta					

UNIDAD	MODOS CRÍTICOS	PARTICIPACIÓN	MODELOS HOMOLOGADOS	PSS HOMOLOGADO	POTENCIA [MW]	COMENTARIOS	RECOMENDACIÓN
HP CARENA (U1-U4)	Carena – CMPC Cordillera – Santa Marta 2,09 [Hz] 9%	Alta	NO	NO	4x2,4	Unidad con alta participación en modos críticos interplanta.	Se propone homologación de modelos
HP CARILAFQUÉN (U1-U2)	Carilafquén 0,86 [Hz] 4,72%	Alta	SI	NO	2x10,8	Unidad con alta participación en modos críticos intraplanta.	Se propone seguir con la situación actual
TER CELCO U1	Viñales - Celco 0,89 [Hz] 9,16%	Baja	NO	NO	21,1	Unidad con baja participación en modos críticos interplanta.	Se propone homologación de modelos
HP CHACAYES U1	Chacayes – Sauzal – Sauzalito 1,25 [Hz]	Alta	SI	SI	59,04	Unidad con alta participación en modos críticos interplanta.	Se propone revisión de ajustes de sus PSS. Conforme lo Indicado en punto 6.4.
HP CHACAYES U2	Chacayes – Sauzal – Sauzalito 1,25 [Hz]	Alta	SI	SI	59,04	Unidad con alta participación en modos críticos interplanta.	Se propone revisión de ajustes de sus PSS. Conforme lo Indicado en punto 6.4.
HE CIPRESES U1	Cipreses - Curillinque - Isla 1,11[Hz] 6,73%	Media	SI	SI	29,45	Unidad con alta o media participación en modos críticos intraplanta e interplanta.	Se propone revisión de ajustes de sus PSS. Conforme lo Indicado en punto 6.4.
	Cipreses – Curillinque – Isla – Lautaro 1,19[Hz] 9,9%	Media					
	Cipreses 1,25 [Hz]	Alta					
HE CIPRESES U2	Cipreses - Curillinque - Isla 1,11[Hz] 6,73%	Baja	SI	SI	29,45	Unidad con baja participación en modos críticos interplanta.	Se propone seguir con la situación actual
HE CIPRESES U3	Cipreses - Curillinque - Isla 1,11[Hz] 6,73%	Alta	SI	SI	29,45	Unidad con alta o media participación en modos críticos intraplanta e interplanta.	Se propone revisión de ajustes de sus PSS. Conforme lo Indicado en punto 6.4.
	Cipreses – Curillinque – Isla – Lautaro 1,19[Hz] 9,9%	Alta					
	Cipreses 1,25 [Hz]	Media					
TER CMPC CORDILLERA U1	Carena – CMPC Cordillera – Santa Marta 2,09 [Hz] 9%	Alta	NO	NO	52,9975	Unidad con alta participación en modos críticos interplanta	Se propone homologación de modelos
TER CMPC PACIFICO U1	CMPC Pacífico 1,71 [Hz] 6,8%	Alta	NO	NO	36,32	Unidad con alta participación en modos críticos intraplanta.	Se propone homologación de modelos
HE COLBUN U2	Colbún 1,61 [Hz] 2,9%	Alta	SI	SI	209	Unidad con alta participación en modos críticos intraplanta.	Se propone revisión de ajustes de sus PSS. Conforme lo Indicado en punto 6.4.
HP CONVENTO VIEJO U1	Convento Viejo 2,47 [Hz]	Alta	NO	NO	9	Unidad con alta participación en modos críticos intraplanta.	Se propone homologación de modelos

