



Expansión, operación y análisis de seguridad y estabilidad del sistema eléctrico colombiano a futuro

Rodrigo Moreno, Claudia Rahmann, Matías Olivares, Pamela Acuña,
Yerko Orellana.

Instituto Sistemas Complejos de Ingeniería (ISCI)
Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas
Universidad de Chile
16 de mayo 2025

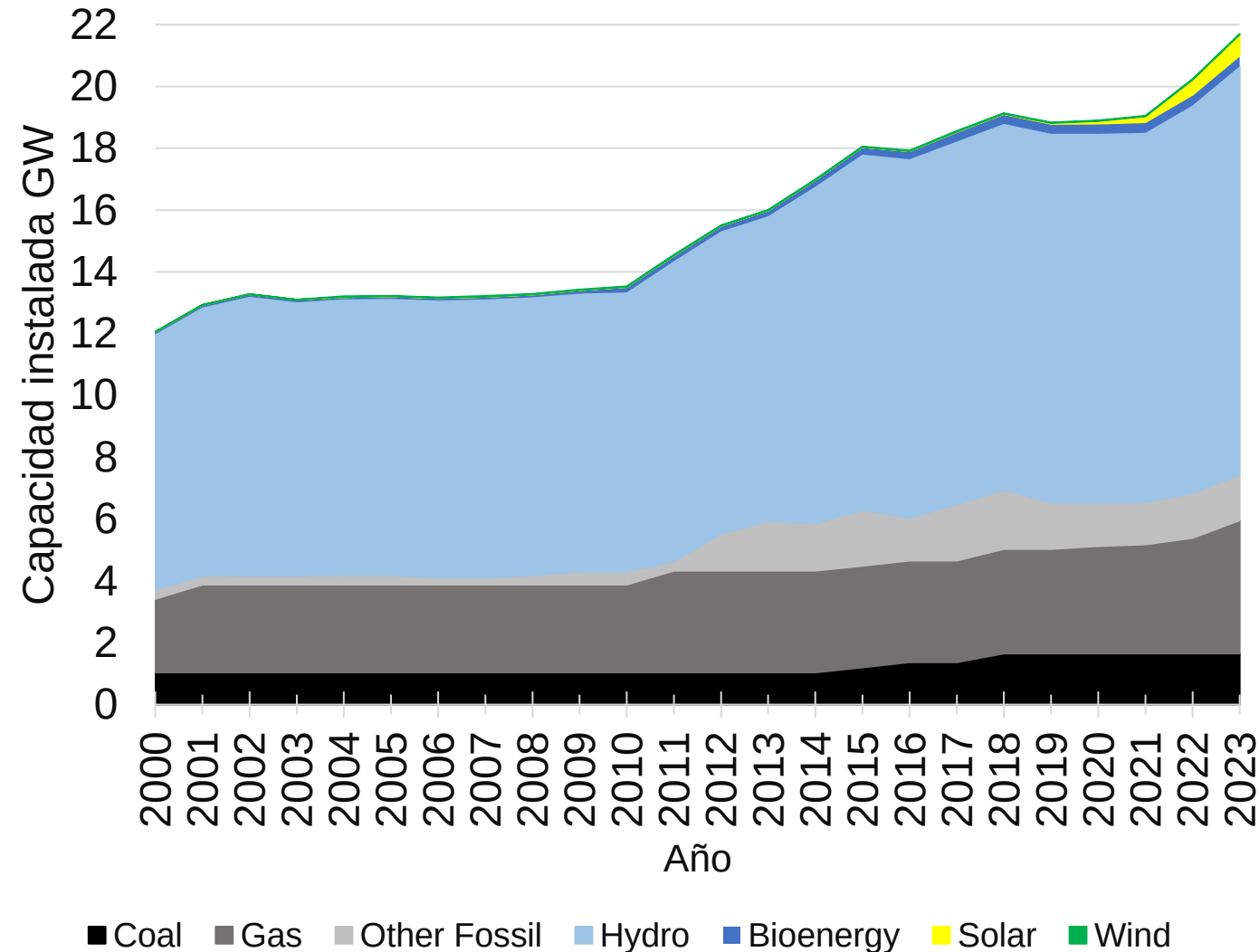
Agenda

1. Introducción
2. Metodología
3. Planificación y operación estática
4. Estudios de estabilidad
5. Conclusiones y recomendaciones



