

[illegible]

INDICE

1	Introducción y objeto del estudio.....	4
2	Metodología del estudio.....	4
2.1	Modelado de la falla	5
2.2	Recursos estabilizantes	5
2.3	Hipótesis de actuación de las protecciones	5
2.4	Respecto de los escenarios seleccionados.....	6
3	Desarrollo de los casos de estudio.....	7
3.1	Línea L-215 Chimbote – Paramonga 220 kV.....	8
3.1.1	Condiciones de aplicación.....	8
3.1.2	Seccionamiento del sistema ante la pérdida de sincronismo	12
3.1.3	Variables Monitoreadas.....	14
3.1.4	Conclusiones.....	15
3.2	Líneas L-251 Aguaytía – Tingo María y otras	16
3.2.1	Falla L-121 Tingo María – Huanuco 138 kV	16
3.2.2	Falla L-252 Tingo María – Vizcarra 220 kV	19
3.2.3	Falla L-2254 Vizcarra – Paragsha2 220 kV	22
3.2.4	Falla L-253 Vizcarra – Paramonga 220 kV	23
3.2.5	Variables monitoreadas.....	23
3.2.6	Conclusiones.....	24
3.3	Línea Cotaruse – Socabaya y Campo Armiño – Cotaruse	25
3.3.1	Falla L-2053 Cotaruse – Socabaya 220 kV	25
3.3.2	Falla L-2051 Campo Armiño – Cotaruse 220 kV	26
3.3.3	Variables monitoreadas.....	27
3.3.4	Conclusiones.....	27
3.4	Sistema del Sudeste	29
3.4.1	Recursos de control de emergencia en sobrefrecuencia.....	29
3.4.2	Presentación de los resultados	29
3.4.3	Falla L-1011 Azángaro – Juliaca 138 kV	30
3.4.4	Falla L-1012 Juliaca – Puno 138 kV	33
3.4.5	Falla L-2030 Puno – Moquegua 220 kV	35
3.4.6	Falla L-1006/2 Azángaro – Tintaya 138 kV	36
3.4.7	Falla L-1006/1 Tintaya – Azángaro 138 kV	39
3.4.8	Falla L-1008 Tintaya – Callalli 138 kV	39
3.4.9	Falla L-1020 Callalli – Santuario 138 kV	41
3.4.10	Falla L-1021 Santuario – Socabaya #2 138 kV con L-1022 F/S	42
3.4.11	Variables monitoreadas.....	46
3.4.12	Conclusiones.....	47
4	Conclusiones y recomendaciones.....	48

Indice de Figuras

FIG. 1	CÍRCULOS DEL MODELO DE RELÉ RELAY2 DEL SIMULADOR PSS/E.....	6
FIG. 2	LUGAR DE R-X EN CHIMBOTE – PARAMONGA	9
FIG. 3	LUGAR DE R-X EN CHIMBOTE – PARAMONGA	9
FIG. 4	LUGAR DE R-X EN TRUJILLO NORTE – GUADALUPE	10
FIG. 5	LUGAR DE R-X EN HUALLANCA – CHIMBOTE1.....	10
FIG. 6	LUGAR DE R-X EN CHIMBOTE – PARAMONGA	11
FIG. 7	LUGAR DE R-X EN TRUJILLO NORTE – CHIMBOTE1	11
FIG. 8	LUGAR DE R-X EN HUALLANCA – CHIMBOTE1.....	12

FIG. 9 LUGAR DE R-X EN CHIMBOTE1 – PARAMONGA (APERTURA 115º)	13
FIG. 10 DIFERENCIA ANGULAR ENTRE CHIMBOTE1 – PARAMONGA (APERTURA 115º)	13
FIG. 11 LUGAR DE R-X EN CHIMBOTE1 – PARAMONGA (APERTURA 270º)	14
FIG. 12 DIFERENCIA ANGULAR ENTRE CHIMBOTE1 – PARAMONGA (APERTURA 270º)	14
FIG. 13 LUGAR DE R-X EN TINGO MARÍA – VIZCARRA	17
FIG. 14 LUGAR DE R-X EN AGUAYTÍA – TINGO MARÍA	17
FIG. 15 LUGAR DE R-X EN TINGO MARÍA – VIZCARRA	18
FIG. 16 LUGAR DE R-X EN AGUAYTÍA – TINGO MARÍA	18
FIG. 17 LUGAR DE R-X EN TINGO MARÍA - HUANUCO	20
FIG. 18 LUGAR DE R-X EN TRANSF. TINGO MARÍA LADO 220 kV	20
FIG. 19 LUGAR DE R-X EN TRANSF. TINGO MARÍA LADO 220 kV	21
FIG. 20 LUGAR DE R-X EN TINGO MARÍA - HUANUCO	21
FIG. 21 LUGAR DE R-X EN AGUAYTÍA – TINGO MARÍA	22
FIG. 22 LUGAR DE R-X EN TINGO MARÍA – VIZCARRA	23
FIG. 23 LUGAR DE R-X EN COTARUSE (LADO LÍNEA) – SOCABAYA #2	25
FIG. 24 LUGAR DE R-X EN CAMPO ARMIÑO – COTARUSE #2	26
FIG. 25 LUGAR DE R-X EN CAMPO ARMIÑO – COTARUSE #2 (VERSIÓN 2)	27
FIG. 26 LUGAR DE R-X EN TINTAYA – CALLALLI	31
FIG. 27 LUGAR DE R-X EN TINTAYA – CALLALLI	31
FIG. 28 LUGAR DE R-X EN TINTAYA – QUENCORO	32
FIG. 29 LUGAR DE R-X EN AZÁNGARO – TINTAYA	32
FIG. 30 LUGAR DE R-X EN SANTUARIO – CALLALLI	33
FIG. 31 LUGAR DE R-X EN TINTAYA – CALLALLI	34
FIG. 32 LUGAR DE R-X EN TINTAYA – CALLALLI	34
FIG. 33 LUGAR DE R-X EN QUENCORO – TINTAYA	35
FIG. 34 LUGAR DE R-X EN TINTAYA – CALLALLI	36
FIG. 35 LUGAR DE R-X EN AZÁNGARO – JULIACA	37
FIG. 36 LUGAR DE R-X EN SAN GABÁN – AZÁNGARO	38
FIG. 37 LUGAR DE R-X EN AZÁNGARO – S. GABÁN CON DISPARO GRUPO 2 S.GABÁN	38
FIG. 38 LUGAR DE R-X EN QUENCORO – TINTAYA	39
FIG. 39 LUGAR DE R-X EN AZÁNGARO – JULIACA	40
FIG. 40 LUGAR DE R-X EN JULIACA – PUNO	41
FIG. 41 LUGAR DE R-X EN QUENCORO - TINTAYA	42
FIG. 42 LUGAR DE R-X EN TRANSFORMADOR DE CHILINA, LADO 138kV	43
FIG. 43 LUGAR DE R-X EN JULIACA – PUNO	43
FIG. 44 LUGAR DE R-X EN AZÁNGARO – JULIACA	44
FIG. 45 LUGAR DE R-X EN AZÁNGARO – JULIACA	45
FIG. 46 LUGAR DE R-X EN AZÁNGARO – JULIACA	45
FIG. 47 LUGAR DE R-X EN TINTAYA – CALLALLI	46

Análisis de Oscilaciones de Potencia

1 Introducción y objeto del estudio

Este estudio determina ante episodios oscilatorios y fenómenos de pérdida de paso, el comportamiento de las principales variables de entrada a las protecciones: módulo y ángulo en función del tiempo de las tensiones de nodo y corrientes por ramas, para aportar los elementos de juicio necesarios para evaluar el desempeño debido de las protecciones en tales circunstancias.

En principio se considera que ninguna protección dispara por oscilaciones de potencia, con el objeto de monitorear la evolución de las variables de interés "vistas" por las protecciones durante todo el proceso.

En función de los resultados obtenidos y sobre la base de la individualización del centro eléctrico, se indica la conveniencia y lugar en que las protecciones deberían abrir los interruptores seccionando el sistema y dando lugar a la formación de "islas naturales"¹. Identificados los puntos de seccionamiento, se evalúa el comportamiento esperado de los subsistemas resultantes.

En esta etapa sólo se estima el tiempo en el cual se efectúa la apertura, dado que no se contemplan las capacidades específicas de las protecciones instaladas para detectar y emitir las señales de apertura en tales circunstancias. La estimación tiene presente no obstante, que de frente a fenómenos de oscilaciones de potencia o pérdida de paso, se debe evitar la apertura en correspondencia con valores mínimos de impedancia relevada, ya que implicaría interrumpir circuitos con valores muy grandes de corriente y ocasionar posiblemente tensiones de restablecimiento elevadas.

En una etapa sucesiva se determinará cuál va a ser el comportamiento de las protecciones específicas en dichos puntos, y se evaluará si las actuales protecciones son capaces de "bloquear el disparo donde se necesite bloquear", y permitir la apertura en donde sea conveniente, en función de sus prestaciones y ajustes actuales.

2 Metodología del estudio

La identificación de las perturbaciones y la selección de los escenarios críticos proclives a ocasionar oscilaciones de potencia con bajo amortiguamiento, se realizó recabando los antecedentes del "Análisis de las estadísticas de falla" del Informe Preliminar, y de los reportes del estudio de CCT (Tiempos Críticos de Despeje de

¹ Las "islas naturales" se diferencian de aquellas llamadas "inteligentes", en que estas últimas se forman mediante la intervención de mecanismos de monitoreo y control específicos.

fallas) y del estudio de TEFM (Tiempos máximos de Espera para Fallas Monofásicas).

Se consideraron sólo aquellos eventos que por su severidad y condiciones particulares de operación, pudieran dar lugar a oscilaciones que comprometieran el desempeño de las protecciones.

2.1 Modelado de la falla

Sólo se aplicaron fallas trifásicas sin impedancia y en un extremo de línea para provocar las perturbaciones, evitando las fallas asimétricas debido a que las magnitudes relevadas por las protecciones "antipenduleo", relacionadas con los fenómenos oscilatorios y de pérdida de paso, son en general del tipo simétricos.

A menos que se especifique lo contrario, el modelo de falla considera un tiempo de despeje de falla (tiempo de operación de las protecciones + tiempo de apertura simultánea de ambos interruptores de línea) igual a 0.100s. Todas las fallas se aplicaron luego de 0.100s de iniciada la simulación, para recuperar un registro del estado estacionario previo.

2.2 Recursos estabilizantes

Se considera que el SEIN dispone de los recursos estabilizantes mejorados sugeridos en el Estudio de Pequeñas Oscilaciones encargado por COES a comienzos del 2004. Debido a ello, las conocidas oscilaciones con bajo amortiguamiento características en algunos tramos del sistema resultan ahora menos relevantes para el mismo transporte de potencia, y en algunos casos los fenómenos oscilatorios prácticamente se extinguen luego de los primeros ciclos.

Por esta razón se han modificado la mayoría de los escenarios base, aumentando el tránsito por algunos corredores críticos en función del fenómeno de interés, para alcanzar estados iniciales desde los cuales pueda excitarse la actuación de las protecciones por oscilaciones.

2.3 Hipótesis de actuación de las protecciones

Las simulaciones se realizaron considerando al sistema exento de la intervención de protecciones, a fin de estudiar la evolución de las magnitudes medidas por éstas durante un tiempo relativamente prolongado (unos 3 a 5 segundos).

Durante este tiempo se recabaron para cada zona de estudio, el módulo y ángulo de la tensión de los nodos, la potencia aparente en un extremo de la línea (o ambos extremos en el caso de los transformadores) para deducir la corriente, y el lugar R-X en pu visto por las protecciones en cada extremo de línea o transformador.

Las magnitudes R-X se obtuvieron mediante el modelo de librería RELAY2 del simulador PSS/E, que también monitorea durante la simulación el ingreso y salida del lugar de la impedancia a 3 zonas típicas de un relé de distancia del tipo Mho, como en la Fig. 1 obtenida desde la documentación del simulador. El diámetro de la zona 1 representa el 92% de la impedancia de la línea, el de la zona 2 el 150%, y 220 % el de la zona 3. En la descripción de los resultados a menudo se hace mención a estas características como las "zonas supuestas".

En el caso de líneas con tomas intermedias, a los efectos de modelar las zonas se considera como impedancia de la línea la suma de las impedancias longitudinales entre los extremos principales, al igual que la impedancia de los devanados entre alta y media de los transformadores de 3 arrollamientos se conforman por la suma de las ramas adecuadas de la estrella equivalente.

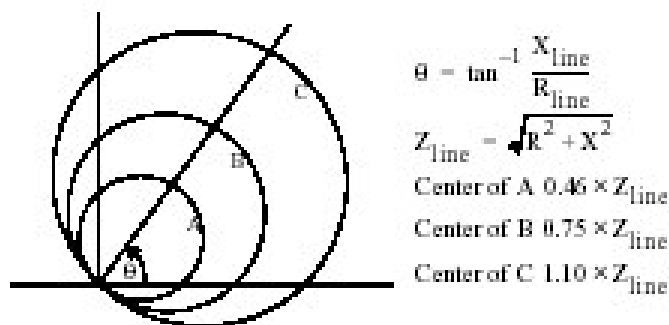


Fig. 1 Círculos del modelo de relé RELAY2 del simulador PSS/E

Si bien la característica del relé de cada línea podría diferir completamente de este relé típico, la información provista por el modelo se considera útil para alertar el posible ingreso del lugar de la impedancia a las zonas de actuación de los relés. Este modelo aporta además, la gráfica de la característica del relé estimado en cada línea en que está modelado para superponerla con el lugar de la impedancia en el plano R-X, tal como se emplea en este reporte.

Los tiempos referidos en el informe para describir el ingreso a las zonas de esta característica Mho, siempre se calculan a partir de la apertura de la línea con falla.

2.4 Respecto de los escenarios seleccionados

Se han modificado los escenarios de referencia ajustados por TRANSNER incrementando el transporte por algunas líneas de interés para cada zona de estudio, a fin de obtener condiciones iniciales proclives a derivar en estados oscilatorios y/o pérdida de sincronismo, luego de una falla seguida de la pérdida de un vínculo.

Los escenarios pertenecen a estados de media y máxima demanda de Avenida 2004, y la redistribución del despacho se hizo sobre centrales que no participan apreciablemente en los fenómenos oscilatorios de interés en cada caso.

En general se desarrolló más de 1 escenario para cada caso de estudio variando la magnitud clave (generación o transporte por líneas) que causa la oscilación o pérdida de paso. El objetivo de las variantes es caracterizar la trayectoria y velocidad de variación del lugar de la impedancia en el plano R-X durante la oscilación, a partir de las diversas condiciones iniciales para obtener un rango práctico de las magnitudes que accionan las protecciones.

3 Desarrollo de los casos de estudio

Se aborda el estudio de las oscilaciones de potencia sobre las siguientes áreas del sistema:

- ◊ Línea de 220 kV Chimbote - Paramonga
- ◊ Líneas de 220 kV Aguaytía - Tingo María, Tingo María - Vizcarra, Vizcarra - Paramonga y Vizcarra - Paragsha
- ◊ Doble terna de 220 kV Campo Armiño - Cotaruse - Socabaya
- ◊ Líneas de 138 y 220 kV del sistema Sudeste, entre las subestaciones Socabaya, Santuario, Callalli, Tintaya, Azángaro, Juliaca, Puno y Moquegua.

En los capítulos siguientes se aborda en este orden, el desarrollo de cada zona.

3.1 Línea L-215 Chimbote – Paramonga 220 kV

3.1.1 Condiciones de aplicación

Para el transporte considerado por la línea L-215 Chimbote – Paramonga en los escenarios base, no parece posible la pérdida de sincronismo del subsistema Norte ante fallas simples de 0.100s sobre el sistema de 220 kV. Las fallas son tales que mantienen el vínculo entre el subsistema Norte y el resto del SEIN.

No obstante, es posible que en estado de emergencia o de respuesta temporaria luego de una falla, el sistema Norte quede exportando una cantidad de potencia considerable por la línea L-215 Chimbote – Paramonga. La causa puede provenir de la pérdida de generación en el sistema Centro-Sur, contingencia de pérdida de carga en el subsistema Norte, o una actuación importante del esquema de rechazo de cargas en el Norte cuando éste tiene superávit.

En cualquier caso esto conducirá a que el sistema Norte quede exportando una cantidad apreciable de potencia al resto del SEIN, en cuya circunstancia una falla que afecte al sistema de transmisión podría provocar oscilaciones con bajo amortiguamiento, o hasta la pérdida de sincronismo del subsistema Norte respecto del resto del SEIN.

La falla aplicada es un cortocircuito trifásico a los 0.100s sobre la línea L-233 de 220 kV Chimbote1 – Trujillo Norte #2, lado Chimbote1, aplicada por 0.100s con despeje mediante la apertura definitiva de la línea.

Los casos analizados parten del escenario de Avenida Máxima 2004 con 106 MW Chimbote1 – Paramonga, sobre el cual se hicieron las siguientes variantes:

- ◊ Caso 1 (OSPO_10a): escenario Av04Ma_1 con Chimbote1 – Paramonga en 120 MW
- ◊ Caso 2 (OSPO_11a): escenario Av04Ma_2 con Chimbote1 – Paramonga en 135 MW
- ◊ Caso 3 (OSPO_12a): escenario Av04Ma_3 con Chimbote1 – Paramonga en 145 MW
- ◊ Caso 4 (OSPO_13a): escenario Av04Ma_4 con Chimbote1 – Paramonga en 160 MW

El caso 1 presenta una oscilación amortiguada, y el caso 2 se aproxima mucho a la pérdida de sincronismo pero resulta también estable.