UNIDAD	MODOS CRÍTICOS	PARTICIPACIÓN	MODELOS HOMOLOGADOS	PSS HOMOLOGADO	POTENCIA [MW]	COMENTARIOS	RECOMENDACIÓN
HP CORRENTOSO U1	Área Sur: Palmar - Correntoso - Cumbres - Rucatayo - Canutillar 1,57 [Hz] 9,75%	Baja	NO	NO	8	Unidad con alta participación en modos críticos intraplanta.	Se propone homologación de modelos
	Correntoso 1,66 [Hz] 9,8%	Alta					
HP CUMBRES U1	Área Sur: Palmar - Correntoso - Cumbres - Rucatayo - Canutillar 1,57 [Hz] 9,75%	Media	NO	NO	10,2	Unidad con participación media en modos interplanta	Se propone homologación de modelos
	Mocho - Pilmaiquén - Cumbre - Pullinque 1,30 [Hz] 9,37%	Media					
	Capullo - Cumbres - Mocho - Pulelfu - Callao - Cariafquén 1 [Hz] 7,1%	Baja					
HP CUMBRES U2	Área Sur: Palmar - Correntoso - Cumbres - Rucatayo - Canutillar 1,57 [Hz] 9,75%	Baja	NO	NO	10,2	Unidad con participación baja en modos interplanta	Se propone homologación de modelos
	Mocho - Pilmaiquén - Cumbre - Pullinque 1,30 [Hz] 9,37%	Baja					
	Capullo - Cumbres - Mocho - Pulelfu - Callao - Cariafquén 1 [Hz] 7,1%	Baja					
HP CURILLINQUE U1	Cipreses - Curillinque - Isla 1,11[Hz] 6,73%	Baja	SI	SI	85,5	Unidad con participación media en modos interplanta	Se propone revisión de ajustes de sus PSS. Conforme lo Indicado en punto 6.4.
	Cipreses - Curillinque - Isla - Lautaro 1,19[Hz] 9,9%	Media					
TER ENERGIA PACIFICO U1	Energía Pacífico 1,39 [Hz]	Alta	NO	NO	16	Unidad con alta participación en modos críticos intraplanta.	Se propone homologación de modelos
HP ISLA U1	Cipreses - Curillinque - Isla 1,11[Hz] 6,73%	Baja	SI	SI	33,99955	Unidad con participación media en modos interplanta	Se propone revisión de ajustes de sus PSS. Conforme lo Indicado en punto 6.4.
	Cipreses - Curillinque - Isla - Lautaro 1,19[Hz] 9,9%	Media					
HP ISLA U2	Cipreses - Curillinque - Isla 1,11[Hz] 6,73%	Baja	SI	SI	33,99955	Unidad con participación media en modos interplanta	Se propone revisión de ajustes de sus PSS. Conforme lo Indicado en punto 6.4.
	Cipreses - Curillinque - Isla - Lautaro 1,19[Hz] 9,9%	Media					
HP ITATA U1	Itata 1,02 [Hz] 7,8%	Alta	SI	NO	10,8	Unidad con alta participación en modos críticos intraplanta.	Se propone seguir con la situación actual
HP JUNCAL U1	Juncal 1,45 [Hz] 8,7%	Alta	SI	NO	29,7	Unidad con alta participación en modos críticos intraplanta.	Se propone seguir con la situación actual

UNIDAD	MODOS CRÍTICOS	PARTICIPACIÓN	MODELOS HOMOLOGADOS	PSS HOMOLOGADO	POTENCIA [MW]	COMENTARIOS	RECOMENDACIÓN
HP LAS LAJAS U1	Interárea CN-CS-Sur 0,91[Hz] 5,97%	Alta	SI	SI	138,6	Unidad con alta participación en modos críticos interárea	Se propone revisión de ajustes de sus PSS. Conforme lo Indicado en punto 6.4.
	Las Lajas 0,77 [Hz] 9,6%	Alta					
HP LAS LAJAS U2	Interárea CN-CS-Sur 0,91[Hz] 5,97%	Alta	SI	SI	138,6	Unidad con alta participación en modos críticos interárea	Se propone revisión de ajustes de sus PSS. Conforme lo Indicado en punto 6.4.
	Las Lajas 0,77 [Hz] 9,6%	Alta					
TER LAUTARO U1	Lautaro - Mocho 1,16[Hz] 8,38%	Alta	NO	NO	25,5	Unidad con alta o media participación en modos críticos intraplanta e interplanta.	Se propone homologación de modelos
	Cipreses – Curillinque – Isla – Lautaro 1,19[Hz] 9,9%	Baja					
	Lautaro 1,64 [Hz] 7,2%	Alta					
TER LAUTARO U2	Lautaro - Mocho 1,16[Hz] 8,38%	Baja	NO	NO	20	Unidad con baja participación en modos interplanta	Se propone homologación de modelos
	Lautaro 1,64 [Hz] 7,2%	Media					
HP LOS MOLLES U1	Los Molles 2,11 [Hz] 3,1%	Alta	NO	NO	8	Unidad con alta participación en modos críticos intraplanta.	Se propone homologación de modelos
HP LOS MOLLES U2	Los Molles 2,11 [Hz] 3,1%	Alta	NO	NO	8	Unidad con alta participación en modos críticos intraplanta.	Se propone homologación de modelos
HP LOS QUILOS U1	Los Quilos 1,71[Hz] 8,4%	Alta	SI	SI	11,05	Unidad con alta participación en modos críticos intraplanta.	Se propone revisión de modelos para correcto funcionamiento en análisis RMS y Modal
HP LOS QUILOS U2	Los Quilos 1,71[Hz] 8,4%	Alta	SI	SI	11,05	Unidad con alta participación en modos críticos intraplanta.	Se propone revisión de modelos para correcto funcionamiento en análisis RMS y Modal
HE MACHICURA U2	Machicura 1,15[Hz] 4,8%	Alta	SI	NO	53,2	Unidad con alta participación en modos críticos intraplanta.	Se propone revisión de ajustes de sus PSS. Conforme lo Indicado en punto 6.4.
HP MALALCAHUELLO (U1-U2)	Malalcahuello 1,33 [Hz]	Alta	NO	NO	2x4,95	Unidad con alta participación en modos críticos intraplanta.	Se propone homologación de modelos
TER MAPA TG7	Mapa 2,72 [Hz]	Alta	NO	NO	137,5	Unidad con alta participación en modos críticos intraplanta.	Se propone homologación de modelos