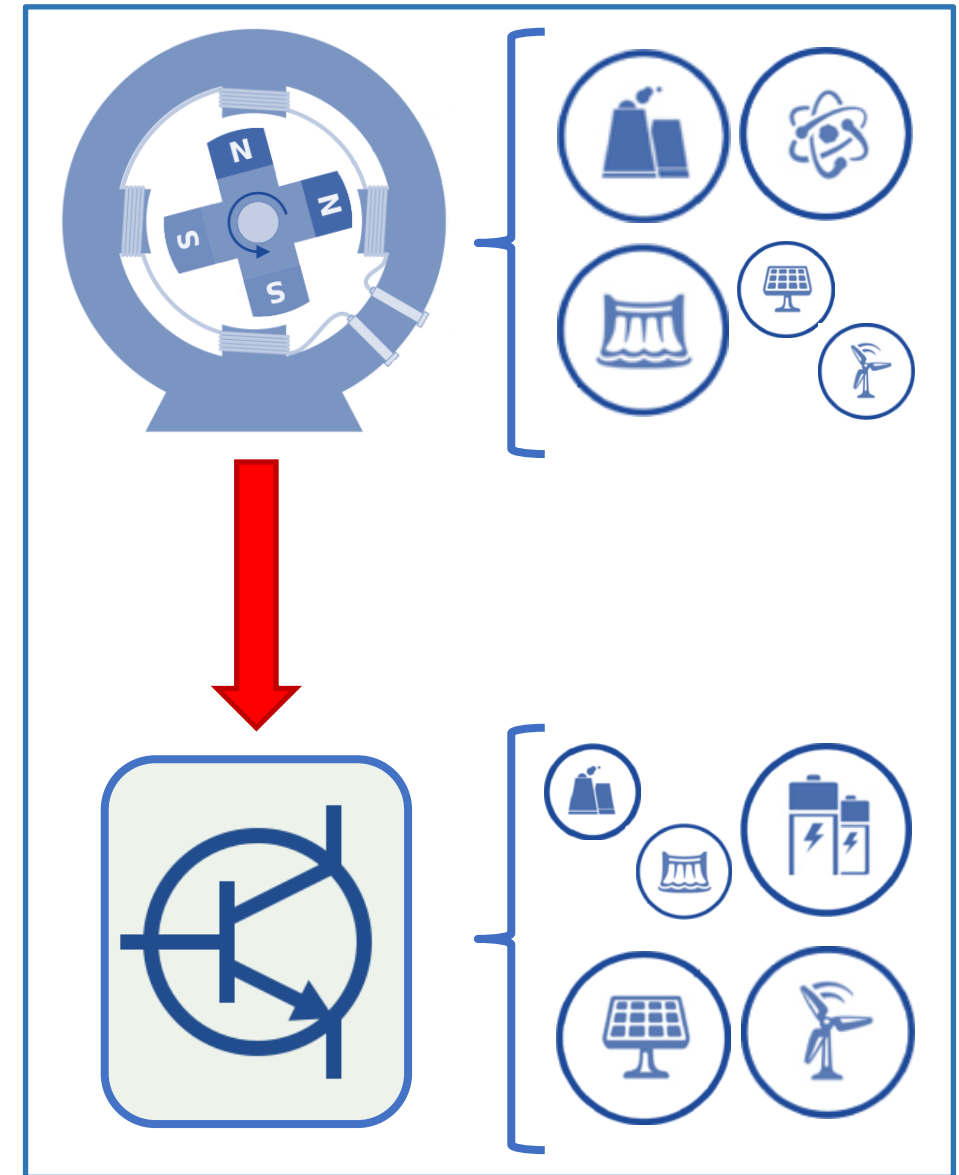
- El Estado de Colombia asumió la meta de **Carbono Neutralidad al año 2050** mediante la **Estrategia** Climática de Colombia de Largo Plazo (E2050) y la **ley 2169** de 2021.
- Actualmente, la matriz de generación colombiana se compone principalmente de generación **hidráulica** (61%) y, en menor medida, **gas** (20%) y luego **carbón** (8%).
- Para alcanzar la meta se requiere un **incremento en la integración de energías renovables**.
- Necesidad de **estudios** detallados para toma de decisiones sobre la expansión del sistema eléctrico, identificando **condiciones que habiliten** la suficiencia y seguridad a futuro.

Capacidad instalada por tecnología en el Sistema Interconectado Nacional (SIN)



Fuente: EMBER

- El proceso de transición energética, implica un **reemplazo masivo de generación convencional por energías renovables variables (ERV)**, lo que plantea desafíos importantes en términos de la seguridad y estabilidad del SIN.
- Es imperativo explorar y desarrollar estrategias innovadoras para **robustecer la red**, a fin de garantizar una **operación segura y estable** del SIN bajo escenarios de alta penetración de ERV.
- Por lo tanto, las potenciales condiciones de una red más débil exigen un análisis más detallado de los **futuros escenarios** y de la seguridad del suministro eléctrico.



- **Objetivo principal:**

- Identificar las condiciones habilitantes para una transición energética hacia energías renovables variables (ERV).

- **Objetivos específicos:**

- Definir un plan de expansión óptimo para el Sistema Interconectado Nacional (SIN).
- Calcular la operación óptima del SIN frente a las condiciones futuras.
- **Estudiar la estabilidad del SIN para un horizonte de largo plazo (12 años).**
- **Proponer soluciones para garantizar la estabilidad del SIN frente a escenarios dominados por ERV.**