En ambos casos, el lugar de la impedancia no entra en ninguna de las “zonas supuestas” de los relés de protección. Por ejemplo, la Fig. 2 muestra la oscilación del lugar de la impedancia en la línea L-215 Chimbote – Paramonga del caso 2, destacándose que conforme evoluciona la oscilación el lugar de la impedancia se aleja de las características supuestas de los relés.

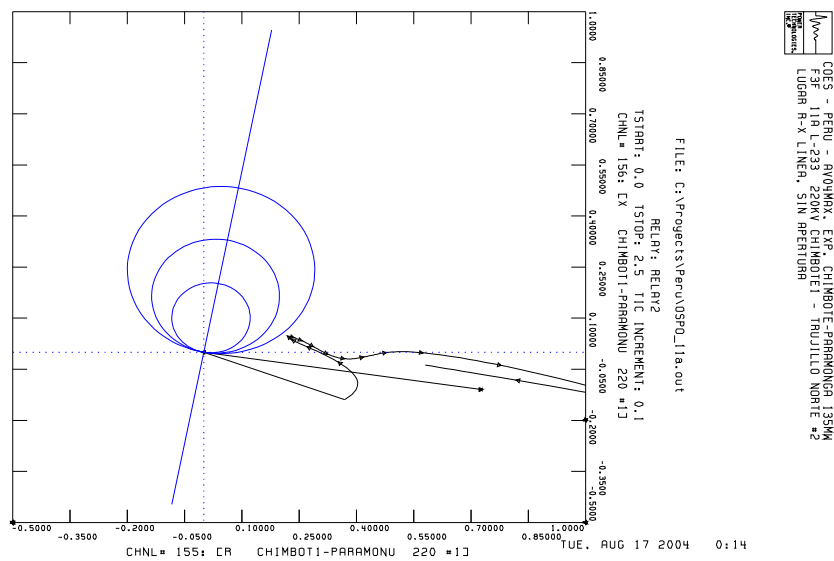


Fig. 2 Lugar de R-X en Chimbote – Paramonga

En el caso 3 el lugar de la impedancia atraviesa la zona 1 “supuesta” a los 1.054s desde el despeje de la falla, y como se observa en la Fig. 3, esta condición se verifica claramente en esta línea, aunque sólo por una vez.

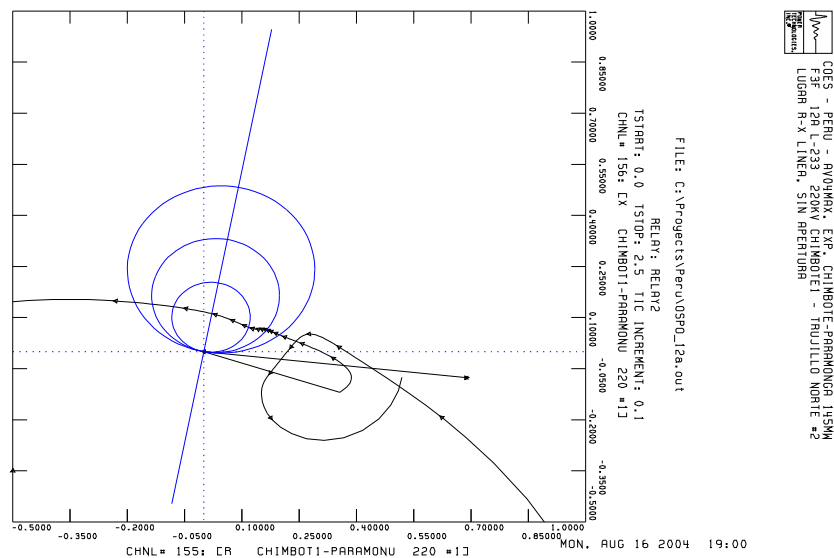


Fig. 3 Lugar de R-X en Chimbote – Paramonga

El centro eléctrico se desplaza luego a la línea L-234 Trujillo Norte – Guadalupe, entrando el lugar de la impedancia a la zona 1 a los 2.086s de despejada la falla (1.032s desde la entrada en la L-215), luego a los 2.458s, 2.812s, 3.184s, etc., con intervalos entre pasos por la zona 1 desde 0.372s, 0.354s, 0.372s nuevamente, etc. La Fig. 4 ilustra esta situación en la línea L-234, y en la Fig. 5 se ilustra la situación de la L-103 Huallanca – Chimbotel #1.

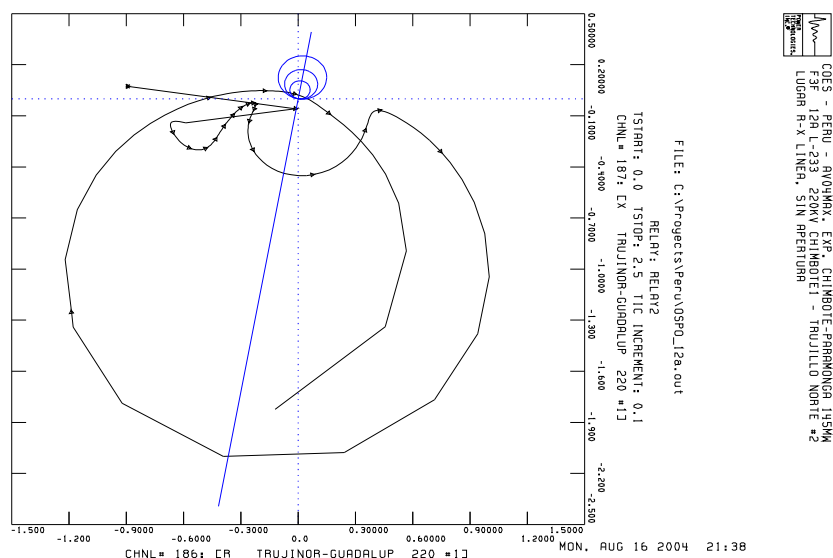


Fig. 4 Lugar de R-X en Trujillo Norte – Guadalupe

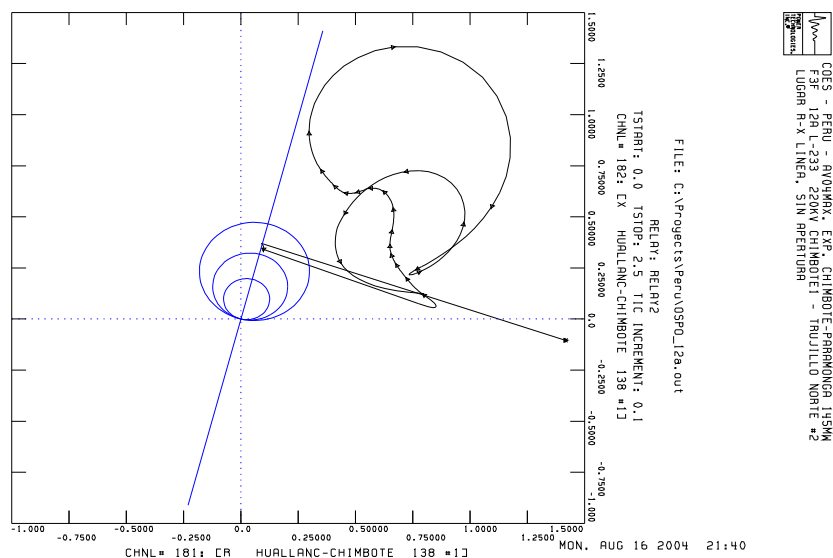


Fig. 5 Lugar de R-X en Huallanca – Chimbote1

En el Caso 4 la pérdida de sincronismo es más rápida debido al mayor transporte por la L-215. El centro eléctrico se verifica primero en la línea L-215 Chimbote – Paramonga, entrando a la zona 1 por primera vez a los 0.943s (Ver Fig. 6), luego se desplaza a la línea L-233 Trujillo Norte – Chimbote, en donde pasa por la zona 1 a los 1.996s (Fig. 7), luego pasa de nuevo por la zona 1 de la L-215 a los 2.326s, luego retorna a la zona 1 de la L-233 a los 2.610s, y finalmente se instala en la línea L-215 en adelante pasando por la zona 1 a los 2.590s, luego a los 3.019s, etc.

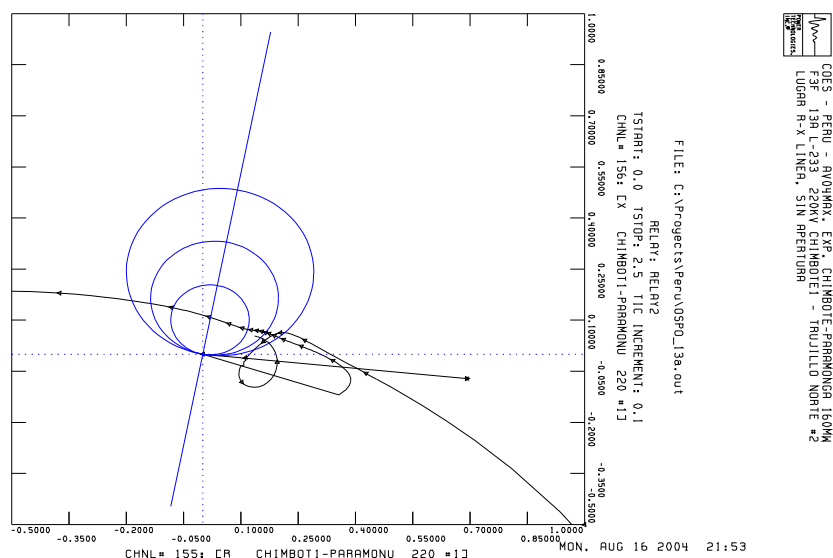


Fig. 6 Lugar de R-X en Chimbote – Paramonga

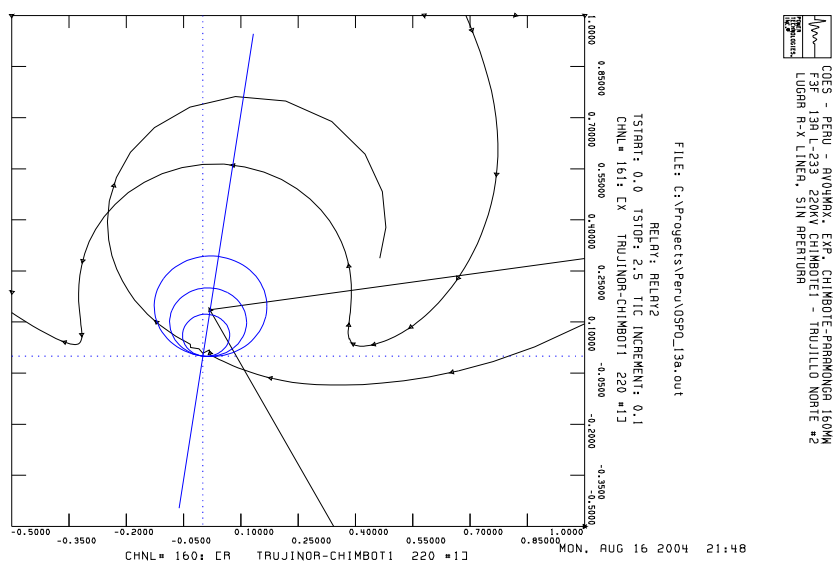


Fig. 7 Lugar de R-X en Trujillo Norte – Chimbote1

La terna #1 L-103 de evacuación de la central Cañón del Pato presenta una entrada del lugar de la impedancia a la zona 3 a los 2.059s segundos, como puede apreciarse en la Fig. 8.

Los casos permiten así caracterizar la variación del lugar de la impedancia en el plano R-X a partir de diversas condiciones iniciales, según el estado del sistema de transmisión Chimbote – Paramonga se aproxima a la pérdida de sincronismo.

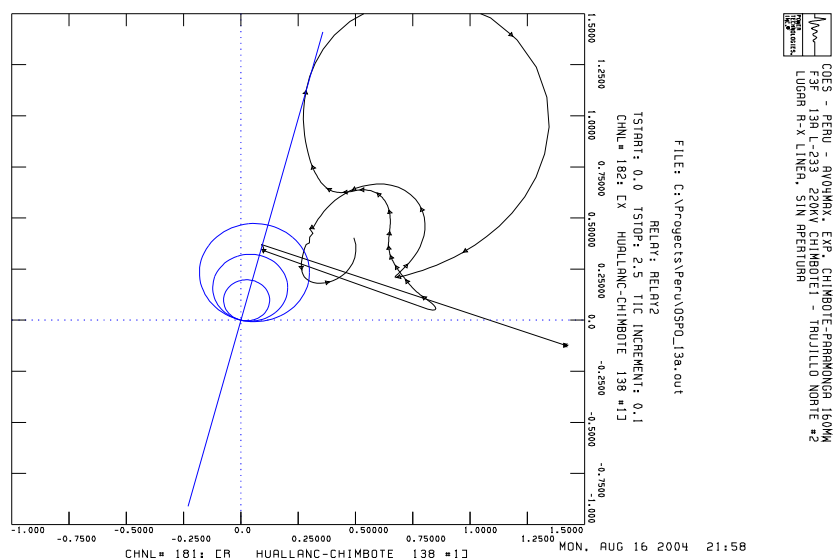


Fig. 8 Lugar de R-X en Huallanca – Chimbote1

Las simulaciones se ejecutaron hasta los 5.0 s sin desconexión de líneas ni generadores, de manera de observar durante más de 2 ciclos de la oscilación interárea característica, la evolución de las principales variables de interés para las protecciones.

3.1.2 Seccionamiento del sistema ante la pérdida de sincronismo

A partir del lugar del centro eléctrico y la velocidad de variación del lugar de la impedancia en una oscilación inestable, como las pertenecientes a los casos 3 y 4 con 145 y 160 MW de exportación de Chimbote1 a Paramonga respectivamente, se puede deducir lo siguiente:

- ◇ La mejor división en "islas naturales" es mediante la **apertura de L-215 Chimbote1 – Paramonga**, puesto que el seccionamiento entre Chimbote1 – Trujillo Norte no evita que las unidades de Cañón del Pato sigan fuera de sincronismo.
- ◇ Debe prevenirse la posible apertura no deseada de las líneas Chimbote – Trujillo Norte y Trujillo Norte – Guadalupe.
- ◇ Tomando en cuenta la velocidad de variación del lugar de la impedancia Z en el extremo Chimbote1 "mirando" a Paramonga, si se emite la orden de disparo cuando Z está próxima al 90 % de la impedancia de la línea (valor habitual para la 1ra. zona), la apertura de contactos se producirá (suponiendo un tiempo de apertura de 100 ms) con un desfase de $\approx 150^\circ$ entre ambos sistemas provocando una tensión transitoria de restablecimiento elevada, como se observa en la Fig. 9 y Fig. 10. Si la apertura se realiza cuando la diferencia angular entre extremos de la línea L-215 está a 270° , admitiendo por una vez la pérdida de paso, el ángulo de desfase se reduce inmediatamente hasta unos 230 grados, como se observa en la Fig. 11 y Fig. 12.

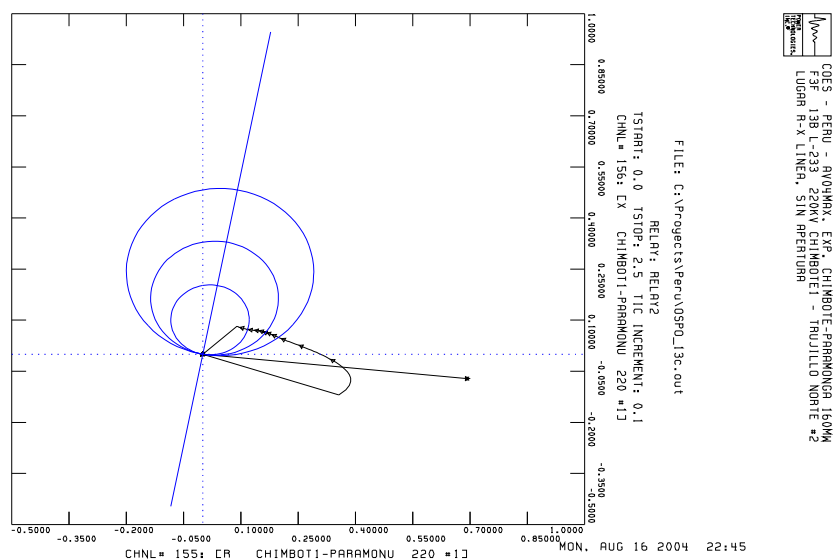


Fig. 9 Lugar de R-X en Chimbote1 – Paramonga (apertura 115°)

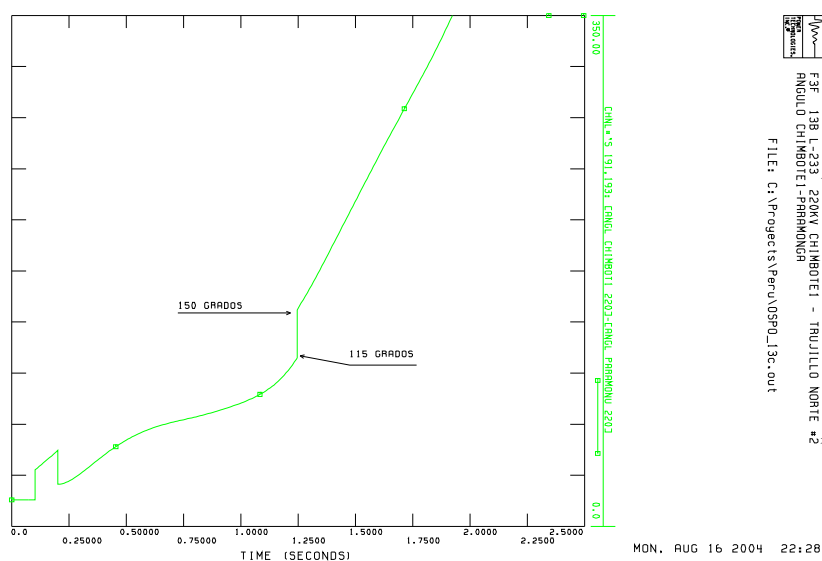


Fig. 10 Diferencia angular entre Chimbote1 – Paramonga (apertura 115°)

La apertura en ambos casos genera sobrefrecuencia en el subsistema Norte, cuya excursión está comprendida en las condiciones de diseño del esquema de desconexión de generación por sobrefrecuencia, y un estado de subfrecuencia moderada en sistema Centro-Sur, también controlable por el esquema de rechazo de cargas.