UNIDAD	MODOS CRÍTICOS	PARTICIPACIÓN	MODELOS HOMOLOGADOS	PSS HOMOLOGADO	POTENCIA [MW]	COMENTARIOS	RECOMENDACIÓN
HP MOCHO U1	Mocho – Pilmaiquén – Cumbre - Pullinque 1,30 [Hz] 9,37%	Alta	SI	NO	17	Unidad con alta o media participación en modos críticos intraplanta e interplanta.	Se propone seguir con la situación actual
	Lautaro - Mocho 1,16[Hz] 8,38%	Baja					
	Área Sur: Palmar - Correntoso - Cumbres - Rucatayo - Canutillar 1,57 [Hz] 9,75%	Baja					
	Capullo – Cumbres – Mocho – Pulelfu – Callao – Carilafquén 1 [Hz]	Baja					
TER NEHUENCO II CC1-TG	Inter -area CN-CS 1,34[Hz] 9,75%	Alta	SI	SI	255	Unidad con alta participación en modos críticos interárea	Se propone revisión de ajustes de sus PSS. Conforme lo Indicado en punto 6.4.
TER NEHUENCO II CC1-TV	Inter -area CN-CS 1,34[Hz] 9,75%	Baja	SI	SI	139,4	Unidad con baja participación en modos críticos interárea	Se propone seguir con la situación actual
	Chacayes – Sauzal – Sauzalito 1,25 [Hz]	Baja					
TER NUEVA ALDEA III U1	Nueva Aldea 0,77 [Hz]	Alta	NO	NO	70	Unidad con alta participación en modos críticos intraplanta.	Se propone homologación de modelos
TER NUEVA ALDEA U1	Nueva Aldea 0,77 [Hz]	Baja	NO	NO	29,3	Unidad con alta participación en modos críticos intraplanta.	Se propone homologación de modelos
HP PALMAR U1	Área Sur: Palmar - Correntoso - Cumbres - Rucatayo - Canutillar 1,57 [Hz] 9,75%	Baja	NO	NO	4,16	Unidad con alta participación en modos críticos intraplanta.	Se propone homologación de modelos
	Palmar 1,49 [Hz] 9,2%	Alta					
HP PALMUCHO U1	Palmucho 1,90 [Hz] 9,8%	Alta	SI	NO	31,35	Unidad con alta participación en modos críticos intraplanta.	Se propone seguir con la situación actual
HP RIO PICOIQUEN (U1-U2)	Alto Renaico - Renaico – Picoiquén 3,3 [Hz] 8,9%	Alta	NO	NO	2x9,6	Unidad con alta participación en modos críticos interplanta.	Se propone homologación de modelos
HP PILMAIQUÉN U1	Pilmaiquén - Canutillar 1,62[Hz] 8,72%	Alta	NO	NO	4,48	Unidad con alta participación en modos críticos interplanta.	Se propone homologación de modelos
	Pilmaiquén 1,72 [Hz]	Alta					
HP PILMAIQUÉN U2	Pilmaiquén - Canutillar 1,62[Hz] 8,72%	Alta	NO	NO	4,48	Unidad con alta participación en modos críticos interplanta.	Se propone homologación de modelos
	Pilmaiquén 1,72 [Hz]	Alta					
HP PILMAIQUÉN U4	Mocho – Pilmaiquén – Cumbre - Pullinque 1,30 [Hz] 9,37%	Baja	SI	NO	10,8	Unidad con media o baja participación en modos interplanta	Se propone seguir con la situación actual
	Pilmaiquén – Palmar 1,55[Hz] 9,92%	Media					
HP PILMAIQUÉN U5	Mocho – Pilmaiquén – Cumbre - Pullinque 1,30 [Hz] 9,37%	Media	SI	NO	12,4	Unidad con media o baja participación en modos interplanta	Se propone seguir con la situación actual
HP PULELFU U1	Área Sur: Palmar - Correntoso - Cumbres - Rucatayo - Canutillar 1,57 [Hz] 9,75%	Baja	NO	NO	9,01	Unidad con alta participación en modos críticos intraplanta.	Se propone seguir con la situación actual