ISCI INSTITUTO
SISTEMAS COMPLEJOS
DE INGENIERÍA

Ivy Por el Desarrollo
Sostenible de
Latinoamérica

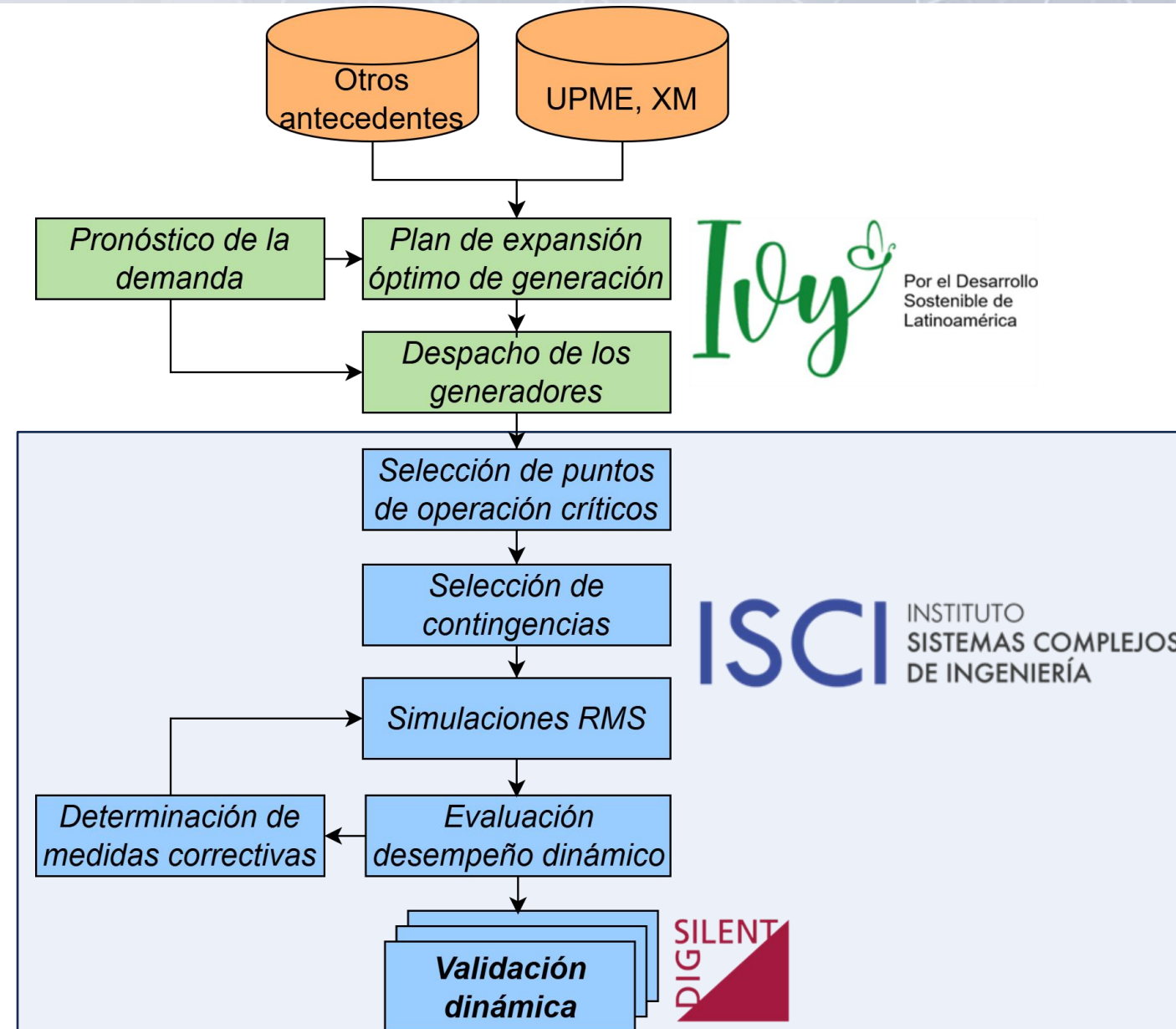
 **Universidad de
los Andes**

Agenda

1. Introducción
2. Metodología
3. Planificación y operación estática
4. Estudios de estabilidad
5. Conclusiones y recomendaciones



- A partir de datos entregados por **UPME, XM, el Ministerio** y otras entidades; Ivy desarrolló el **plan de expansión** de generación óptimo.
- De este plan se obtuvieron los **despachos de los generadores** del SIN para todo el horizonte 2024-2037.
- Para realizar el **estudio de estabilidad**, primero se seleccionó un conjunto de **puntos de operación críticos** del sistema. Luego, para cada punto de operación, se define un **conjunto de contingencias críticas** (Tx y Gx).
- Las contingencias críticas de cada punto de operación se evalúan mediante **simulaciones RMS** en el dominio del tiempo.