Luego de la apertura, el lugar de la impedancia de las líneas monitoreadas queda fuera de las "zonas supuestas" de las protecciones.

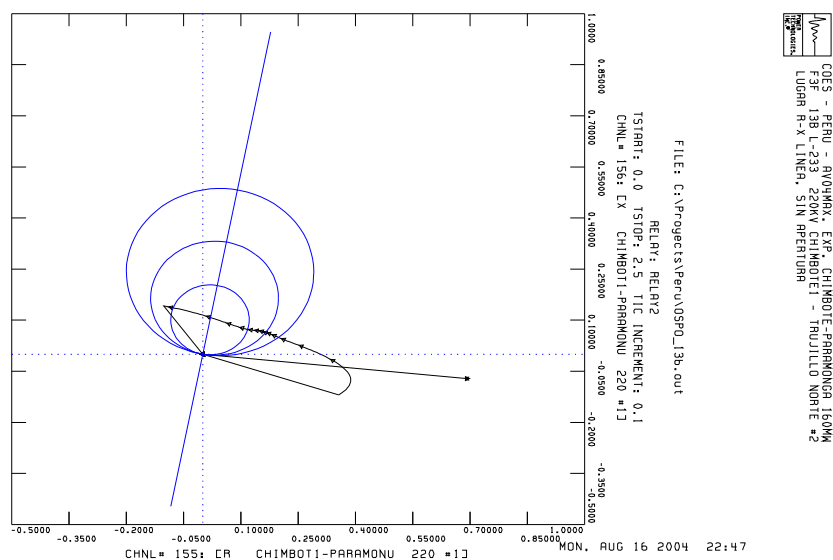


Fig. 11 Lugar de R-X en Chimbote1 – Paramonga (apertura 270°)

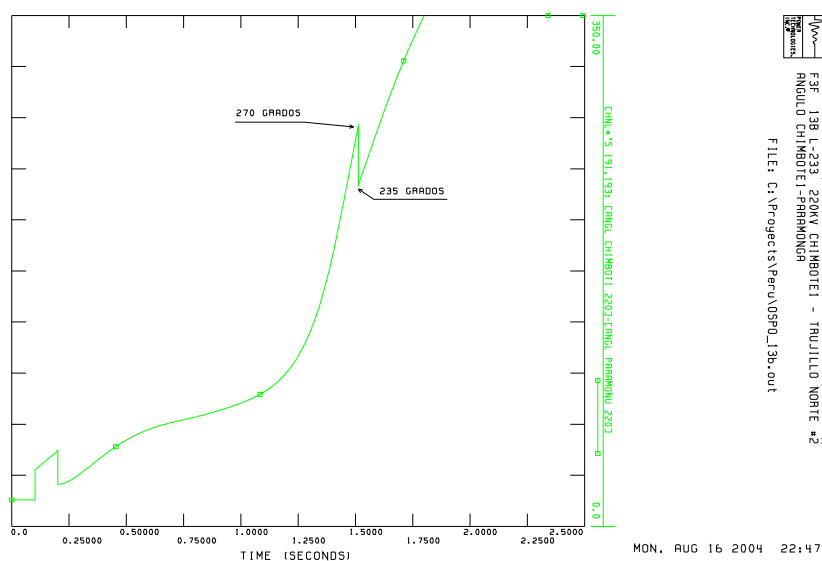


Fig. 12 Diferencia angular entre Chimbote1 – Paramonga (apertura 270°)

Las simulaciones con la apertura a 270 grados de los casos 3 y 4 se designaron respectivamente OSPO_12b y OSPO_13b, en tanto que las efectuadas luego del ingreso a la 1er. zona se designan OSPO_12c y OSPO_13c respectivamente.

3.1.3 Variables Monitoreadas

En los 4 casos se han almacenado las siguientes variables:

- ◇ Ángulos de todas las máquinas en servicio
- ◇ Corriente en el primer extremo de las líneas de 220 kV:

- L-215 Chimbote1 - Paramonga
 - L-232 Trujillo Norte - Chimbote1
 - L-213 Paramonga - Huacho
 - L-253 Vizcarra - Paramonga
 - L-234 Trujillo Norte - Guadalupe
 - L-103 Huallanca - Chimbote1 #1
 - Transformador #1 220/138/13.8 kV Chimbote 1
- ◇ Lugar R-X visto desde ambos extremos de las líneas mencionadas
- ◇ Tensión y ángulo en los nodos de 220 kV de Chimbote1, Paramonga, Huacho, Trujillo Norte y Vizcarra.
- ◇ Frecuencia en la barra de 220 kV Trujillo Norte y Huacho.

3.1.4 Conclusiones

La pérdida de paso se detecta en primer término en la línea L-215 Chimbote - Paramonga, y luego de casi 1s después se manifiesta de nuevo en esta línea u otra del sistema.

La apertura antes de la pérdida de paso es conveniente para evitar picos de sobrefrecuencia y esfuerzos en los generadores, pero depende de las condiciones de las protecciones para detectar anticipadamente esta situación sin emitir el disparo cuando es innecesario, y de la capacidad de los interruptores para soportar las tensiones transitorias de restablecimiento que pudieran gestarse.

La apertura luego de la primera pérdida de paso reduce los esfuerzos sobre el interruptor, ya que interrumpe menor corriente y produce menores tensiones de reestablecimiento, aunque provoca mayores picos de sobrefrecuencia.

3.2 Líneas L-251 Aguaytía – Tingo María y otras

Los antecedentes del sistema de transmisión de evacuación de la central Aguaytía, daban cuenta de oscilaciones de potencia que se han mitigado considerando un automatismo de reducción de potencia. Los modelos de los sistemas de control de esta central no han sido homologados, y tampoco se dispone de información detallada de la aplicación de esta reducción de potencia.

Por otra parte, tomando en cuenta la estructura de los sistemas de control instalados en la planta de Aguaytía, en el estudio de Pequeña Señal se obtuvieron desempeños coordinados con el resto del SEIN, que determinan la rápida extinción de las oscilaciones en post-falla sin intervención de este automatismo.

Sin embargo, igualmente se juzga útil analizar el comportamiento del sistema de transmisión ante fallas muy severas que determinan la pérdida de sincronismo de alguna línea de la zona, para estudiar en estos casos la conveniencia de anticipar o retardar la apertura de algunos interruptores para reducir las probables sobretensiones de maniobra. También resulta útil el análisis de comportamiento ante fallas severas sin pérdida de paso, dado que pone en evidencia los requerimientos a los que estarán sometidas las protecciones de estas líneas.

3.2.1 Falla L-121 Tingo María – Huanuco 138 kV

Se aplica una falla trifásica en L-121 Tingo María – Huanuco 138 kV, lado Tingo María, durante 0.500s con despeje por apertura de todos los interruptores concurrentes a esta barra (supone apertura por Protección Falla Interruptor). La falla típica aplicada por 0.100s sobre la L-121 seguida de la apertura de esta línea, no ocasiona oscilaciones proclives a la pérdida de sincronismo del sistema de 220 kV de evacuación al SEIN.

La evaluación comprende como variantes el número de unidades de Aguaytía en servicio.

Caso 1 (OSPO_20a) :

Este caso tiene 2 unidades de Aguaytía en servicio. El lugar de la impedancia entra en la zona 1 de la línea L-252 Tingo María – Vizcarra como se aprecia en la Fig. 13 a los 0.736s, luego a los 1.282s, 1.612s, 1.879s, etc., con intervalos entre pasos por esta zona desde 0.546s, 0.330s, 0.267s, etc.

El lugar de la impedancia también entra durante la oscilación a la característica de la protección de la línea Aguaytía – Tingo María, en la 2da. zona (Fig. 14)

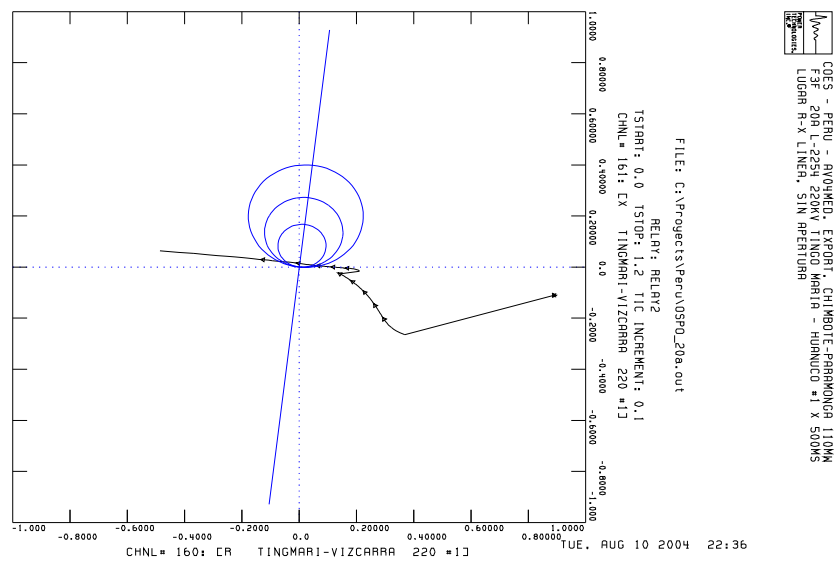


Fig. 13 Lugar de R-X en Tingo María – Vizcarra

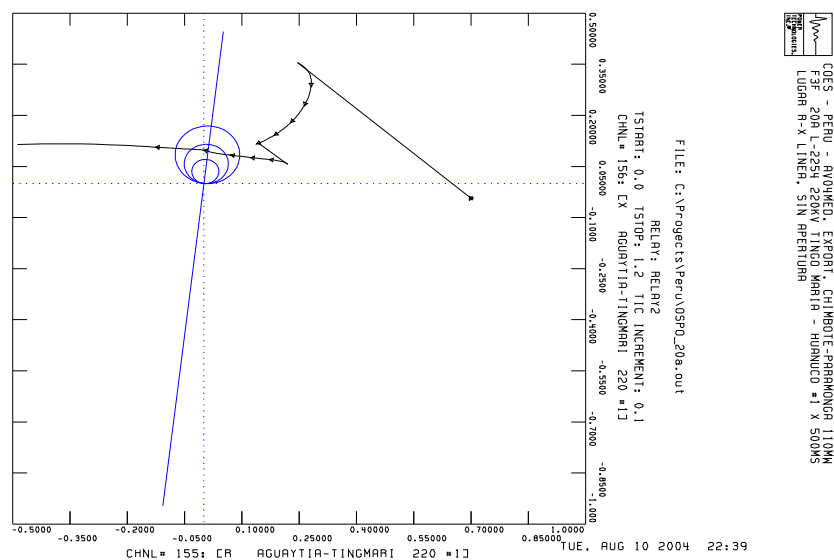


Fig. 14 Lugar de R-X en Aguaytía – Tingo María

Caso 2 (OSPO_20b) :

En este caso hay sólo un grupo de Aguaytía en servicio. No se detectan pérdidas de paso, ni entradas a la "zonas supuestas" en la oscilación posterior al despeje de la falla, como se aprecia en la Fig. 15 y la Fig. 16.

La central Aguaytía sigue aportando al SEIN adquiriendo rápidamente un nuevo estado de equilibrio.

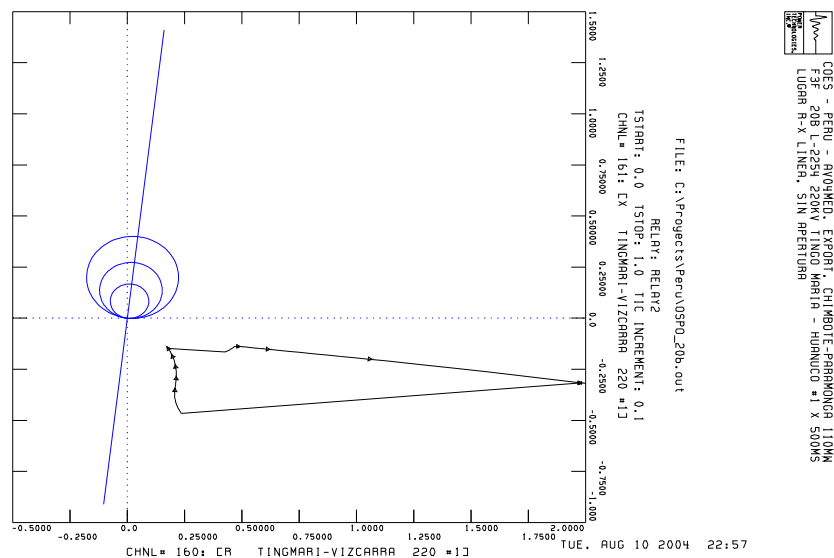


Fig. 15 Lugar de R-X en Tingo María – Vizcarra

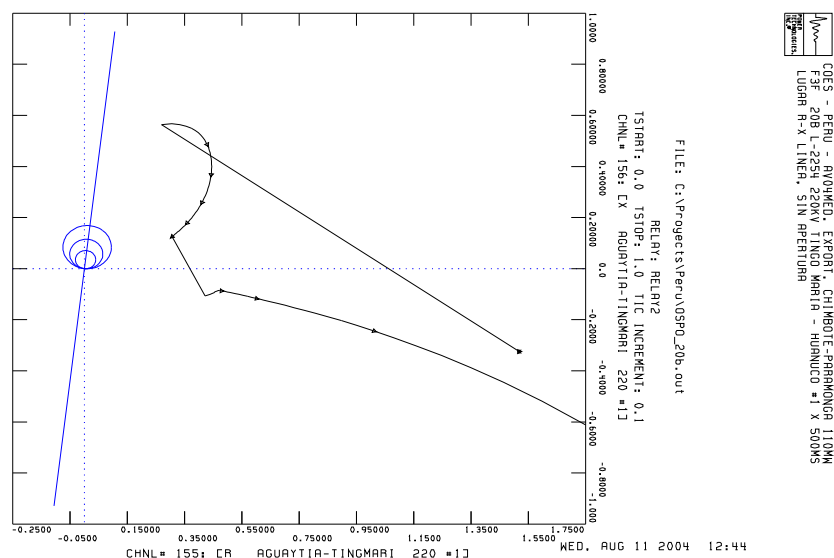


Fig. 16 Lugar de R-X en Aguaytía – Tingo María

Seccionamiento del Subsistema:

Las mediciones en la línea **L-252 Tingo María – Vizcarra** permiten detectar inequívocamente la pérdida de paso como consecuencia de fallas prolongadas en el sistema de 138 kV. Por lo tanto es candidata para la separación del área afectada y el resto del SEIN.

Si el nodo de 138 kV de Tingo María quedara desvinculado del SEIN por el despeje de la falla, la apertura de esta línea (L-253) por oscilaciones inestables desafectará al SEIN de las pulsaciones debidas a la pérdida de paso, y producirá una isla con superávit cuya frecuencia no puede controlarse

sin intervención sobre el disparo y control de la generación de Aguaytía, de modo que la isla colapsará.

Si el fenómeno de pérdida de paso en la L-252 ocurre por una falla severa y prolongada en el sistema de 138 kV de modo que la Central Aguaytía quede vinculada al SEIN también a través del transformador de Tingo María, la pérdida de paso podría detectarse en la L-251 Aguaytía - Tingo María; en tal caso la apertura de la L-252 como línea candidata debería provocar la salida del transformador de Tingo María puesto que las pulsaciones de pérdida de paso seguirían a través de él deteriorando el estado operativo del sistema de 138 kV.

Por lo expuesto, sería conveniente en todos los casos que la detección de la pérdida de paso en la L-251 o L-252 produzca siempre la apertura de la L-251 Aguaytía - Tingo María, circunscribiendo el problema de la pérdida de paso a la central Aguaytía y el sistema de Pucallpa. De este modo quedarían en servicio la línea L-252 y el transformador de Aguaytía, evitándose estas maniobras de energización para recuperar esta parte del sistema.