UNIDAD	MODOS CRÍTICOS	PARTICIPACIÓN	MODELOS HOMOLOGADOS	PSS HOMOLOGADO	POTENCIA [MW]	COMENTARIOS	RECOMENDACIÓN
	Capullo – Cumbres – Mocho – Pulelfu – Callao – Carilafquén 1 [Hz] 7,1%	Baja					
HP PULLINQUE U1	Área Sur: Palmar - Correntoso - Cumbres - Rucatayo - Canutillar 1,57 [Hz] 9,75%	Baja	NO	NO	16,2	Unidad con baja participación en modos interplanta	Se propone homologación de modelos
HP PULLINQUE U2	Mocho – Pilmaiquén – Cumbre - Pullinque 1,30 [Hz] 9,37%	Baja	SI	NO	16,2	Unidad con baja participación en modos interplanta	Se propone seguir con la situación actual
HP PUNTILLA U1	Puntilla 1,77 [Hz] 9,7%	Media	NO	NO	3,84	Unidad con alta participación en modos críticos intraplanta.	Se propone homologación de modelos
HP PUNTILLA U2	Puntilla 1,77 [Hz] 9,7%	Alta	NO	NO	8	Unidad con alta participación en modos críticos intraplanta.	Se propone homologación de modelos
HP PUNTILLA U3	Puntilla 1,77 [Hz] 9,7%	Media	NO	NO	8,0595	Unidad con alta participación en modos críticos intraplanta.	Se propone homologación de modelos
HP RENAICO U1	Alto Renaico - Renaico – Picoiquén 3,3 [Hz] 8,9%	Baja	NO	NO	6,3	Unidad con baja participación en modos interplanta	Se propone homologación de modelos
HP RUCATAYO U1	Mocho – Pilmaiquén – Cumbre - Pullinque 1,30 [Hz] 9,37%	Baja	NO	NO	52,497	Unidad con alta participación en modos críticos interplanta.	Se propone homologación de modelos. Unidad debe contar con PSS conforme NT SyCS
	Área Sur: Palmar - Correntoso - Cumbres - Rucatayo - Canutillar 1,57 [Hz] 9,75%	Alta					
	Pilmaiquén – Palmar 1,55[Hz] 9,92%	Alta					
HP SAN IGNACIO U1	San Ignacio 1,44 [Hz] 4,9%	Alta	SI	NO	33,25	Unidad con alta participación en modos críticos intraplanta.	Se propone seguir con la situación actual
TER SANTA MARTA (U1-U10)	Santa Marta 1,12 [Hz] 3,9%	Alta	NO	NO	8x1,9656	Unidad con alta participación en modos críticos intraplanta.	Se propone homologación de modelos. Unidad debe contar con PSS conforme NT SyCS
TER TOCOPILLA U16-TG-TV	Área Sur: Palmar - Correntoso - Cumbres - Rucatayo - Canutillar 1,57 [Hz] 9,75%	Baja	SI	SI	400	Unidad con baja participación en modos interárea	Se propone seguir con la situación actual
	Capullo – Cumbres – Mocho – Pulelfu – Callao – Carilafquén 1 [Hz]	Baja					
TER TRAPEN (U1-U50)_N1	Área Sur: Palmar - Correntoso - Cumbres - Rucatayo - Canutillar 1,57 [Hz] 9,75%	Baja	NO	NO	12x1,581	Unidad con baja participación en modos interplanta	Se propone homologación de modelos
TER TRAPEN (U1-U50)_N2	Área Sur: Palmar - Correntoso - Cumbres - Rucatayo - Canutillar 1,57 [Hz] 9,75%	Baja	NO	NO	12x1,581	Unidad con baja participación en modos interplanta	Se propone homologación de modelos
TER VALDIVIA U1	Mocho – Pilmaiquén – Cumbre - Pullinque 1,30 [Hz] 9,37%	Baja	SI	SI	70	Unidad con baja participación en modos interplanta	Se propone seguir con la situación actual

UNIDAD	MODOS CRÍTICOS	PARTICIPACIÓN	MODELOS HOMOLOGADOS	PSS HOMOLOGADO	POTENCIA [MW]	COMENTARIOS	RECOMENDACIÓN
	Area Sur: Palmar - Correntoso - Cumbres - Rucatayo - Canutillar 1,57 [Hz] 9,75%	Baja					
TER VIÑALES U1	Viñales - Celco 0,89 [Hz] 9,16%	Alta	SI	NO	40,8	Unidad con alta participación en modos críticos interplanta.	Se propone seguir con la situación actual

12 VERIFICACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DEL SEN

Para los escenarios más exigentes y para las contingencias más críticas desde el punto de vista de las oscilaciones electromecánicas, se efectuaron simulaciones dinámicas de simple contingencia, con objeto de analizar el comportamiento dinámico del SEN.