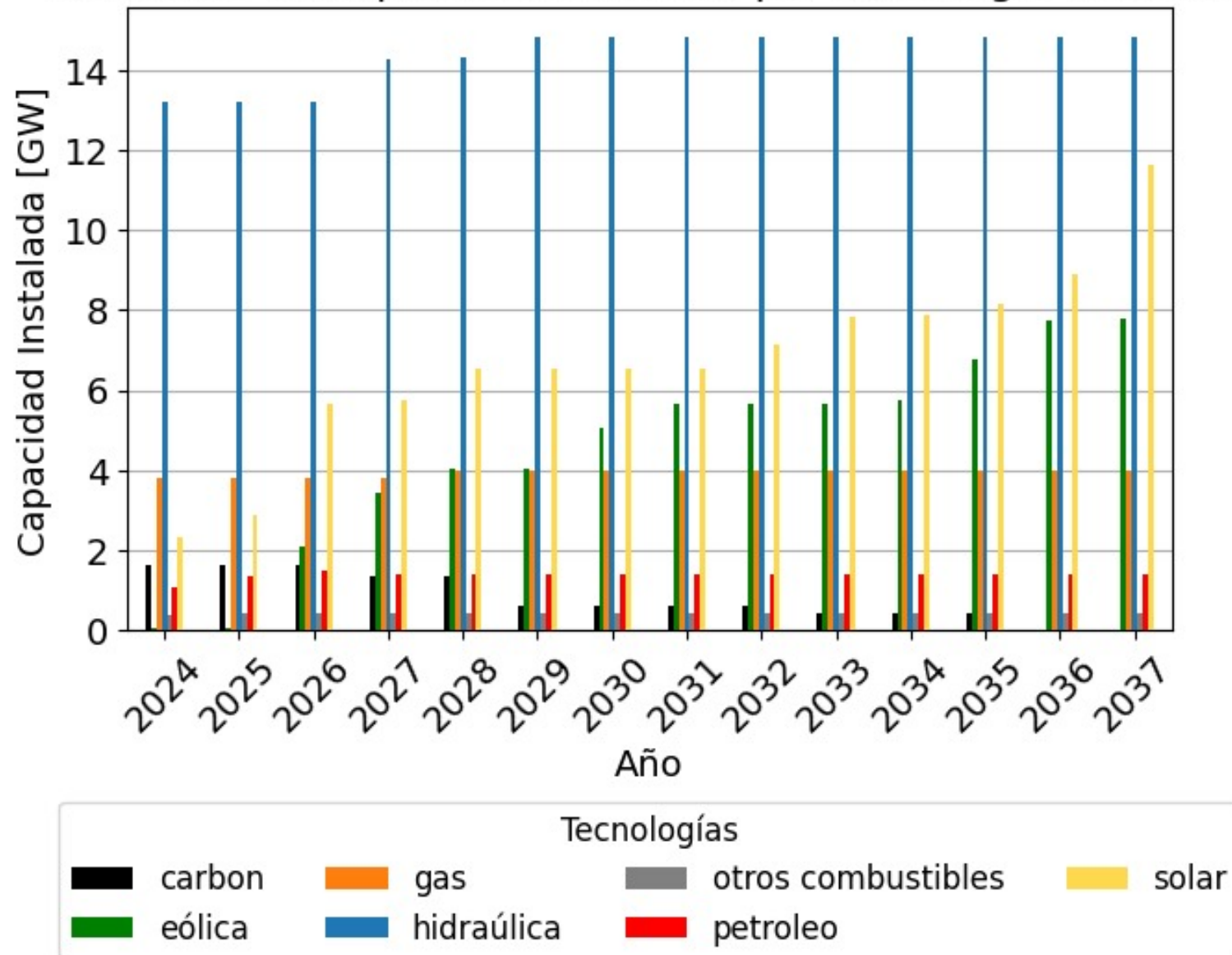
Agenda

1. Introducción
2. Metodología
3. Planificación y operación estática
4. Estudios de estabilidad
5. Conclusiones y recomendaciones



- En la figura se presenta la **capacidad instalada** asociada al plan de expansión obtenido por Ivy.
- Se modeló la salida de operación de las **centrales a carbón** a medida que finalizan sus contratos.