En el Caso 2 no se detectan necesidades de disparo de la línea L-252; el sistema adquiere rápidamente un nuevo estado de equilibrio (oscilaciones amortiguadas), y el lugar de la impedancia permanece alejado de las "zonas supuestas" de disparo de los relés.

3.2.2 Falla L-252 Tingo María – Vizcarra 220 kV

Se aplica una falla trifásica por 0.100s en L-252 Tingo María - Vizcarra 220 kV, lado Tingo María, con despeje por apertura de la línea. La evaluación comprende como variantes el número de unidades de Aguaytía en servicio.

Caso 1 (OSPO_21a):

Este caso tiene 2 unidades de Aguaytía en servicio.

El centro eléctrico se detecta en la línea L-121 Tingo María - Huanuco, como se ilustra en la Fig. 17. El primer paso por la zona 1 es a los 0.430s, luego 0.886s, 1.189s, 1.441s, etc., con intervalos entre pasos de 0.456s, 0.303s, 0.252s, etc.

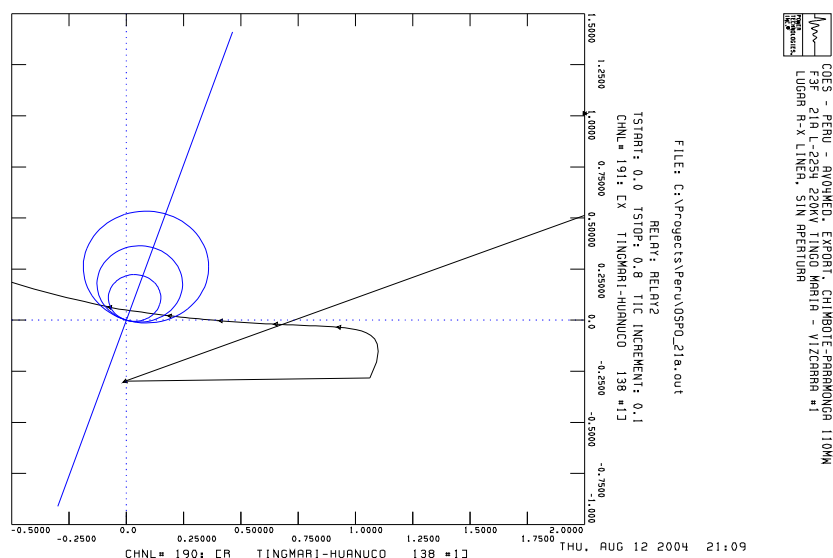


Fig. 17 Lugar de R-X en Tingo María - Huanuco

Un relé de impedancia en el extremo de 220 kV del transformador de Tingo María detectaría sucesivas entradas en la zona 2 (Fig. 18).

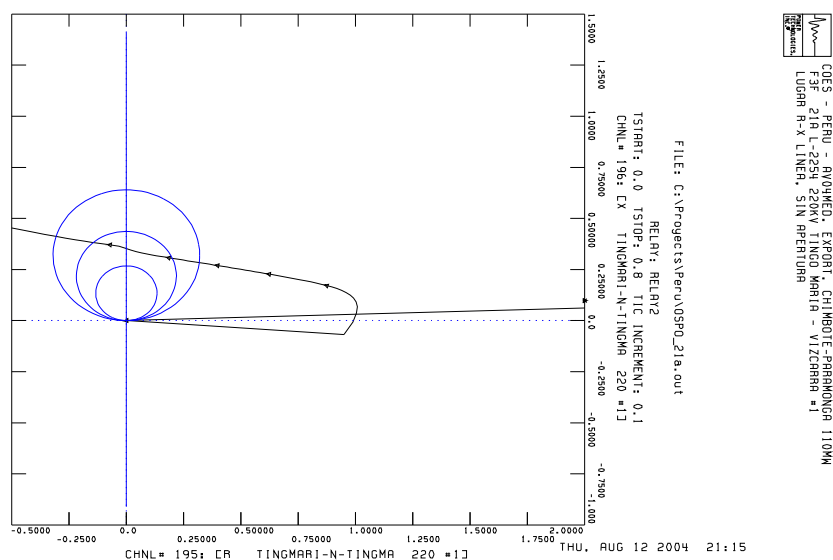


Fig. 18 Lugar de R-X en Transf. Tingo María lado 220 kV

Caso 2 (OSPO_21b) :

Este caso tiene 1 unidad de Aguaytía en servicio.

El centro eléctrico se detecta en la impedancia alta-media del transformador de Tingo María, como se ilustra en la Fig. 19. El primer paso por la zona 1 sucede a los 0.844s, el segundo a los 1.417s, luego a los 1.762s, 2.041s, etc., con un intervalo entre pasos de 0.573s, 0.345s, 0.279s, etc.

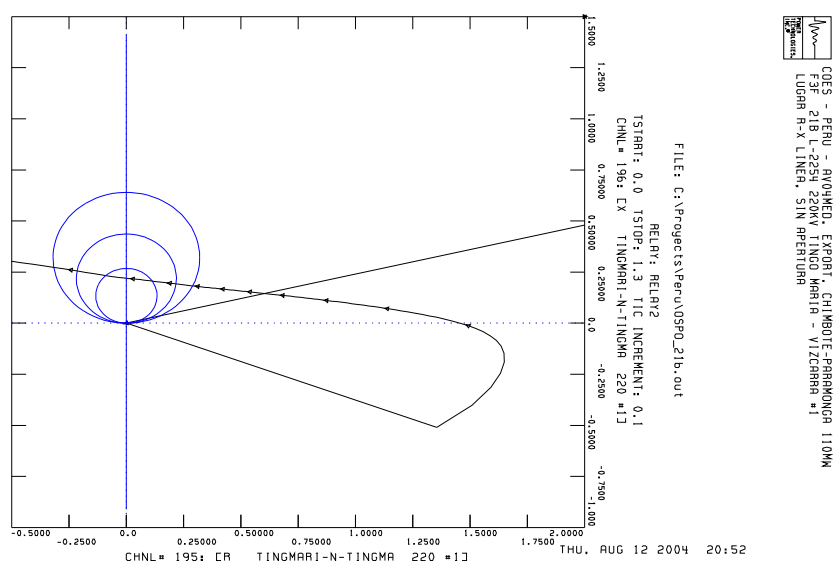


Fig. 19 Lugar de R-X en Transf. Tingo María lado 220 kV

En función de las características de los relés podría resultar necesario bloquear la protección de la L-121 Tingo María - Huanuco, que entra en 2da. zona, para evitar el desmembramiento descontrolado del sistema (Ver Fig. 20).

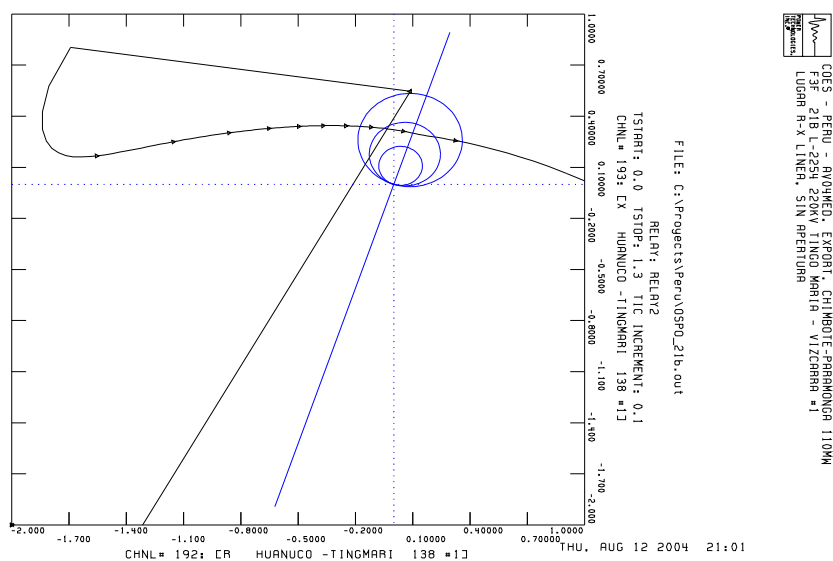


Fig. 20 Lugar de R-X en Tingo María - Huanuco

Seccionamiento del Subsistema:

Cuando hay 2 unidades de Aguaytía, la línea que detecta el centro eléctrico es la Tingo María - Huanuco, y un relé de distancia en el lado de alta del transformador de Tingo María detectaría 2da. zona.

Cuando hay 1 unidad en Aguaytía el centro eléctrico se desplaza hacia el transformador, y la línea Tingo María - Huanuco detectaría 2da. zona.

La apertura de una u otra rama provocará en cualquier caso una isla con superávit, cuyo éxito dependerá de la intervención de automatismos rápidos sobre la generación de Aguaytía. Sin acciones de control rápidas, la isla colapsará, por lo cual la sección donde se realiza la apertura determinará que zona que queda sujeta a un probable colapso.

De análisis preliminares se verifica en principio que es posible alimentar desde Paragsha el sistema de 138 kV asociado a Tingo María, de modo que la apertura del transformador de Tingo María por interdisparo ya sea que el centro eléctrico se detecte en el lado de alta del transformador, o en la línea Tingo María - Huanuco, ocasionará el menor daño al suministro. La **rama candidata** entonces para esta falla es **el Transformador de Tingo María**.

3.2.3 Falla L-2254 Vizcarra – Paragsha2 220 kV

El caso se designa como **OSPO_22a**, y tiene 2 unidades de Aguaytía en servicio.

La simulación aplica una falla trifásica por 0.100s en L-2254 Vizcarra – Paragsha2, lado Vizcarra, suponiendo que cuando se despeja la falla también se pierde toda la carga de Antamina (simulada con la apertura Vizcarra – Antamina 220 kV).

Las oscilaciones de potencia son amortiguadas, y no se detectan necesidades de bloqueo para las protecciones del corredor de 220 kV. La Fig. 21 demuestra una oscilación estable en la línea L-251 Aguaytía – Tingo María

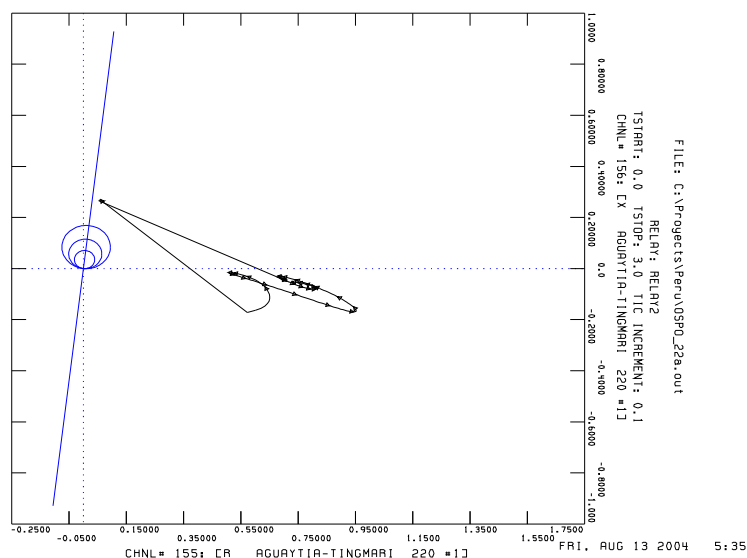


Fig. 21 Lugar de R-X en Aguaytía – Tingo María

3.2.4 Falla L-253 Vizcarra – Paramonga 220 kV

El caso se designa como **OSPO_23a**, y tiene 2 unidades de Aguaytía en servicio.

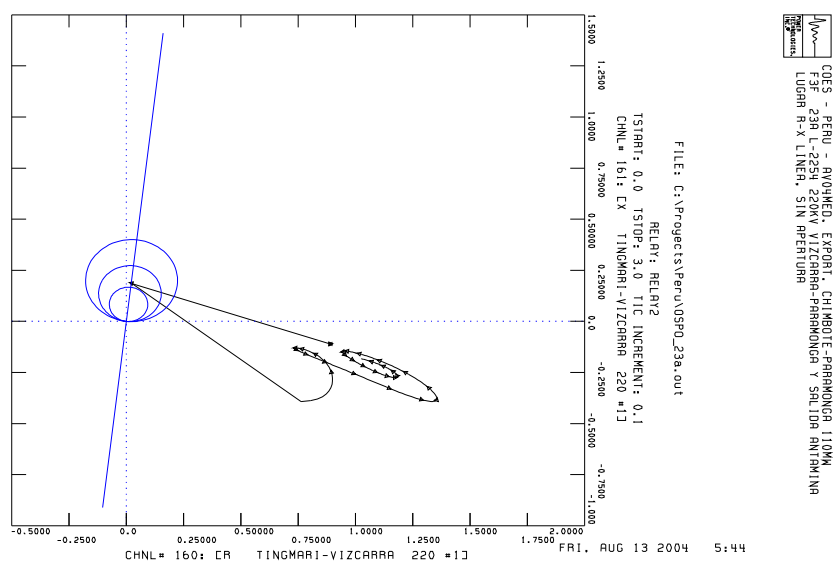


Fig. 22 Lugar de R-X en Tingo María – Vizcarra

La simulación aplica una falla trifásica por 0.100s en L-253 Vizcarra – Paramonga, lado Vizcarra, suponiendo que cuando se despeja la falla también se pierde toda la carga de Antamina (simulada con la apertura Vizcarra – Antamina 220 kV).

Las oscilaciones de potencia son amortiguadas, y no se detectan necesidades de bloqueo para las protecciones del corredor de 220 kV. La Fig. 22 demuestra una oscilación estable en la línea L-252 Tingo María – Vizcarra.

3.2.5 Variables monitoreadas

En todos los casos se han almacenado las siguientes variables:

- ◊ Ángulos de todas las máquinas en servicio
- ◊ Corriente en un extremo de las líneas de 220 kV L-251 Aguaytía – Tingo María, L-252 Tingo María – Vizcarra, L-253 Vizcarra – Paramonga, L-2254 Vizcarra – Paragsha, L-215 Chimbote – Paramonga y L-213 Paramonga – Huacho, y la línea de 138 kV Tingo María – Huanuco.
- ◊ Lugar R-X visto desde ambos extremos de cada una de las ramas mencionadas
- ◊ Tensión y ángulo en los nodos de 220 kV y 138 kV de las líneas mencionadas.
- ◊ Frecuencia en la barra de 220 kV de Trujillo Norte, Huacho y Tingo María.

3.2.6 Conclusiones

Se observa que la formación de una isla equilibrada en el subsistema que contiene a la C.T. Aguaytía, requiere la intervención de un sistema de control de emergencia para asegurar su éxito, ya sea ante la pérdida de L-252 Tingo María - Vizcarra o el despeje tardío por actuación de las protecciones de respaldo en la L-121 Tingo María - Huanuco.

En función de las capacidades de control de las protecciones de Tingo María - Vizcarra, el disparo ante pérdida de sincronismo sería recomendable luego de que el lugar de la impedancia atravesase la zona 1, con unos 270 grados de desfase entre extremos o más, para evitar tensiones de maniobra elevadas luego de la apertura.

Contemplando las mejoras en los recursos estabilizantes producidos en el estudio de Pequeña Señal, y las condiciones generales de los escenarios base (demandas típicas), se han extraído las siguientes conclusiones:

- ◊ Para los tiempos de falla habituales (0.100s) no se esperan oscilaciones de potencia proclives a la pérdida de sincronismo, ante falla trifásica con pérdida definitiva de alguna de las líneas L-2254 Vizcarra- Paragsha2 ó L-253 Vizcarra - Paramonga, aún si la falla involucra la pérdida de toda la carga en Antamina aumentando al máximo el saldo exportable por la línea remanente al sistema Centro.
- ◊ Con 1 o 2 unidades de la C.T. Aguaytía en servicio, la pérdida de la línea L-252 Tingo María - Vizcarra no permite formar una isla equilibrada a menos que se implementen sistemas de control en emergencia capaces de adecuar muy rápidamente la generación de la isla resultante.
- ◊ Con 2 unidades de la C.T. Aguaytía en servicio, una falla severa (trifásica) aplicada próxima a la barra de 138 kV de Tingo María que interrumpa la conexión con Paragsha en 138 kV, no permite la evacuación de la producción de la central a través del sistema de 220 kV por pérdida de sincronismo en la L-252 Tingo María - Vizcarra. La apertura de esta línea no permite formar una isla equilibrada, condenando al colapso al subsistema conectado a la central Aguaytía. Un oportuno disparo de la L-251 Tingo María - Aguaytía bloqueando las protecciones de la L-252, permitiría circunscribir el colapso a la central de Aguaytía y el subsistema de Pucallpa, dejando en servicio el nodo de 220 kV de Tingo María.

Con una sola unidad de Aguaytía no se detectan problemas de pérdida de sincronismo, y cabría esperar la continuidad del servicio en el sistema de 220 kV.

3.3 Línea Cotaruse – Socabaya y Campo Armiño – Cotaruse

Se han realizado dos simulaciones sobre un escenario con 234 MW de exportación Centro – Sur, 117 MW/terna medidos en Campo Armiño, y 120 MW de exportación Norte – Centro medida en Chimbote1. En esta condición operativa está en servicio toda la compensación serie asociada al sistema de transmisión Campo Armiño – Socabaya.