Para la falla de circuitos en líneas se aplicó una falla bifásica a tierra localizada a una distancia de 5% del largo de la misma línea, próximo al extremo con mayor nivel de cortocircuito. Se considera un despeje simultáneo de la falla mediante la apertura de los interruptores de ambos extremos en un tiempo de 120 [ms].

Se graficaron las variables eléctricas más relevantes para evaluar el comportamiento dinámico del SEN ante fallas, para así poder determinar la recuperación de la tensión, la excursión angular, la recuperación de la frecuencia, como así también el amortiguamiento en líneas cercanas al punto de la falla. Los gráficos que presentan los resultados de las simulaciones dinámicas son incorporados en los anexos de este informe.

En la Tabla 76 se encuentra un resumen detallado con los índices y estándares establecidos en la NT SyCS para la verificación del comportamiento dinámico. Para tanto la frecuencia eléctrica como la tensión en barras se aprecia que se cumplen los estándares operativos de recuperación dinámica establecidos en la NT SyCS. Así también se verifica el cumplimiento de los estándares establecidos en la NT SyCS para la excursión de los ángulos rotóricos de las principales unidades en servicio para cada de los escenarios analizados.

Finalmente, en lo que respecta a los estándares del amortiguamiento en las líneas próximas a la localización del punto de falla, se puede señalar que para todos los casos estudiados se tiene un amortiguamiento que cumple con lo establecido en el Art. 5-44 NT SyCS, es decir, superiores a un 5.0 %.

Tabla 76: Resumen Resultados Verificación Del Comportamiento Dinámico Del SEN

id	Escenario	Elemento Fallado	Tipo Falla	Línea	Estabilidad						Comportamiento Tensión			Frecuencia $f_{min} \geq 48,3$
					Amortiguamiento			A1/A2	Fact. Amort.	Ángulo $\delta < 120^\circ$	V $_{min} \geq 0,7$ en 10ms	V $\geq 0,8$ en 1s	V en $\pm 10\%$ en 20s	
Transf. Permanente [MW]	Transf. Peak A1 [MW]	Transf. Peak A2 [MW]												
1	E1.- DA día Mar2024	Changos – Parinas 500kV L1	Falla 2F-T Despeje en 120 ms	Changos - Parinas 500kV L2	500,1	618,7	543,3	2,7	15,9%	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple
2	E1.- DA día Mar2024	Nueva Pan de Azúcar – Polpaico 500kV L1	Falla 2F-T Despeje en 120 ms	Nueva Pan de Azúcar – Polpaico 500kV L2	1766,4	1882,3	1834,9	1,7	8,3%	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple
3	E1.- DA día Mar2024	Charrúa – Ancoa 500kV L3	Falla 2F-T Despeje en 120 ms	Ancoa – Entre Ríos 500kV L1	31,9	256,6	101,8	3,2	18,3%	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple
4	E2.- DA noche Dic2024 (*)	Changos – Parinas 500kV L1	Falla 2F-T Despeje en 120 ms	Changos - Parinas 500kV L2	307,6	762,6	578,7	1,7	8,2%	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple
5	E2.- DA noche Dic2024 (*)	Nueva Pan de Azúcar – Polpaico 500kV L1	Falla 2F-T Despeje en 120 ms	Nueva Pan de Azúcar – Polpaico 500kV L2	-82,1	-239,5	-163,2	1,9	10,5%	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple
6	E2.- DA noche Dic2024 (*)	Charrúa – Ancoa 500kV L3	Falla 2F-T Despeje en 120 ms	Ancoa – Entre Ríos 500kV L1	951,4	1139,1	1026,0	2,5	14,5%	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple
7	E3.- DB día Abr2024 (*)	Changos – Parinas 500kV L1	Falla 2F-T Despeje en 120 ms	Changos - Parinas 500kV L2	-753,6	-911,2	-790,9	4,2	22,4%	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple
8	E3.- DB día Abr2024 (*)	Nueva Pan de Azúcar – Polpaico 500kV L1	Falla 2F-T Despeje en 120 ms	Nueva Pan de Azúcar – Polpaico 500kV L2	-374,2	-247,6	-234,7	10,8	35,4%	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple
9	E3.- DB día Abr2024 (*)	Charrúa – Ancoa 500kV L3	Falla 2F-T Despeje en 120 ms	Ancoa – Entre Ríos 500kV L1	225,2	337,2	280,7	2,0	11,1%	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple
10	E4.- DB noche Dic2024	Changos – Parinas 500kV L1	Falla 2F-T Despeje en 120 ms	Changos - Parinas 500kV L2	-696,1	-908,7	-798,5	2,1	11,5%	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple
11	E4.- DB noche Dic2024	Nueva Pan de Azúcar – Polpaico 500kV L1	Falla 2F-T Despeje en 120 ms	Nueva Pan de Azúcar – Polpaico 500kV L2	-796,6	-1044,1	-897,4	2,5	14,2%	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple
12	E4.- DB noche Dic2024	Charrúa – Ancoa 500kV L3	Falla 2F-T Despeje en 120 ms	Ancoa – Entre Ríos 500kV L1	981,3	1123,4	993,0	12,1	36,9%	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple

(*) En estos escenarios se considera la unidad HE Machicura U2 sin controles dinámicos, dado que en el escenario base y frente a la contingencia Charrúa – Ancoa 500 kV L3 mostraba un comportamiento oscilatorio en la potencia activa generada luego de que en el periodo inicial de la simulación su potencia activa presentaba un comportamiento amortiguado.

13 CONCLUSIONES

En el estudio descrito mediante el presente informe, se ha efectuado un diagnóstico del comportamiento del SEN en relación con la estabilidad de pequeña señal respecto los modos electromecánicos.

Para lo anterior, se analizaron escenarios que contemplaran las condiciones previstas más críticas desde el punto de vista de las oscilaciones electromecánicas. Estos escenarios se pueden ver en detalle en el punto 7 de este Informe.

Dado lo anterior, considerando los escenarios del SEN ya indicados, se han ejecutado las rutinas para análisis modal disponible en la herramienta de simulación Power Factory de DiGSILENT. Los análisis realizados se dividen en 2 etapas:

1. En primera instancia, se analizaron los resultados para los modos electromecánicos naturales, es decir sin controladores habilitados, no detectando presencia de modos inestables.
2. Posteriormente, se efectuaron los análisis con controladores habilitados y PSS F/S, situación donde si bien se detectaron modos que resultan inestables, dicha condición se ve corregida mediante la incorporación de PSS que cuentan con sus ajustes acorde a lo establecido por el Coordinador [4].
3. Lo anterior se concluye a partir de los análisis efectuados, y que consideran los PSS de las unidades en servicio, los cuales se encuentran homologados y ajustados según lo requerido.

De lo anterior, se destaca lo siguiente:

- a) Para todos los escenarios y contingencias analizados, no fue detectada la presencia de modos de oscilación electromecánicos inter-área inestables (en el semiplano derecho).
- b) Si bien fue detectado un modo de carácter no oscilatorio en las unidades de Central Kelar, se realizaron diversos análisis que descartan riesgos para la operación del SEN. Particularmente, fueron realizadas análisis de gran señal sin observar problemas y se confirmó que los modos estarían más bien asociados a los modelos para bajos pasos de integración, según es señalado en informe de revisión de modelos [8].
- c) Fueron encontrados modos asociados inestables de carácter local asociados a controles de parques ERV. Sin embargo, no existe evidencia de estos en la operación real del SEN, la NT SyCS no establece exigencias de estabilizadores en estos casos.

Luego del análisis modal, se analizaron los modos de oscilación electromecánicos críticos. Para efectos de este estudio, los modos críticos fueron considerados como aquellos con un factor de amortiguamiento inferior a 10% para el caso Red N e inferior a 5% para red N-1. Posteriormente dichos modos fueron clasificados de acuerdo con la cantidad y ubicación de unidades donde se manifiesta apreciablemente (factores de observabilidad de velocidades rotóricas) en inter-área y locales. Luego se caracterizaron detalladamente en base a los diagramas fasoriales de sus factores

de observabilidad y gráficos de barras de sus factores de participación, considerando sus indicadores principales (parte real, parte imaginaria, frecuencia amortiguada, factor de amortiguamiento, etc.).

En los escenarios considerados se obtuvieron 2 modos críticos de carácter inter-área:

- Centro Norte – Centro Sur - Sur 0,91 [Hz]: Este modo tiene un amortiguamiento de alrededor de 5,97%, se manifiesta en la mayoría de los escenarios y si bien se presentaría en una gran cantidad de unidades, la participación significativa es exclusiva de las unidades de Central Las Lajas.
- Centro Norte – Centro Sur 1,34 [Hz]: con amortiguamiento de alrededor de 9,75%, se presenta en solo uno de los escenarios y las unidades de Central Nehuenko II son las únicas con participación significativa.