Evolución de capacidad instalada por tecnología en el SIN

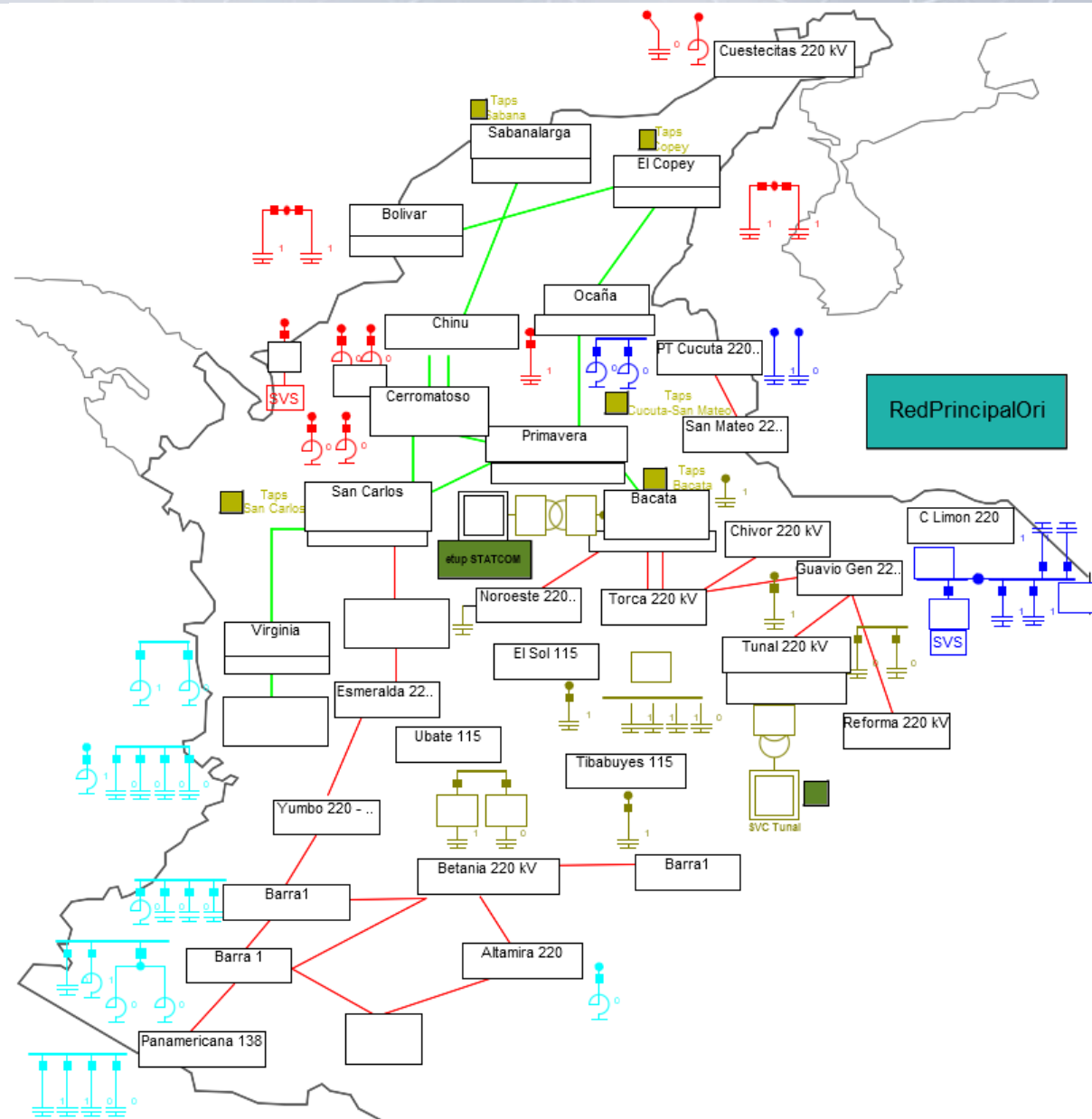


Agenda

1. Introducción
2. Metodología
3. Planificación y operación estática
4. Estudios de estabilidad
5. Conclusiones y recomendaciones

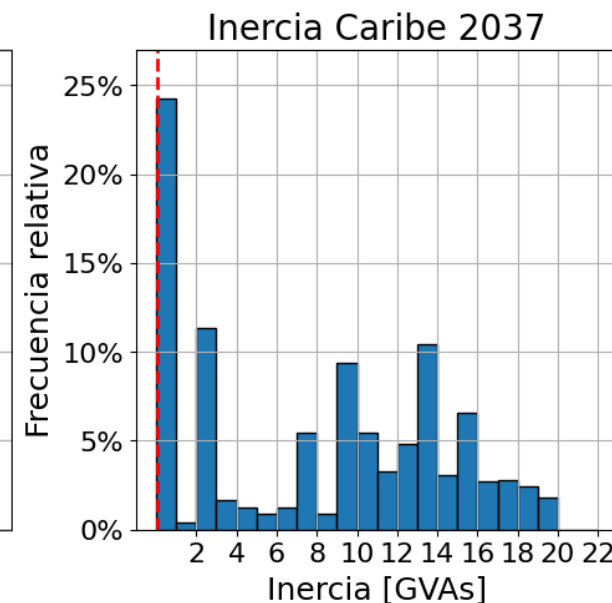
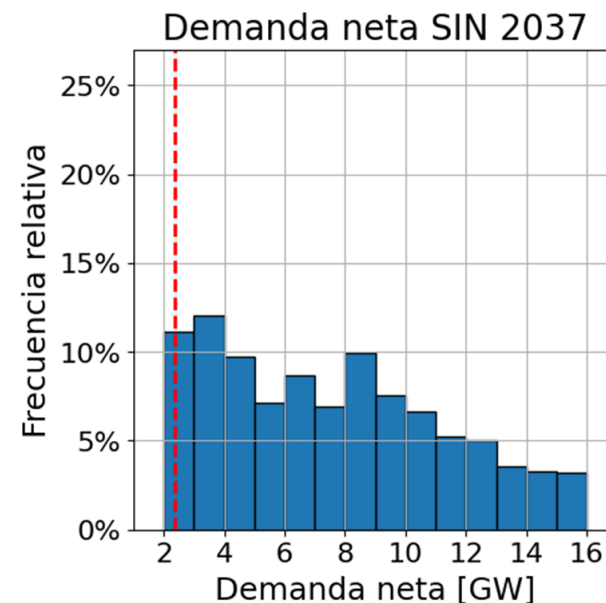
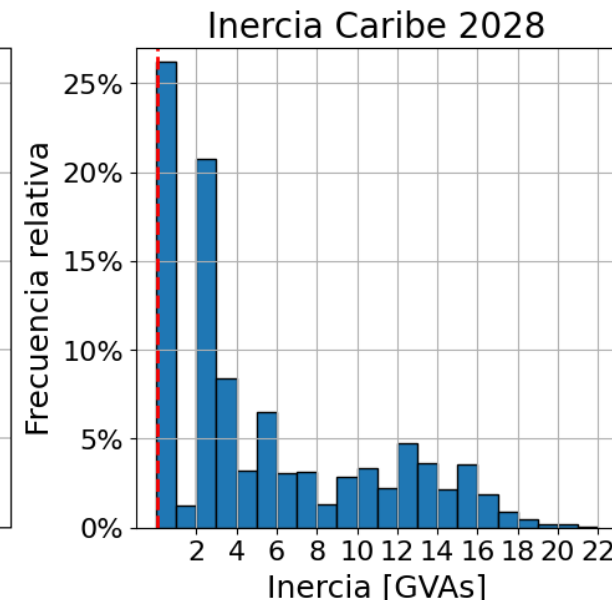
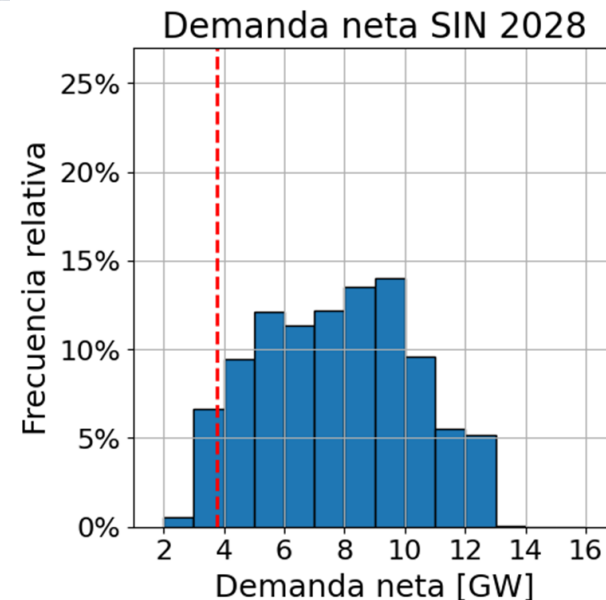