En el análisis de los resultados sólo se contempla el ingreso del lugar de la impedancia en las "zonas supuestas" para las líneas, describiendo las zonas en función de la impedancia de las líneas y no de los equivalentes línea-capacitor. No obstante, las simulaciones registran el lugar de la impedancia "visto" por cada extremo de las ramas comprendidas entre Campo Armiño y Socabaya, tanto de las líneas como los capacitores serie, para un análisis de detalle ulterior.

3.3.1 Falla L-2053 Cotaruse – Socabaya 220 kV

El caso se ha designado **OSPO_30a**. La simulación aplica una falla trifásica en la línea L-2053 Cotaruse – Socabaya, lado línea en Cotaruse, con despeje a los 0.100s por apertura de L-2053. El desarrollo de la falla es 0.010s de aplicación simple de la falla descripta, luego se supone la inserción de los varistores cortocircuitando los capacitores serie del lado Campo Armiño (L-2051/52) y el de la L-2053; cuando se despeja la falla se supone la reinserción de los capacitores de las L-2051/52 (la L-2053 queda desconectada).

El lugar de la impedancia no ingresa en las "zonas supuestas" de protección luego del despeje de la falla, no detectando pérdida de sincronismo alguna. El sistema de transmisión resultante puede seguir transportando los 234 MW al Sur sin oscilaciones con bajo amortiguamiento. La Fig. 23 demuestra el lugar de la impedancia de la terna que queda en servicio entre Cotaruse y Socabaya, que es la más comprometida.

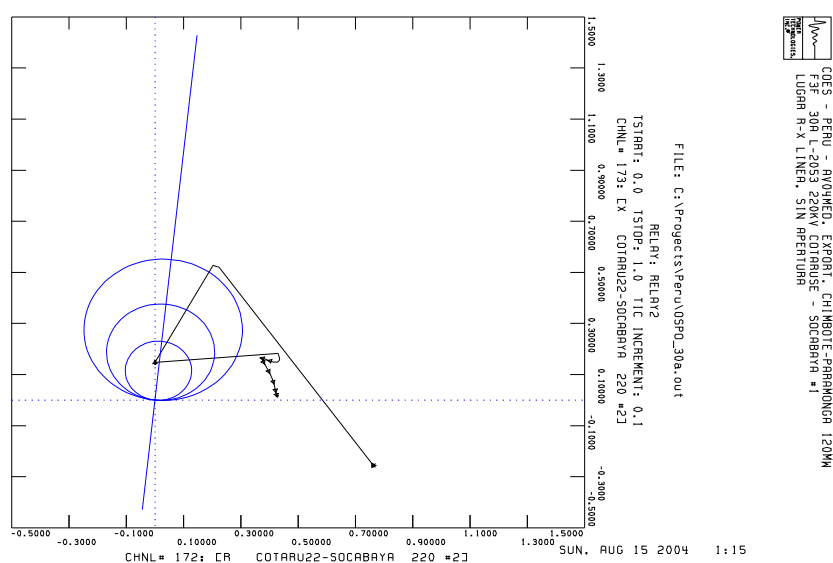


Fig. 23 Lugar de R-X en Cotaruse (lado línea) – Socabaya #2

3.3.2 Falla L-2051 Campo Armiño – Cotaruse 220 kV

El caso se ha designado **OSPO_31a**. La simulación aplica una falla trifásica en la línea L-2051 Campo Armiño – Cotaruse, lado Campo Armiño, con despeje a los 0.100s por apertura de L-2051. En este caso, no se considera la inserción de los varistores de protección de los capacitores serie.

El lugar de la impedancia ingresa en la 3ra. zona de la "protección supuesta" (Fig. 24) luego del despeje de la falla, no detectando un centro eléctrico en ninguna otra rama.

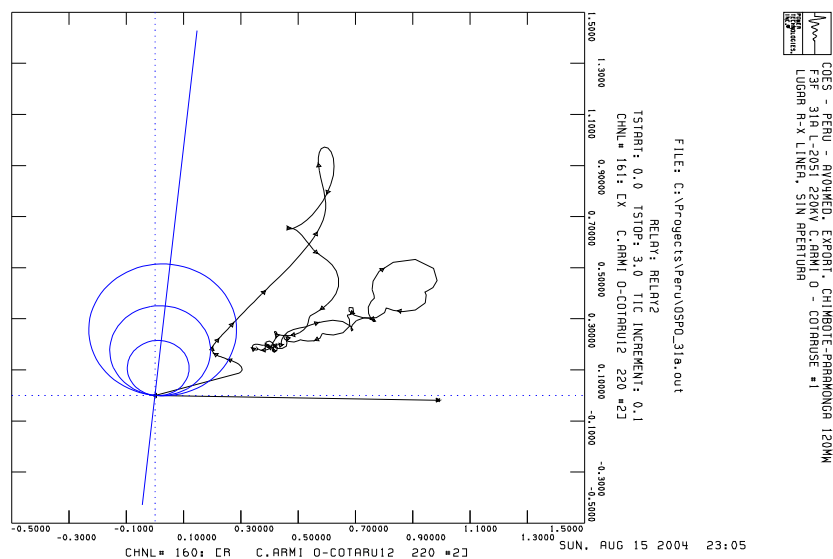


Fig. 24 Lugar de R-X en Campo Armiño – Cotaruse #2

La forma peculiar del lugar de la impedancia demostrado se debe a que pierden el sincronismo los motores 'M1' en las barras 56008 (MILLSMLB13.8), 56002 (MILLSIT14.16), 56004 (MILLSIT24.16) y 56024 (MOTSILO14.16). Si se supone la desconexión de los motores cuando superan 180 grados respecto del ángulo promedio del sistema, el motor en la barra 56008 se desconectaría a los 0.221s, y el resto a los 0.305s, resultando ahora el lugar de la impedancia como se muestra en la Fig. 25.

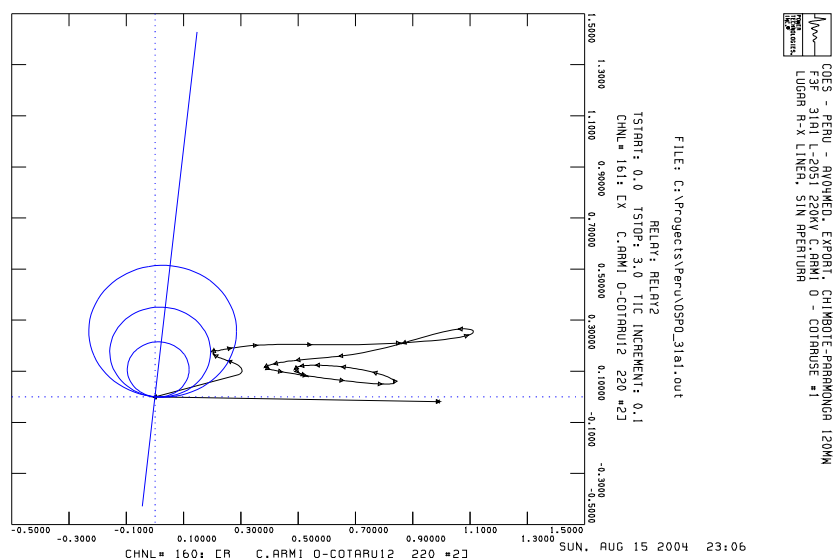


Fig. 25 Lugar de R-X en Campo Armiño – Cotaruse #2 (versión 2)

A menos de la pérdida de sincronismo de los motores, el sistema de transmisión resultante puede seguir transportando los 234 MW al Sur sin oscilaciones con bajo amortiguamiento.

3.3.3 Variables monitoreadas

En todos los casos se han almacenado las siguientes variables:

- ◇ Ángulos de todas las máquinas en servicio
- ◇ Corriente en el extremo Campo Armiño y Socabaya de las líneas de 220 kV entre dichas subestaciones, y la corriente en los capacitores serie de 220 kV
- ◇ Lugar R-X visto desde ambos extremos de cada una de las ramas mencionadas
- ◇ Tensión y ángulo en los nodos de 220 kV de las líneas mencionadas.
- ◇ Frecuencia en la barra de 220 kV de Campo Armiño y Socabaya.

3.3.4 Conclusiones

No se observaron oscilaciones con tendencia a la pérdida de sincronismo para fallas de 0.100s, tanto aplicadas en el lado Campo Armiño de la línea Campo Armiño - Cotaruse, como si se aplican en Cotaruse - Socabaya, lado línea en Cotaruse.

Las oscilaciones son rápidamente amortiguadas, y según una primera aproximación, el lugar de la impedancia estaría fuera de las zonas de disparo de las protecciones comunes para la falla entre Cotaruse - Socabaya, pero ingresando en la 3ra. zona en el caso de la falla Campo Armiño - Cotaruse. El grado de compromiso respecto del tiempo de permanencia en una zona debe revisarse considerando las

características particulares de las protecciones en líneas
compensadas.

3.4 Sistema del Sudeste

Se analizaron 2 escenarios partiendo del de demanda Media de Avenida 2004, que se tomó como Base. Los nuevos casos son designados Caso 1 y 2, y presentan como variantes entre ellos el despacho de las centrales:

	Caso 1	Caso 2
San Gabán	2x50.0 MW	2x58.0 MW
Machupicchu	3x27.7 MW	3x30.0 MW
Charcani V	3x45.0 MW	3x48.0 MW

El despacho incrementado en el Sudeste (Caso 2) a partir del despacho base (Caso 1), someterá a las líneas y máquinas a un mayor requerimiento de estabilidad, asimilando también su efecto al que se obtendría en el Caso 1 con una mayor permanencia de la falla.

Ambos escenarios tienen un tránsito por la línea Chimbote - Paramonga de 100 MW, mayor al previsto en el escenario de referencia, y el equilibrio demanda generación respecto del despacho original se obtuvo mayormente a expensas de centrales del centro (Matucana, Chimay y Yanango) que no participan marcadamente en los modos de oscilación característicos del sistema del Sudeste.

Se ha estudiado el comportamiento del subsistema ante fallas trifásicas aplicadas durante 0.100s en los principales corredores de 138 y 220 kV del área. Todas las fallas se aplican a los 0.100s de simulación. La misma falla aplicada en ambos escenarios permite mostrar la influencia del despacho en el cambio en el lugar de la impedancia y la velocidad de desplazamiento en su trayectoria, aportando un margen para la detección de las condiciones de disparo o bloqueo, y la oportunidad de emisión de las órdenes de apertura.

3.4.1 Recursos de control de emergencia en sobrefrecuencia

En las simulaciones no se tomó en cuenta el esquema de protección de sobrefrecuencia asignado a las unidades de San Gabán y Machupicchu, pertenecientes al Esquema de Rechazo de Cargas y Generación 2003 para el SEIN, en razón de que este recurso fue previsto para el control de frecuencia del área Sur integrada, contemplando su coordinación con la reducción rápida de potencia y/o desconexión del transformador de bloque de la central ILO 2.

Algunas pruebas preliminares con tal esquema permitieron verificar que el mismo no se adapta a las diversas condiciones de aislamiento del sistema del Sudeste contempladas en este estudio.

3.4.2 Presentación de los resultados

Se describen sintéticamente para cada falla los aspectos salientes de la simulación en ambos escenarios, tales como:

- ◇ los tiempos de entrada a la primera zona en las líneas candidatas para el seccionamiento del subsistema, y la duración del intervalo entre entradas. Los tiempos corresponden a los medidos a partir del despeje de la falla por apertura de la línea afectada.

- ◊ las zonas más comprometidas de las protecciones de las otras líneas afectadas por la oscilación luego del despeje de la falla. La mención de la línea implica que al menos uno de los extremos presenta dicha condición. No se toma en cuenta el tiempo de permanencia en las zonas 2 y 3, dado que la tolerancia depende de las características específicas de los ajustes.

Como se ha descrito en "Metodología", las zonas se describen mediante un modelo estándar de protección de distancia del tipo Mho, de la librería de modelos del simulador PSS/E (RELAY2) que se usa para calcular la impedancia vista en los extremos de línea.

En el caso de líneas con tomas intermedias, como la L-1005, L-1006 y L-1022, se considera como impedancia de la línea a los efectos de definir la zona, la suma de las impedancias longitudinales de cada tramo, al igual que la impedancia de los devanados entre alta y media del transformador de Puno 220/138/60 kV.

Los resultados se introducen con un resumen, y luego se presenta el análisis detallado de cada caso, sugiriendo el(los) lugar(es) donde convendría seccionar el sistema.

3.4.3 Falla L-1011 Azángaro – Juliaca 138 kV

En los dos casos pierde el sincronismo la línea **L-1008 Tintaya – Callalli**, la cual se considera candidata para el aislamiento del subsistema. En función de las características de los relés podría resultar necesario bloquear las siguientes protecciones para evitar el desmembramiento descontrolado del sistema:

- ◊ L-1005 Quencoro – Tintaya;
- ◊ L-1006 Azángaro – Tintaya;
- ◊ L-1020 Santuario – Callalli

Caso 1 (OSPO_40a) :

Entra a la zona 1 de la línea Tintaya – Callalli a los 0.604s, luego a los 1.045s, 1.348s, 1.594s, etc., con un intervalo entre entradas desde 0.441s, luego 0.303s, 0.246s, etc. (Fig. 26)

El lugar de la impedancia también entra durante la oscilación a las características de las siguientes protecciones:

- ◊ Quencoro – Tintaya: Entra en 2da. zona
- ◊ Azángaro – Tintaya: Entra en 2da. zona
- ◊ Santuario – Callalli: Entra en 3ra. zona

Hay pérdida de sincronismo de los motores M1, M2 y M3 en la barra 61118 de Tintaya como consecuencia de la falla. La Fig. 26 ilustra la trayectoria del lugar de la impedancia en el plano R-X, para 1s de simulación, superpuesta a las "zonas supuestas" por el modelo RELAY2.

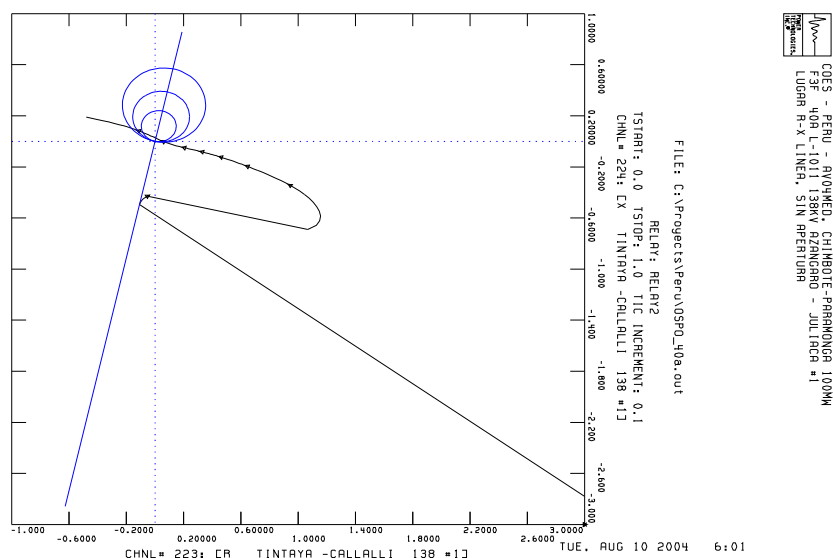


Fig. 26 Lugar de R-X en Tintaya – Callalli

Caso 2 (OSPO_40b) :

Pasa por la zona 1 de la línea Tintaya – Callalli (Fig. 27) a los 0.370s, a los 0.715s, 0.970s, 1.186s, etc. en intervalos de paso desde 0.345s, 0.255s, 0.216s, etc.

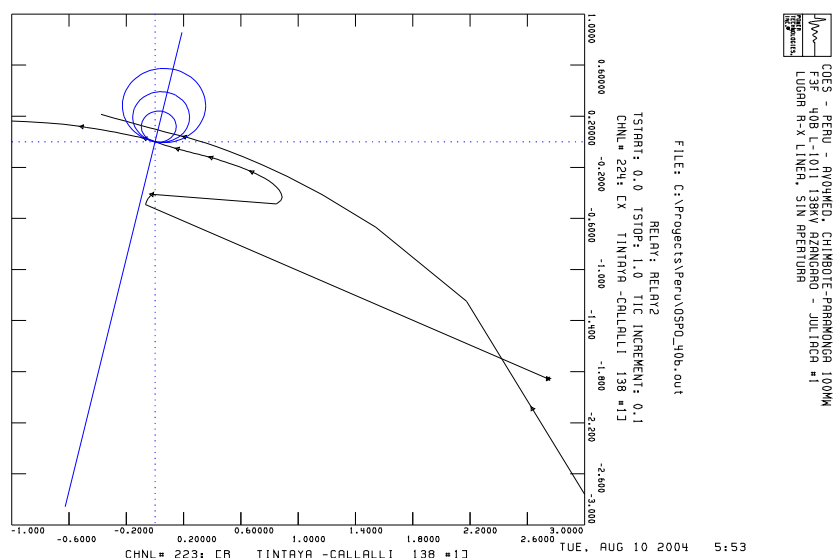


Fig. 27 Lugar de R-X en Tintaya – Callalli

El lugar de la impedancia también entra durante la oscilación a las características de las siguientes protecciones:

- ◊ Quencoro – Tintaya: Entra en 1ra. zona (Fig. 28)
- ◊ Azángaro – Tintaya: Entra en 1da. zona (Fig. 29)

◊ Santuario - Callalli: Entra en 3ra. zona (Fig. 30)

Hay pérdida de sincronismo de los motores M1, M2 y M3 en la barra 61118 de Tintaya como consecuencia de la falla.