Hay otro modo Área Sur 1,57 [Hz] que, si bien no es interárea, se manifiesta en bastantes unidades y en varios escenarios. El amortiguamiento más bajo es alrededor de 8,7% y las participaciones mayores corresponden a las unidades de Rucatayo y Canutillar.

Por lo tanto, se recomienda en todos los casos que las unidades señaladas realicen análisis que verifiquen el correcto funcionamiento de sus PSS. Debido a que son unidades sobre 50 [MW] de Potencia nominal, deben contar con PSS y además deben verificar que amortiguan correctamente modos de carácter inter-área, en conformidad con el art 8-20 NT SyCS.

Por otra parte, fueron encontrados modos críticos que podrían considerarse electromecánicos y de carácter local, en los cuales se aprecia participación significativa casi exclusiva de unidades ERV (Energía Renovable Variable) eólicas. En este sentido considerando que:

- Según establece la NT SyCS vigente, las exigencias en relación con PSS son aplicables solo a las unidades sincrónicas y no se establece ni especifica qué requerimiento es exigible para las ERV eólicas.
- La gran mayoría de estos modos tienen un amortiguamiento sobre 5% e incluso cercano a 10%, por lo que no se traducen en problemas de bajo amortiguamiento de transferencias de potencia (art. 5-38 NT SyCS).
- No existe evidencia en la operación real del SEN de problemas de oscilaciones indeseadas asociadas a parques eólicos
- Actualmente, no se considera necesario dar recomendaciones para parques eólicos respecto al amortiguamiento de oscilaciones electromecánicas. Sin embargo, en vista de la evolución dinámica del SEN y las tendencias en otros sistemas con alta penetración de energía basada en inversores, en el mediano plazo se podría requerir la implementación de soluciones análogas a los PSS para los parques eólicos

No se contempla que sea requerido por el momento dar recomendaciones para plantas eólicas en cuanto al amortiguamiento de oscilaciones de carácter electromecánico.

Los resultados de los análisis de modos críticos se encuentran resumidos en la Tabla 75 del Punto 11, donde para cada unidad participante en modos críticos se indica si, disponen modelos homologados, poseen estabilizadores y finalmente se concluyen recomendaciones al respecto. Como resultado del análisis de los modos relevantes, en la Tabla 77 se señalan las unidades a las que se recomienda incorporar y /o revisar sus ajustes de PSS, dado que tienen una participación significativa en modos críticos relevantes.

Tabla 77: Unidades a las que se Recomienda incorporar y/o Revisión de Ajustes de PSS.

UNIDAD	MODOS CRÍTICOS	
	Frecuencia [Hz]	Amortiguamiento %
HE CANUTILLAR U1	Mocho – Pilmaiquén – Cumbre - Pullinque 1,30 [Hz]	9,37%
	Pilmaiquén - Canutillar 1,62[Hz]	8,72%
	Área Sur: Palmar - Correntoso - Cumbres - Rucatayo - Canutillar 1,57 [Hz]	9,75%
	Canutillar 1,79 [Hz]	
HE CANUTILLAR U2	Mocho – Pilmaiquén – Cumbre - Pullinque 1,30 [Hz]	9,37%
	Pilmaiquén - Canutillar 1,62[Hz]	8,72%
	Área Sur: Palmar - Correntoso - Cumbres - Rucatayo - Canutillar 1,57 [Hz]	9,75%
	Canutillar 1,79 [Hz]	
HP CHACAYES U1	Chacayes – Sauzal – Sauzalito 1,25 [Hz]	
HP CHACAYES U2	Chacayes – Sauzal – Sauzalito 1,25 [Hz]	
HE CIPRESES U1	Cipreses - Curillinque - Isla 1,11[Hz]	6,73%
	Cipreses – Curillinque – Isla – Lautaro 1,19[Hz]	9,9%
	Cipreses 1,25 [Hz]	
HE CIPRESES U3	Cipreses - Curillinque - Isla 1,11[Hz]	6,73%
	Cipreses – Curillinque – Isla – Lautaro 1,19[Hz]	9,9%
	Cipreses 1,25 [Hz]	
HE COLBUN U2	Colbún 1,61 [Hz]	2,9%
HP CURILLINQUE U1	Cipreses - Curillinque - Isla 1,11[Hz]	6,73%
	Cipreses – Curillinque – Isla – Lautaro 1,19[Hz]	9,9%
HP ISLA U1	Cipreses - Curillinque - Isla 1,11[Hz]	6,73%
	Cipreses – Curillinque – Isla – Lautaro 1,19[Hz]	9,9%
HP ISLA U2	Cipreses - Curillinque - Isla 1,11[Hz]	6,73%
	Cipreses – Curillinque – Isla – Lautaro 1,19[Hz]	9,9%
HP LAS LAJAS U1	Interárea CN-CS-Sur 0,91[Hz]	5,97%
HP LAS LAJAS U2	Interárea CN-CS-Sur 0,91[Hz]	5,97%
HE MACHICURA U2	Machicura 1,15[Hz]	4,8% ⁹
TER NEHUENCO II CC1-TG	Interárea CN-CS 1,34[Hz]	9,75%
HP RUCATAYO U1	Mocho – Pilmaiquén – Cumbre - Pullinque 1,30 [Hz]	9,37%
	Área Sur: Palmar - Correntoso - Cumbres - Rucatayo - Canutillar 1,57 [Hz]	9,75%
	Pilmaiquén – Palmar 1,55[Hz]	9,92%