- Una vez proyectados los portafolios de generación mediante **SimSEE**, se requiere validar los resultados mediante estudios dinámicos.
- Para ello, se utilizó la **versión más actualizada de la base de datos en DigSILENT** de XM utilizada para el “Informe de Planeamiento Operativo Eléctrico de Mediano y Largo Plazo”, el cual contiene escenarios de operación de 2024 a 2033.



- Se calculó operación óptima bajo las condiciones futuras.
- Años de estudio:
 - 2028: Mediano plazo con fuerte aumento de penetración de ERV.
 - 2037: Máxima penetración de ERV.
- Escenarios de operación:
 - **Demanda neta mínima:** Mayor despacho de ERV (P5).
 - **Inercia mínima en el Caribe:** Máx penetración de ERV en el área más crítica del SIN (P5).

P.O.	Demanda [MW]	GS [MW]	ERV [MW]	% ERV
D 2028	11.000	3.774	7.362	66,1
H 2028	11.291	4.329	7.077	62,0
D 2037	13.559	2.366	11.356	82,9
H 2037	14.209	2.498	12.065	82,8

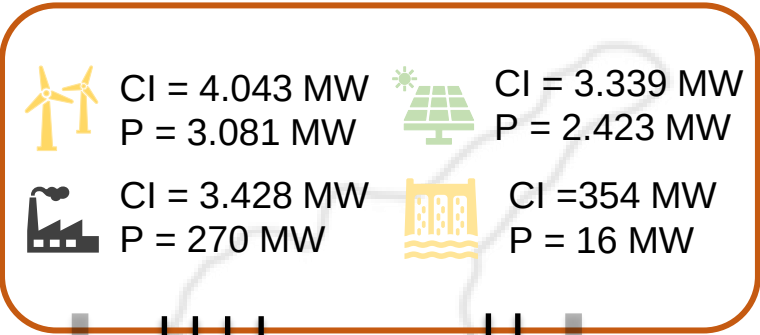


P.O.:Hmin 2028 en Caribe

$D_{Total} = 11.291\text{ MW}$
 $GS_{Total} = 4.550\text{ MW}$

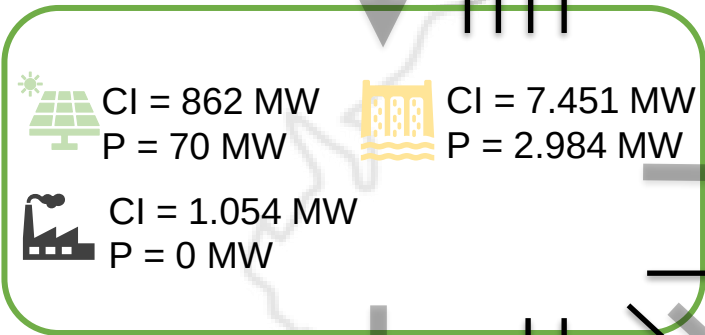
Enlace AC 500 kV

Caribe
 $D = 3.091\text{ MW}$
 $GS = 286\text{ MW}$
 $H = 2.900\text{ MVAs}$
 $\%ERV_{Caribe} = 95\%$