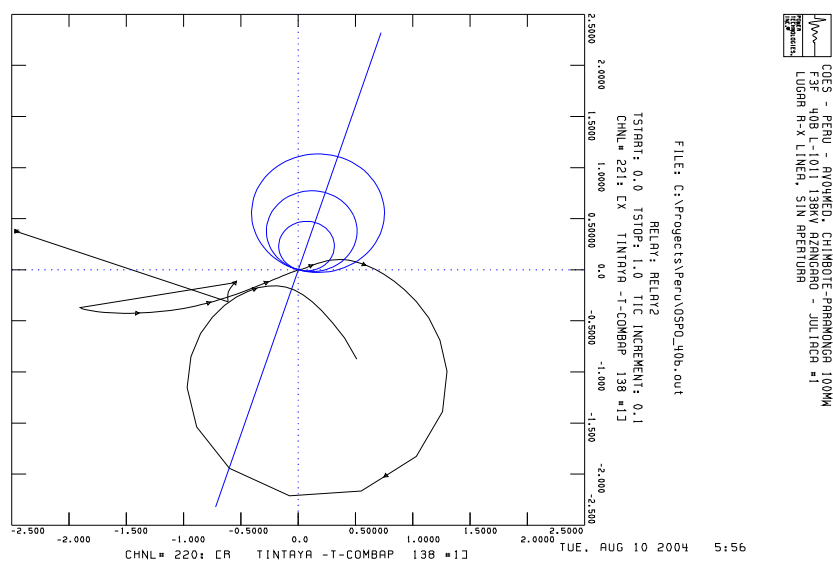


Fig. 28 Lugar de R-X en Tintaya – Quencoro

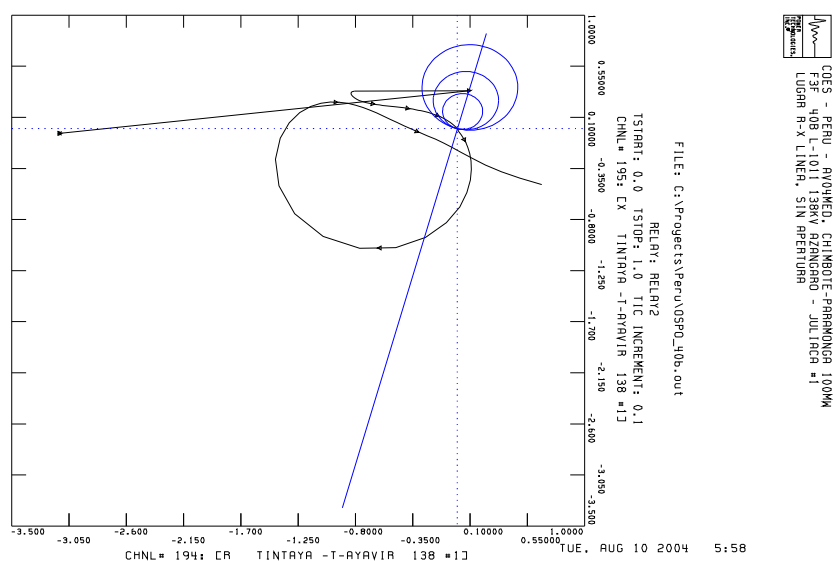


Fig. 29 Lugar de R-X en Azángaro – Tintaya

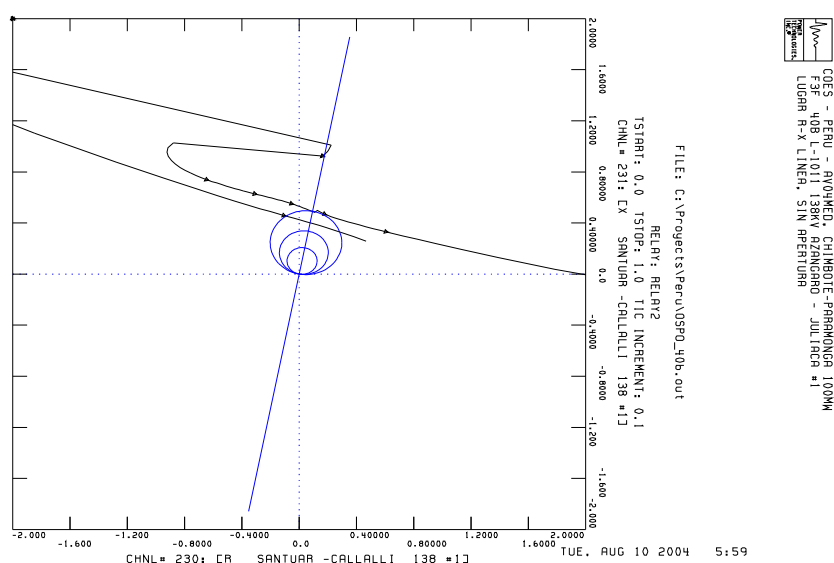


Fig. 30 Lugar de R-X en Santuario – Callalli

Seccionamiento del Subsistema:

La detección de la pérdida de paso en la L-1008 Tintaya - Callalli es inequívoca. La apertura de esta línea producirá una isla con superávit, y la situación no cambia mucho si la frontera se extiende seccionando la L-1020 Callalli - Santuario, debido a la escasa demanda relativa de Callalli.

La apertura ocasionará un estado de sobrefrecuencia en la isla, desafectando al resto del SEIN de las pulsaciones de alta frecuencia debidas a la pérdida de sincronismo.

3.4.4 Falla L-1012 Juliaca – Puno 138 kV

Sólo en el Caso 2 pierde el sincronismo la línea **L-1008 Tintaya - Callalli**, la cual se considera candidata para el aislamiento del subsistema.

En función de las características de los relés podría resultar necesario bloquear las siguientes protecciones para evitar el desmembramiento descontrolado del sistema:

- ◊ L-1005 Quencoro - Tintaya;
- ◊ L-1006 Azángaro - Tintaya;
- ◊ L-1020 Santuario - Callalli

Caso 1 (OSPO_41a) :

No se detecta la pérdida de sincronismo ni aparentes necesidades de bloqueo de relés, dado que el lugar de la impedancia no atravesaría ninguna de las "zonas supuestas" (ver Fig. 31).

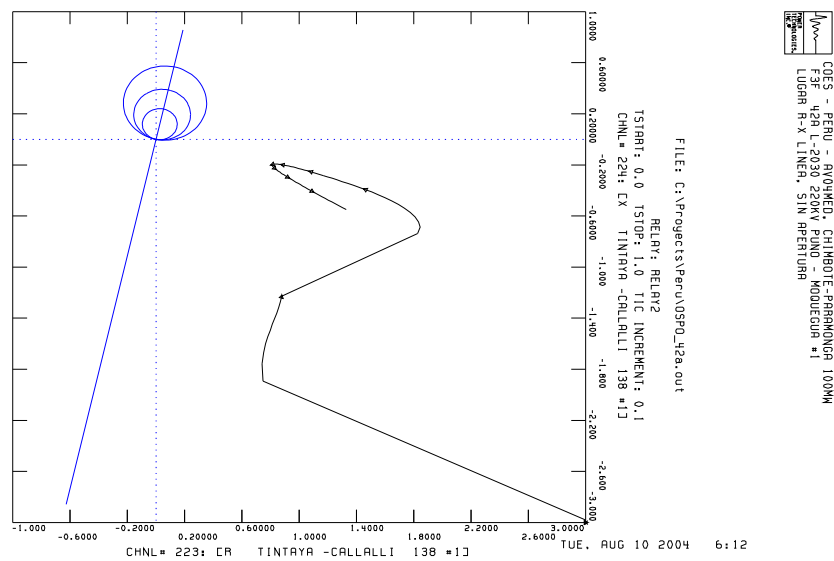


Fig. 31 Lugar de R-X en Tintaya – Callalli

Caso 2 (OSPO_41b) :

Hay pérdida de sincronismo únicamente en la L-1008 Tintaya - Callalli (Fig. 32). El lugar de la impedancia pasa la zona 1 a los 0.526s, luego a los 0.931s, 1.204s, 1.423s, etc., con intervalo entre pasos desde 0.405s, 0.273s, 0.219s, etc.

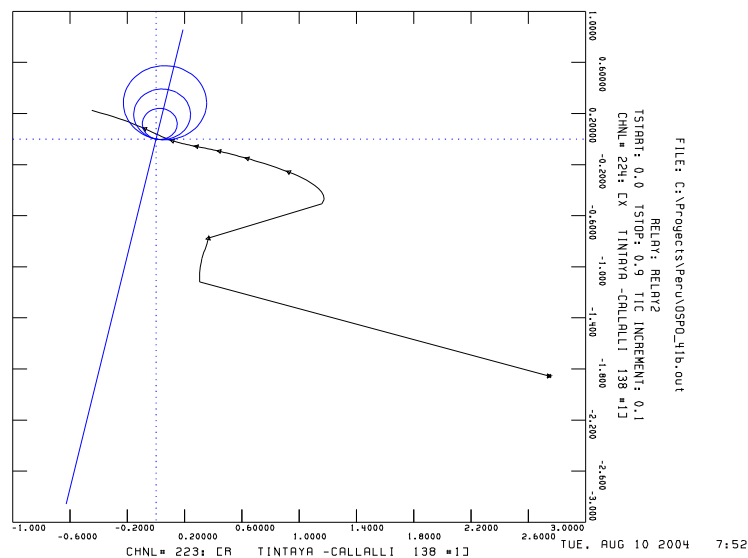


Fig. 32 Lugar de R-X en Tintaya – Callalli

El lugar de la impedancia durante la oscilación también entra a las características de las siguientes protecciones:

- ◊ Quencoro - Tintaya: Entra en 2ra. zona (Fig. 33)
- ◊ Azángaro - Tintaya: Entra en 2da. zona

◊ Santuario - Callalli: Entra en 3ra. zona

Hay pérdida de sincronismo de los motores M1, M2 y M3 en la barra 61118 de Tintaya como consecuencia de la falla.

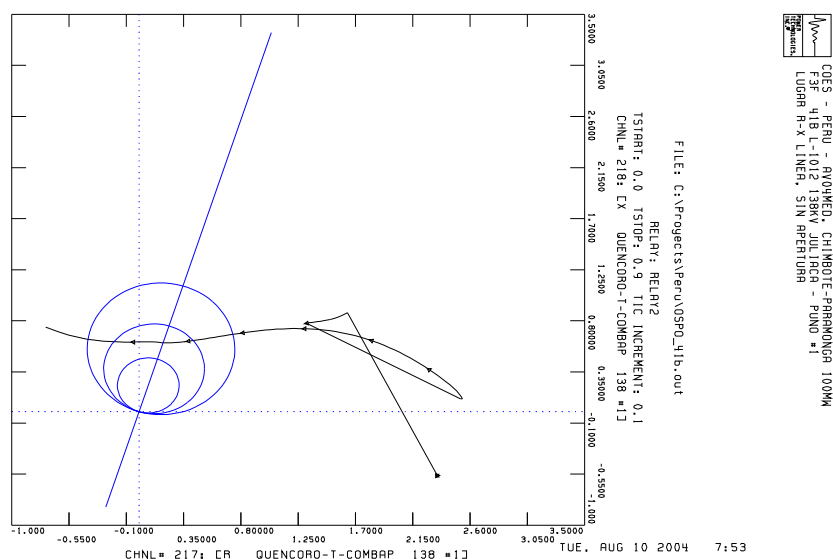


Fig. 33 Lugar de R-X en Quencoro – Tintaya

Seccionamiento del Subsistema:

La detección de la pérdida de paso en la L-1008 Tintaya - Callalli es inequívoca. La apertura de esta línea producirá una isla con superávit, y la situación no cambia mucho si la frontera se extiende incluyendo a la subestación Callalli.

3.4.5 Falla L-2030 Puno – Moquegua 220 kV

Sólo en el Caso 2 pierde el sincronismo la línea **L-1008 Tintaya - Callalli**, la cual se considera candidata para el aislamiento del subsistema.

En función de las características de los relés podría resultar necesario bloquear las siguientes protecciones para evitar el desmembramiento descontrolado del sistema:

- ◊ L-1005 Quencoro - Tintaya;
- ◊ L-1006 Azángaro - Tintaya;
- ◊ L-1020 Santuario - Callalli

Caso 1 (OSPO_42a) :

No se detecta la pérdida de sincronismo ni aparentes necesidades de bloqueo de relés, dado que el lugar de la impedancia no atravesaría ninguna de las "zonas supuestas".

Caso 2 (OSPO_42b) :

Hay pérdida de sincronismo únicamente en la L-1008 Tintaya - Callalli. El lugar de la impedancia pasa la zona 1 a los

0.634s, la 2da. vez a los 1.081s, luego 1.366s, 1.597s, etc., con un intervalo entre pasos desde 0.447s, luego 0.285s, 0.231s, etc.

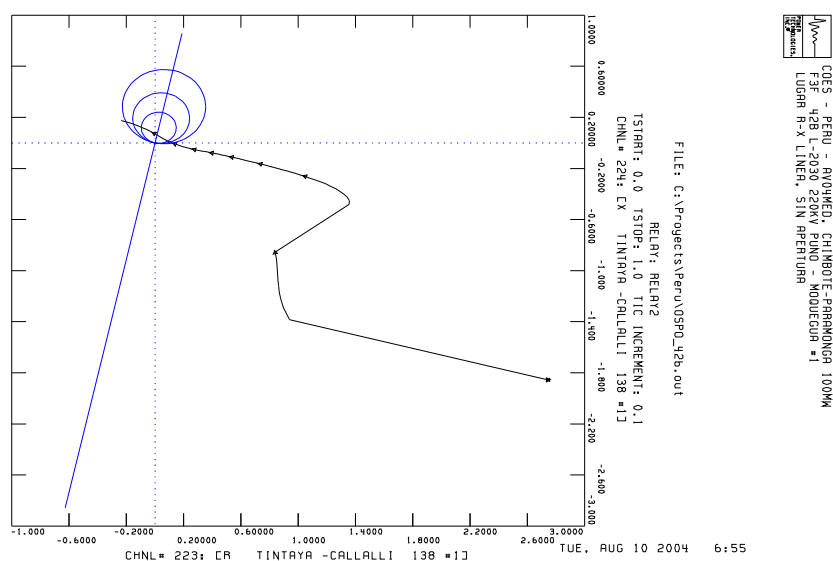


Fig. 34 Lugar de R-X en Tintaya - Callalli

El lugar de la impedancia también entra durante la oscilación a las características de las siguientes protecciones:

- ◊ Quencoro - Tintaya: Entra en 2ra. zona
- ◊ Azángaro - Tintaya: Entra en 2da. zona
- ◊ Santuario - Callalli: Entra en 3ra. zona

Hay pérdida de sincronismo de los motores M1, M2 y M3 en la barra 61118 de Tintaya como consecuencia de la falla.

Seccionamiento del Subsistema:

La detección de la pérdida de paso en la L-1008 Tintaya - Callalli es inequívoca. La apertura de esta línea producirá una isla con superávit, y la situación no cambia mucho si la frontera se extiende incluyendo a la subestación Callalli.

3.4.6 Falla L-1006/2 Azángaro - Tintaya 138 kV

Sólo en el Caso 2 pierde el sincronismo la línea **L-1011 Azángaro - Juliaca**, la cual se considera candidata para el aislamiento del subsistema.

En función de las características de los relés podría resultar necesario bloquear las siguientes protecciones para evitar el desmembramiento descontrolado del sistema:

- ◊ L-1010 San Gabán - Azángaro;
- ◊ L-1009 San Rafael - Azángaro

Caso 1 (OSPO_43a) :

No se detecta la pérdida de sincronismo ni aparentes necesidades de bloqueo de relés, dado que el lugar de la impedancia no ingresaría a ninguna de las "zonas supuestas".

Caso 2 (OSPO_43b) :

Hay pérdida de sincronismo únicamente en Azángaro - Juliaca, donde se registra el centro eléctrico. El lugar de la impedancia pasa la zona 1 a los 0.283s, luego a los 0.649s, 0.874s, 1.057s, etc., con un intervalo de tiempo entre pasos desde 0.366s, luego 0.225s, 0.183s, etc.

El lugar de la impedancia en la Fig. 35 atraviesa por 2da. vez en 0.900s de simulación la característica de la zona 1.