Adicionalmente existe un número de unidades que se requiere homologación y/o revisión de sus modelos dinámicos con prioridad debido a su participación en modos críticos, cuyo detalle también se muestra en la Tabla 75 del Punto 11. Lo anterior en conjunto con la caracterización acuciosa de

⁹ Frente a la contingencia Charrúa – Ancoa 500 kV L3 mostraba un comportamiento oscilatorio en la potencia activa generada luego de que en el periodo inicial de la simulación su potencia activa presentaba un comportamiento amortiguado.

los modos electromecánicos críticos, constituye un diagnóstico detallado de la estabilidad de pequeña señal del SEN y de la verificación del cumplimiento de los estándares establecidos en la NT para los PSS asociados a las unidades del SEN correspondientes.

Adicionalmente, fueron efectuadas simulaciones dinámicas para variados casos de operación, considerados como las más exigentes de acuerdo con los escenarios y contingencias analizadas. Para todos los casos los resultados mostraron que el comportamiento dinámico del SEN es satisfactorio, pese a la presencia de modos electromecánicos con un amortiguamiento inferior a 10% en Red N y 5% en Red N-1. A partir de lo anterior puede concluirse que si bien existen casos donde el SEN posee algunos modos de oscilación con amortiguamiento por debajo de lo establecido en la NT, no existen condiciones para las contingencias simples analizadas, que deriven en un riesgo para la seguridad de la operación del SEN, lo cual está en concordancia con los antecedentes de la operación real.

De todas maneras, dado que los resultados del análisis modal muestran la evidencia de situaciones donde es necesaria la revisión de ajustes de PSS, se recomienda instruir a las unidades indicadas en la Tabla 77:

- La revisión de los ajustes de PSS.
- El diseño y ejecución de los planes de sintonización de PSS correspondientes. Lo que al menos conlleva:
 - La realización de ensayos necesarios para la implementación de los ajustes requeridos.
 - La homologación de los modelos dinámicos con ajustes actualizados.

La aplicación de lo anterior, y en conformidad a lo establecido en el punto 6.4, permitirá mejorar el amortiguamiento de la respuesta dinámica del sistema asociada a los modos críticos detectados, en particular aquellos que no cumplan con la normativa vigente.

14 BIBLIOGRAFÍA

- [1] P. Kundur, *Power Systems Stability and Control*, EPRI, Ed., McGraw-Hill, Inc., 1994.
- [2] M. J. S. R. C. B. E. C. Basler, «Understanding Power System Stability,» *58th Annual Conference for Protective Relay Engineers, 2005.*, 2005.
- [3] B. Chaudhuri y B. Pal, *Robust Control in Power Systems*, London: Springer, 2005.
- [4] Estudios Eléctricos, «Análisis de la Operación de los Sistemas SIC-SING Interconectados Estudio 4 - Análisis de pequeña señal y ajuste de PSS,» 2017.
- [5] GmbH, DlgSILENT, *DlgSILENT PowerFactory User Manual Online Edition*, Gomaringen, Germany, 2018.
- [6] L. H. G. Bérubé, «Accelerating-Power Based Power System Stabilizers,» 2007.
- [7] Estudios Eléctricos para CDEC SIC, «Estudio de Detalle para PDCE Charrúa - Ancoa INFORME FINAL,» Santiago, 2011.
- [8] Laborelec, «Kelar S.A. - Impacto de la Optimización en la Lógica de Control de Temperatura de Vapor y CPF sobre el Modelo Dinámico Homologado,» 2018.