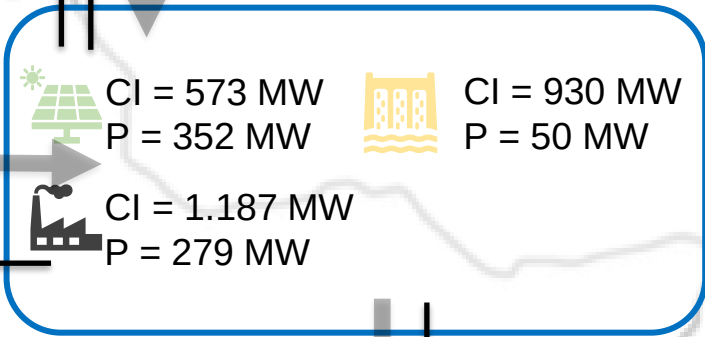


$f_{caribe}^{sur} = 2.700\text{ MW}$

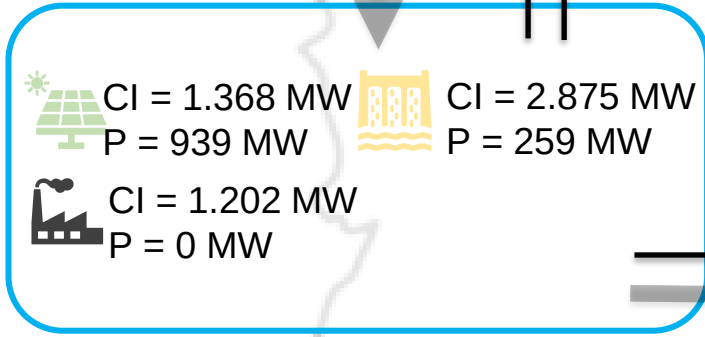
Antioquia
 $D = 1.446\text{ MW}$
 $GS = 2.984\text{ MW}$
 $\%ERV_{Antioquia} = 0,02\%$



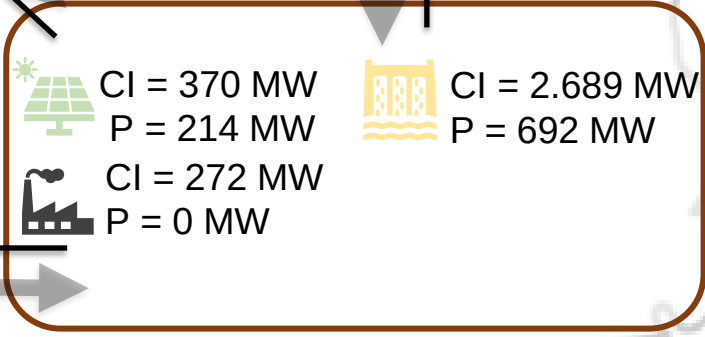
Nordeste
 $D = 1.350\text{ MW}$
 $GS = 329\text{ MW}$
 $\%ERV_{Nordeste} = 52\%$



Suroccidente
 $D = 2.355\text{ MW}$
 $GS = 259\text{ MW}$
 $\%ERV_{Suroc} = 78\%$