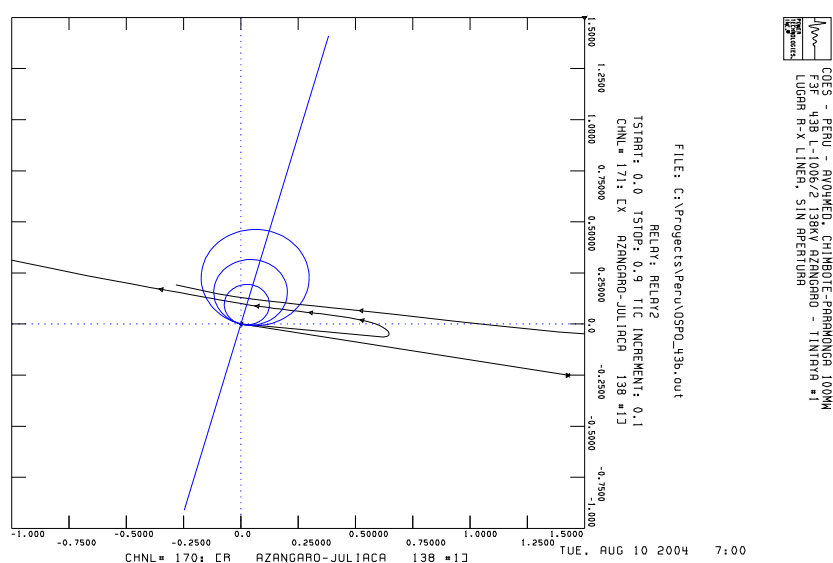


Fig. 35 Lugar de R-X en Azángaro – Juliaca

El lugar de la impedancia también entra durante la oscilación a las características de las siguientes protecciones:

- ◊ San Gabán - Azángaro: Entra en 3ra. zona
- ◊ San Rafael - Azángaro: Entra en 3ra. zona

La Fig. 36 también demuestra la trayectoria pasando 2 veces por la zona 3 de San Gabán - Azángaro.

No hay necesidades de bloqueo en el sistema de evacuación de la central Machupicchu.

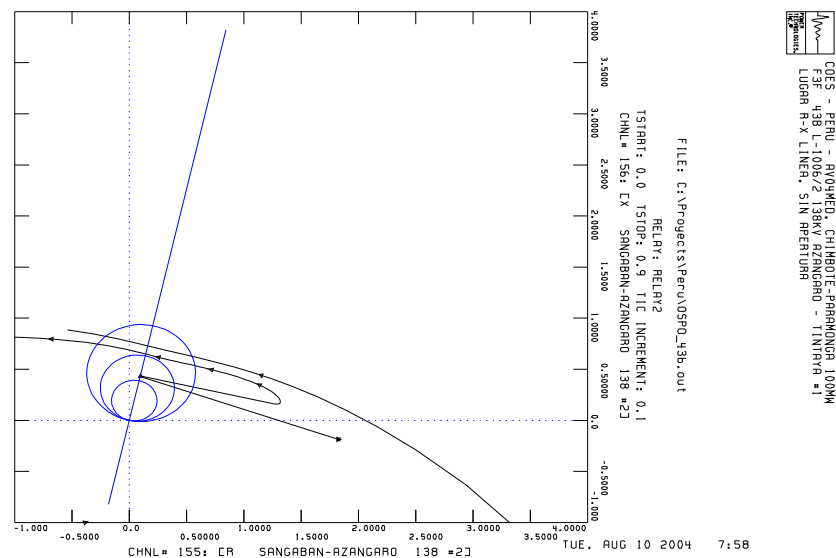


Fig. 36 Lugar de R-X en San Gabán – Azángaro

Seccionamiento del Subsistema:

La detección de la pérdida de paso en la línea L-1011 Azángaro – Juliaca es inequívoca, sin embargo la apertura del subsistema no tiene chances de lograr equilibrio en la isla que incluye San Gabán, como tampoco si se abriesen algunas de las líneas entre Juliaca y Moquegua dado la escasa demanda agregada. En consecuencia, la apertura de cualquiera de estos tramos implicará seguramente la pérdida de suministro de la demanda que quede conectada a San Gabán.

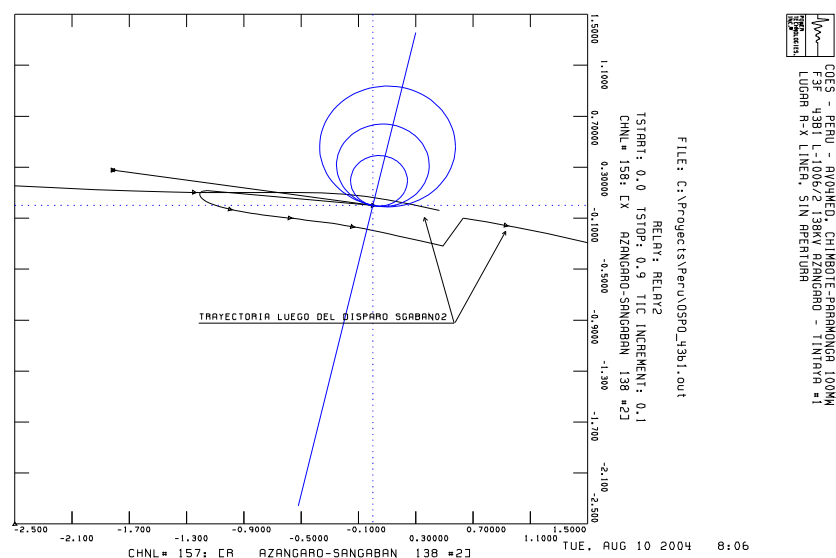


Fig. 37 Lugar de R-X en Azángaro – S. Gabán con disparo grupo 2 S.Gabán

Si al momento de la detección de la pérdida de sincronismo en Azángaro – Juliaca se disparase un grupo en San Gabán,

(considerando un retardo de 0.100s debido al interruptor), el centro eléctrico caería luego en las líneas San Rafael - Azángaro y San Gabán - Azángaro, manteniendo la perturbación sobre el sistema, como se puede observar en la Fig. 37.

Convendría entonces aislar el sistema de San Gabán lo antes posible cuando se detecta la pérdida de paso en Azángaro - Juliaca.

3.4.7 Falla L-1006/1 Tintaya – Azángaro 138 kV

No hay pérdida de sincronismo en los 2 casos estudiados (**Caso 1: OSPO_44a y Caso 2: OSPO_44b**), ni necesidad de bloqueo de las protecciones luego del despeje de la falla. La característica de protección más próxima al lugar de la impedancia durante la oscilación se registra en el Caso 2 sobre la L-1005 Quencoro - Tintaya, como se observa en la Fig. 38.

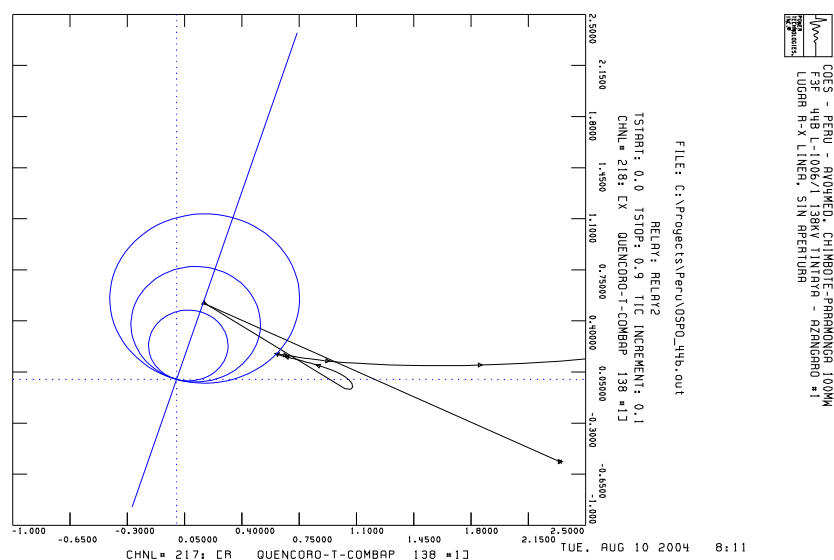


Fig. 38 Lugar de R-X en Quencoro – Tintaya

Estos resultados demuestran que la influencia de la severidad de la falla sobre el sistema de evacuación de San Gabán es superior a la pérdida de la línea L-1006 Azángaro - Tintaya.

En el Caso 2 se detecta la pérdida de sincronismo del motor M1 en la barra 61118 de Tintaya, como consecuencia de la falla.

3.4.8 Falla L-1008 Tintaya – Callalli 138 kV

Sólo en el Caso 2 pierde el sincronismo la línea **L-1011 Azángaro - Juliaca**, la cual se considera candidata para el aislamiento del subsistema.

En función de las características de los relés podría resultar necesario bloquear las siguientes protecciones para evitar el desmembramiento descontrolado del sistema:

- ◇ L-1010 San Gabán - Azángaro;
- ◇ L-1009 San Rafael - Azángaro;

◊ L-1012 Juliaca - Puno

Caso 1 (OSPO_45a) :

No se detecta la pérdida de sincronismo de ninguna línea ni aparentes necesidades de bloqueo de relés, dado que el lugar de la impedancia no atravesaría ninguna de las "zonas supuestas".

Como consecuencia de la severidad de la falla trifásica y su tiempo de aplicación, se pierde el sincronismo de los motores síncronos de Tintaya (M1, M2 y M3 en barra 61118).

Caso 2 (OSPO_45b) :

Hay pérdida de sincronismo únicamente en Azángaro - Juliaca, donde se registra el centro eléctrico como se observa en la Fig. 39. El lugar de la impedancia pasa la zona 1 a los 0.397s, luego a los 0.832s, 1.123s, 1.357s, etc., con un intervalo de tiempo entre pasos desde 0.435s, luego 0.291s, 0.234s, etc.

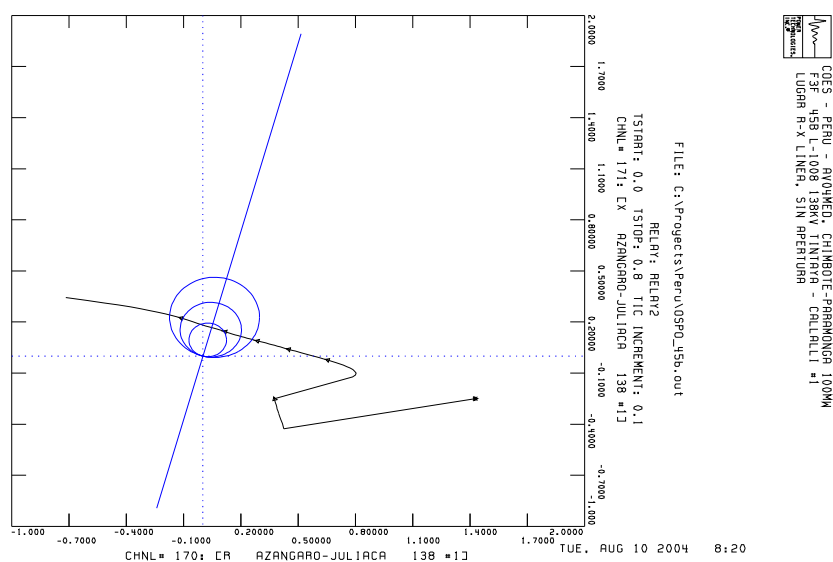


Fig. 39 Lugar de R-X en Azángaro – Juliaca

El lugar de la impedancia también entra durante la oscilación a las características de las siguientes protecciones estimadas:

- ◊ San Gabán - Azángaro: Entra en 3ra. zona
- ◊ San Rafael - Azángaro: Entra en 3ra. zona
- ◊ Juliaca - Puno: Entra en 2da. zona (Fig. 40)

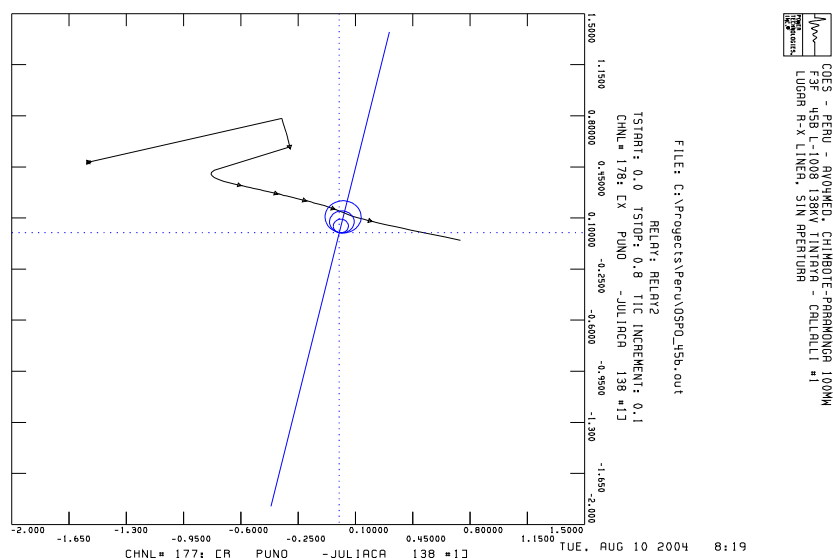


Fig. 40 Lugar de R-X en Juliaca – Puno

Como consecuencia de la severidad de la falla trifásica y su tiempo de aplicación, se pierde el sincronismo de los motores síncronos de Tintaya (M1, M2 y M3 en barra 61118).

Seccionamiento del Subsistema:

La detección de la pérdida de paso se da en la L-1011 Azángaro – Juliaca. La apertura de esta línea producirá una isla con superávit, y para que alcance un nuevo estado de equilibrio serán necesarias acciones de control sobre las unidades de San Gabán y/o Machupicchu.

3.4.9 Falla L-1020 Callalli – Santuario 138 kV

No hay pérdida de sincronismo en los 2 casos estudiados (**Caso 1: OSPO_46a y Caso 2: OSPO_46b**), ni necesidad de bloqueo de las protecciones luego del despeje de la falla.

La característica de protección más próxima al lugar de la impedancia durante la oscilación se registra en el Caso 2 sobre las líneas L-1005 Quencoro – Tintaya (Fig. 41) y L-1011 Azángaro – Juliaca.

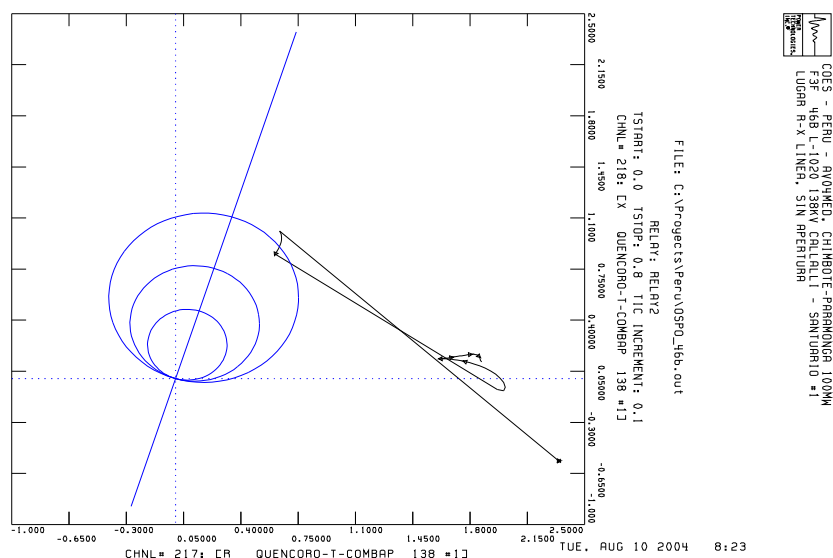


Fig. 41 Lugar de R-X en Quencoro - Tintaya

3.4.10 Falla L-1021 Santuario – Socabaya #2 138 kV con L-1022 F/S

Los casos simulados difieren de los Casos 1 y 2, únicamente en que la terna 1 L-1022 Santuario – T.Jesús – Socabaya está fuera de servicio.

La pérdida de sincronismo se verifica en **L-1012 Juliaca – Puno**, pero también en el **transformador 138/33 kV de Chilina**.

En función de las características de los relés puede ser necesario bloquear las siguientes protecciones para evitar desmembramientos descontrolados:

- ◊ L-1011 Azángaro – Juliaca;
- ◊ L-2030 Moquegua – Puno;
- ◊ Transformador 138/33 kV de Chilina;
- ◊ Transformador 220/138 kV de Puno.

Caso 1 (OSPO_47a) :

Se detecta una pérdida de sincronismo en las siguientes secciones del subsistema:

- ◊ Impedancia del transformador de Chilina 138/33 kV, por la que pasa en 3 ocasiones: a los 0.505s, luego a 1.222s y finalmente a los 1.627s, con un tiempo de ciclo de .717s y luego 0.405s (Fig. 42)
- ◊ Juliaca – Puno, que se constituye luego en el único centro eléctrico. El lugar de la impedancia entra en la zona 1 a los 0.544s, luego 0.946s, 1.216s, 1.435s, etc., con intervalos entre pasos de 0.402s, 0.270s, 0.219s, etc. (Fig. 43)

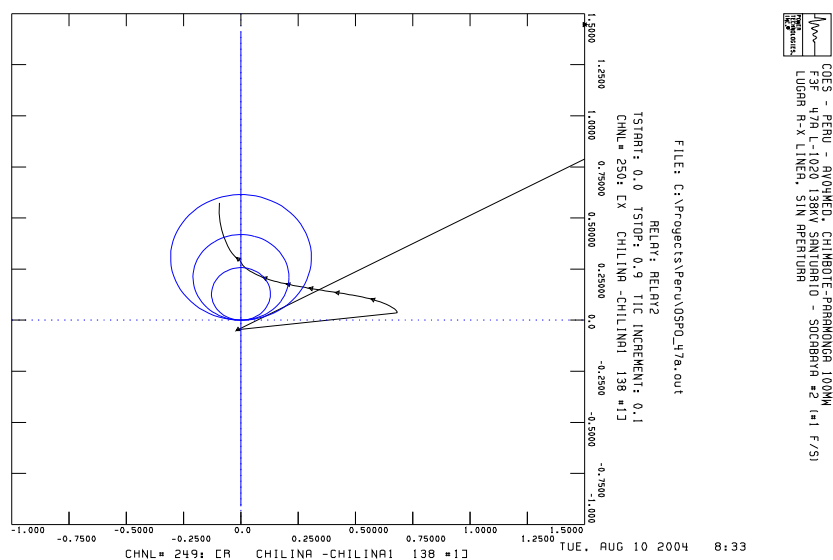


Fig. 42 Lugar de R-X en Transformador de Chilina, lado 138kV

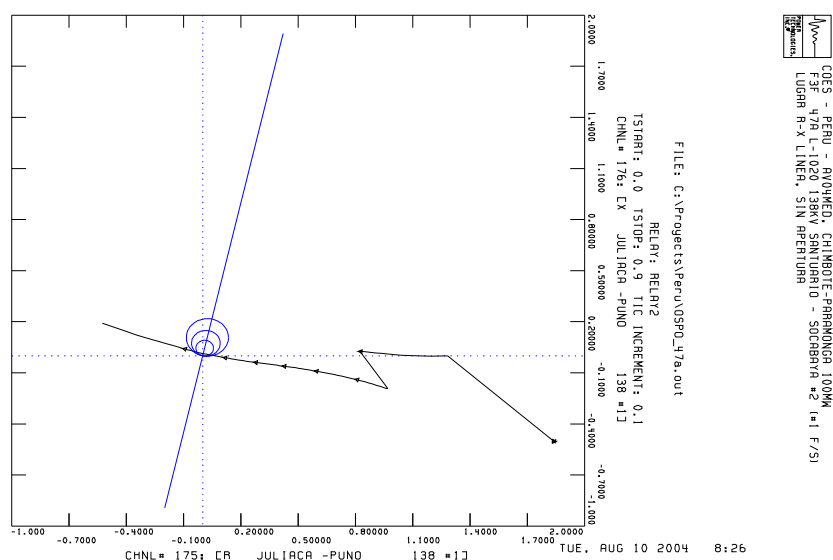


Fig. 43 Lugar de R-X en Juliaca - Puno

El lugar de la impedancia entra también en la característica de los siguientes relés:

- ◊ Transformador 138/33 kV de Chilina: Entra en 1ra. zona
- ◊ Transformador 220/138 kV de Puno: Entra en 3ra. zona
- ◊ Azángaro - Juliaca: Entra en 2da. zona (Fig. 44)
- ◊ Moquegua - Puno: Entra en 3ra. zona.

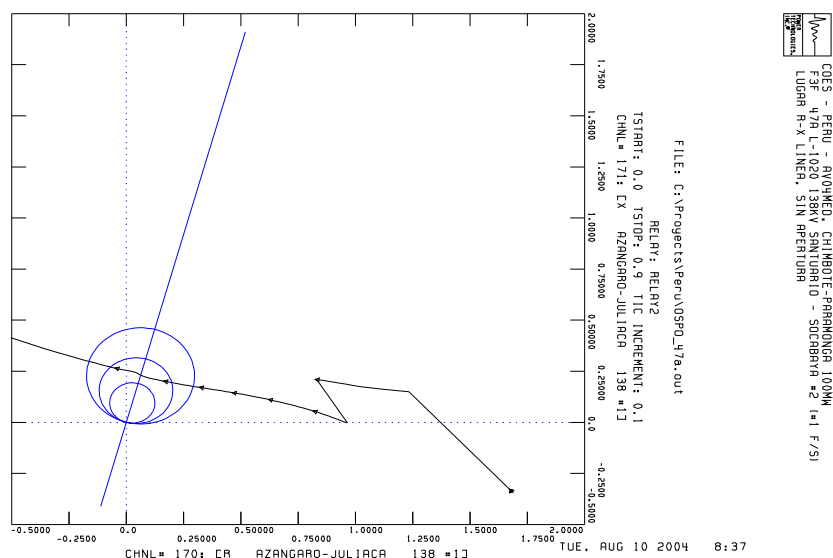


Fig. 44 Lugar de R-X en Azángaro – Juliaca

Caso 2 (OSPO_47b) :

El lugar de la impedancia pasa sólo una vez por el transformador de Chilina 138/33 a los 0.364s, pero el estado operativo que adquieren los nodos del sistema de 33 kV resulta inaceptable.

El Centro eléctrico se ubica en la línea Juliaca – Puno, pasando la primera vez a los 0.376s, luego 0.748, 1.000, 1.210, etc., con intervalos de paso desde 0.372s, 0.252s, 0.210s, etc.

El lugar de la impedancia entra en la característica de los siguientes relés:

- ◊ Transformador 138/33 kV de Chilina: Entra en 1ra. (una vez) y 2da. zona
- ◊ Transformador 220/138 kV de Puno: Entra en 2da. zona
- ◊ Azángaro – Juliaca: Entra en 2da. zona
- ◊ Moquegua – Puno: Entra en 3ra. zona

Seccionamiento del Subsistema:

El seccionamiento del subsistema no puede efectuarse únicamente con el disparo de la línea L-1012 Juliaca – Puno, puesto que queda cerrado el vínculo con el SEIN por la línea L-1126 Santuario – Chilina de 138 kV.

La capacidad de evacuación por Chilina es insuficiente provocando un rápido deterioro de las condiciones operativas de sus nodos, por lo que en este caso sería preferible abrir la línea L-1126 Santuario – Chilina de inmediato, en lo posible con un interdisparo.

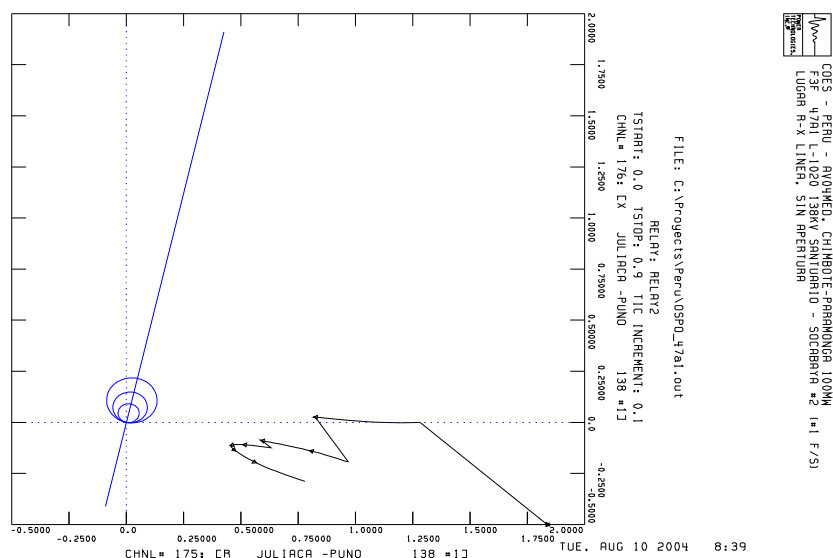


Fig. 45 Lugar de R-X en Azángaro – Juliaca

Para un despacho del orden del Caso 1, también podría aplicarse mediante señales locales el disparo de al menos 2 unidades de Charcani V (supuesto a los 0.200s de la apertura de vínculo entre Santuario – Socabaya), con lo cual no sería necesario el disparo de ninguna línea manteniendo el lugar de las impedancias vistas por las protecciones alejado de sus características, (Caso OSPO_47a1 Fig. 45).

Si el despacho es del orden del Caso 2, no es suficiente el disparo de 3 grupos de Charcani V, dado que produce el desplazamiento del centro eléctrico de la L-1012 Juliaca – Puno a las líneas L-1011 (Caso OSPO_47b1, Fig. 46) y L-1008 (Fig. 47) con intervalos de paso semejantes.

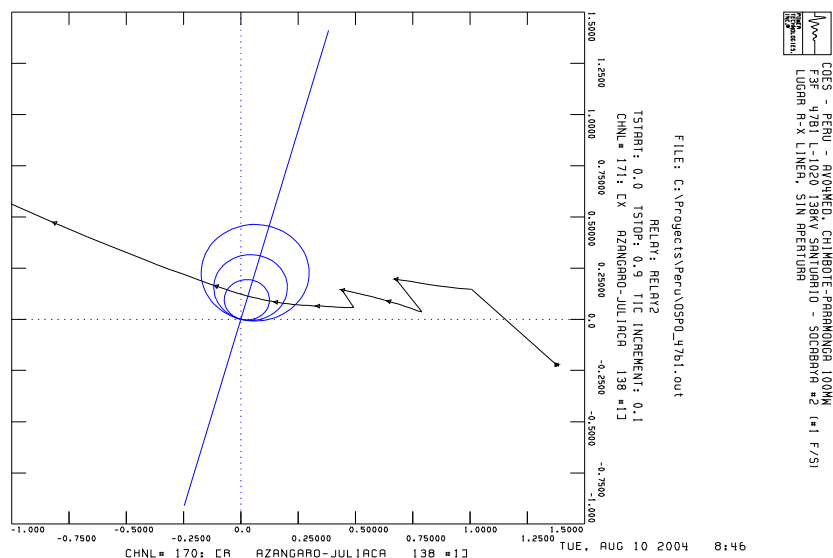


Fig. 46 Lugar de R-X en Azángaro – Juliaca

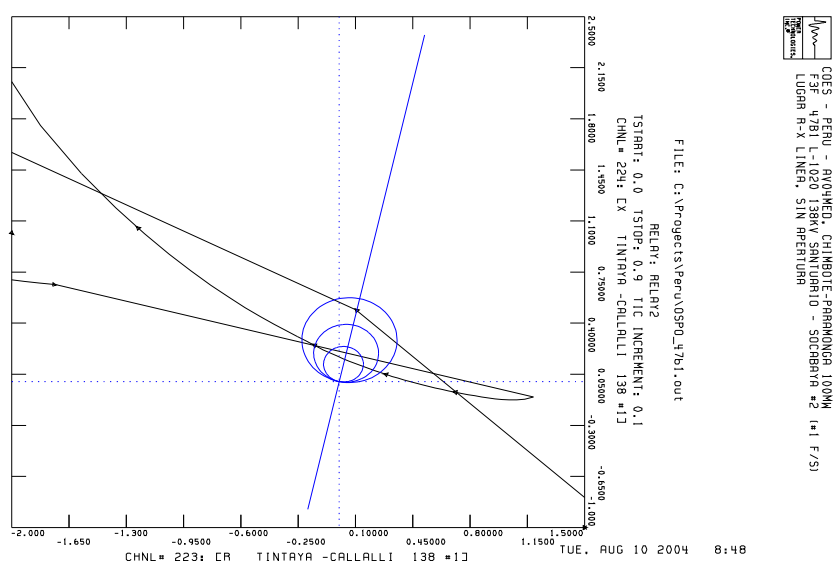


Fig. 47 Lugar de R-X en Tintaya – Callalli

En Azángaro – Juliaca el lugar de la impedancia pasaría por la zona 1 a los 0.415s, luego a 0.829, 1.096, 1.318, etc., y en Tintaya – Callalli a los 0.436, 0.847, 1.108, 1.321, etc.

Puesto que la pérdida por falla de la doble terna L-1021 y L-1022 es poco probable, bastaría elaborar una norma operativa que evite un despacho excesivo cuando una de las ternas está fuera de servicio, y una lógica local de adecuación del despacho de Charcani V en estas condiciones, cuando se pierde el vínculo restante entre Santuario y Socabaya.

Si bien estas recomendaciones están fuera del alcance previsto de estos estudios porque incluye la formación de islas inteligentes, a juicio de este Consultor resultaría conveniente profundizar estas alternativas en este caso en lugar de ajustar las protecciones para la formación de una isla mediante el bloqueo o apertura por oscilaciones.

3.4.11 Variables monitoreadas

Se han registrado las siguientes variables en todos los casos:

- ◊ Ángulos de todas las máquinas en servicio
- ◊ Corriente en el primer extremo de las líneas de 138 y 220 kV:
 - L-1010 San Gabán – Azángaro
 - L-1013 San Gabán – San Rafael
 - L-1009 San Rafael – Azángaro
 - L-1011 Azángaro – Juliaca
 - L-1012 Juliaca – Puno

- L-2030 Puno - Moquegua
 - L-1006/1 Tintaya - T.Ayaviri
 - L-1006/2 Azángaro - T.Ayaviri
 - L-1001 Machupicchu - Cachimayo
 - L-1002 Machupicchu - Quencoro
 - L-1003 Cachimayo - Dolores Pata
 - L-1004 Dolores Pata - Quencoro
 - L-1005/1 Quencoro - T.Combapata
 - L-1005/2 Tintaya - T.Combapata
 - L-1008 Tintaya - Callalli
 - L-1020 Callalli - Santuario
 - L-1021 Santuario - Socabaya
 - L-1022/1 Santuario - T.Jesús
 - L-1022/2 Socabaya - T.Jesús
 - L-1126 Santuario - Chilina
 - Lado 220 y 138 kV del transformador de Puno
 - Lado 138 y 33 kV del transformador de Chilina
- ◇ Lugar R-X visto desde ambos extremos de las líneas mencionadas, excepto en la L-1005, L-1006 y L-1022, en que sólo se representan los extremos donde están las protecciones.
- ◇ Tensión y ángulo en los nodos de 220 y 138 kV de cada extremo de las líneas y transformadores mencionados.
- ◇ Frecuencia en la barra de 138 kV de Azángaro, Puno, Socabaya y Callalli.

3.4.12 Conclusiones

Las situaciones de pérdida de sincronismo se verifican para una producción extraordinaria de las centrales San Gabán, Machupicchu y en menor medida Charcani V. Para una producción típica (despachos de referencia) y fallas que se despejan en tiempos breves, los fenómenos de pérdida de paso quedan reducidos a la falla trifásica en Azángaro - Juliaca, y la poco probable pérdida de las 2 líneas de Santuario - Socabaya.

Ante una producción excepcional de las centrales o un tiempo de despeje inadecuado de las fallas, es necesario formar una isla en un mayor número de casos separando la parte afectada del resto del SEIN. El gran superávit de la isla en tales casos, hará difícil restaurar el equilibrio en pocos segundos y evitar que se alcancen frecuencias altas, a menos que se implementen sistemas de control específicos para evitarlas. No obstante, las unidades que en general abastecen la isla del Sudeste son hidráulicas, y probablemente podrían resistir

excursiones en sobrefrecuencia mayores a las especificadas en la Norma Técnica vigente.

Si se elige como medio de control un esquema de protección por sobrefrecuencia, hay que verificar que el mismo también funcione en forma satisfactoria para el sistema Sur integrado ante la pérdida de vínculo con el sistema Centro - Norte, coordinándose con los automatismos de reducción rápida de potencia y/o desconexión de la central IL02.

Ante la necesidad de formación de una isla, la oportunidad de apertura parece conveniente luego de que el lugar de la impedancia atraviesa la recta que representa la impedancia de la línea, o sea "perdiendo el paso una vez", para evitar tensiones de restablecimiento muy altas luego de la apertura.

Examinando algunos de los casos simulados, se observa que el ángulo de desfase entre los extremos de la línea aumenta muy rápidamente luego del ingreso a la zona 1, y sigue aumentando aún luego de la apertura. Si la apertura se produce luego de un desfase mayor a 270 grados, cuando el lugar de la impedancia ha atravesado la impedancia de la línea, el ángulo se reduce al suprimirse la caída de tensión por la línea que pierde el sincronismo, mitigando los requerimientos a la extinción del arco.

4 Conclusiones y recomendaciones

El estudio de las oscilaciones y/o pérdida de sincronismo en las diversas zonas del sistema proclives a este tipo de eventos, ha permitido tomar en cuenta las características principales del fenómeno, y definir los requerimientos de bloqueo / apertura que son necesarios para formar islas naturales.

No siempre estas islas naturales tienen probabilidades de ser exitosas, pero en tal caso su formación temprana libera al resto del SEIN de las perturbaciones propias de la pérdida de paso en los generadores, y también en la isla afectada que adquiere luego un estado de sobrefrecuencia.

El estudio permite contemplar además, el esfuerzo al que van a estar sometidos los interruptores asignados al seccionamiento del sistema y juzgar así sobre su capacidad para soportarlo.

Si bien este estudio contempla la mejora en los recursos estabilizantes recabados del Estudio de Pequeña Señal encarado a principios de este año por COES, con el cual van a extinguirse rápidamente la mayoría de los episodios oscilatorios, los resultados siguen siendo de utilidad para contemplar situaciones excepcionales o de emergencia, y también para contrarrestar contingencias severas que pueden afectar la calidad del servicio.

Se destaca que en la mayoría de los casos, la aplicación de esquemas de control de emergencia "inteligentes" especialmente diseñados podrían reducir el grado de exposición del sistema a las perturbaciones, y lograr el éxito de la separación del sistema en mayor número de casos.

Debe tomarse en cuenta que las fallas empleadas en este estudio son trifásicas, lo cual representa el mayor grado de exigencia. Si bien este tipo de falla es poco probable, su efecto podría también asimilarse a fallas bifásicas a tierra de más larga duración, o fallas monofásicas despejadas por protecciones de respaldo.