Oriental
 $D = 3.050\text{ MW}$
 $GS = 692\text{ MW}$
 $\%ERV_{Oriental} = 24\%$

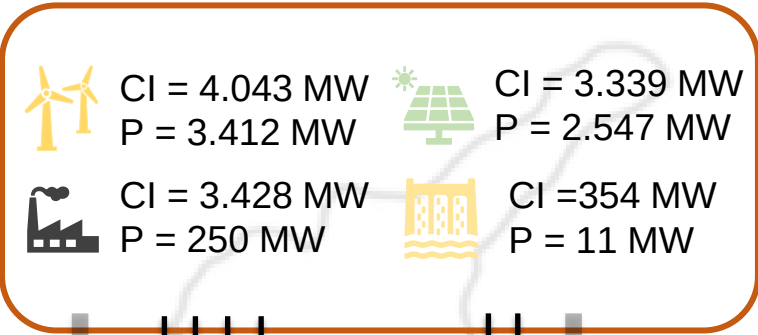


P.O.:DNmin 2028 SIN

$D_{Total} = 11.000\text{ MW}$
 $GS_{Total} = 4.024\text{ MW}$

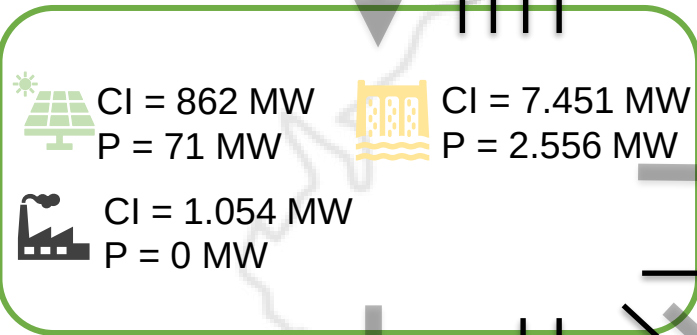
Enlace AC 500 kV

Caribe
 $D = 3.041\text{ MW}$
 $GS = 261\text{ MW}$
 $\%ERV_{Caribe} = 96\%$

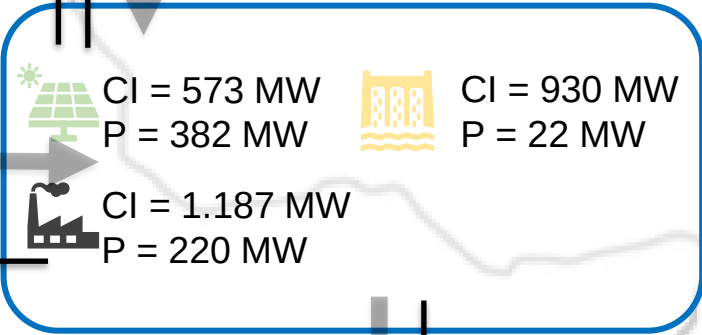


$f_{caribe}^{sur} = 3.178\text{ MW}$

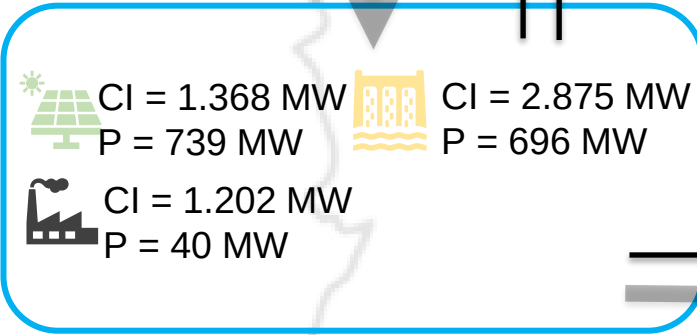
Antioquia
 $D = 1.395\text{ MW}$
 $GS = 2.556\text{ MW}$
 $\%ERV_{Antioquia} = 0,03\%$



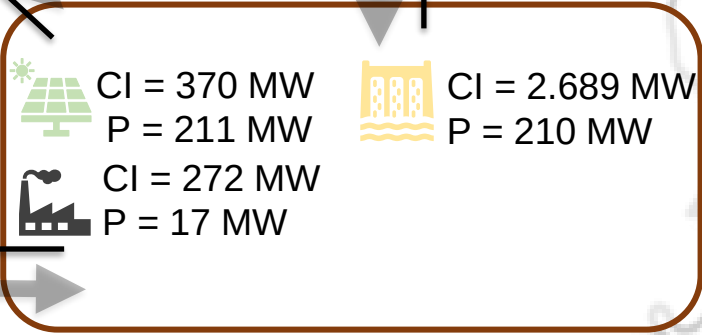
Nordeste
 $D = 1.316\text{ MW}$
 $GS = 243\text{ MW}$
 $\%ERV_{Nordeste} = 61\%$



Suroccidente
 $D = 2.279\text{ MW}$
 $GS = 736\text{ MW}$
 $\%ERV_{Suroc} = 50\%$



Oriental
 $D = 2.968\text{ MW}$
 $GS = 227\text{ MW}$
 $\%ERV_{Oriental} = 48\%$



P.O.:Hmin 2037 en Caribe

$D_{Total} = 14.209\text{ MW}$
 $GS_{Total} = 3.132\text{ MW}$

Enlace AC 500 kV
Propuesta enlace HVDC 2032

Caribe
 $D = 3.997\text{ MW}$
 $GS = 16\text{ MW}$
 $H = 72\text{ MVAs}$
 $\%ERV_{Caribe} = 99\%$

 $CI = 7.805\text{ MW}$
 $P = 6.102\text{ MW}$

 $CI = 3.639\text{ MW}$
 $P = 2.037\text{ MW}$

 $CI = 2.994\text{ MW}$
 $P = 0\text{ MW}$

 $CI = 354\text{ MW}$
 $P = 16\text{ MW}$

$f_{caribe}^{sur} = 4.158\text{ MW}$

Antioquia
 $D = 1.770\text{ MW}$
 $GS = 1.845\text{ MW}$
 $\%ERV_{Antioquia} = 37\%$

 $CI = 2.042\text{ MW}$
 $P = 1.098\text{ MW}$

 $CI = 7.451\text{ MW}$
 $P = 1.845\text{ MW}$

 $CI = 1.054\text{ MW}$
 $P = 0\text{ MW}$

 $CI = 1.933\text{ MW}$
 $P = 856,68\text{ MW}$

 $CI = 930\text{ MW}$
 $P = 69\text{ MW}$

 $CI = 509\text{ MW}$
 $P = 25\text{ MW}$

Nordeste
 $D = 1.703\text{ MW}$
 $GS = 94\text{ MW}$
 $\%ERV_{Nordeste} = 90\%$

Suroccidente
 $D = 2.917\text{ MW}$
 $GS = 371\text{ MW}$
 $\%ERV_{Suroc} = 68\%$

 $CI = 2.028\text{ MW}$
 $P = 806\text{ MW}$

 $CI = 2.875\text{ MW}$
 $P = 371\text{ MW}$

 $CI = 1.202\text{ MW}$
 $P = 0\text{ MW}$

 $CI = 1.970\text{ MW}$
 $P = 802\text{ MW}$

 $CI = 3.189\text{ MW}$
 $P = 807\text{ MW}$

 $CI = 46\text{ MW}$
 $P = 0\text{ MW}$

Oriental
 $D = 3.823\text{ MW}$
 $GS = 807\text{ MW}$
 $\%ERV_{Oriental} = 50\%$

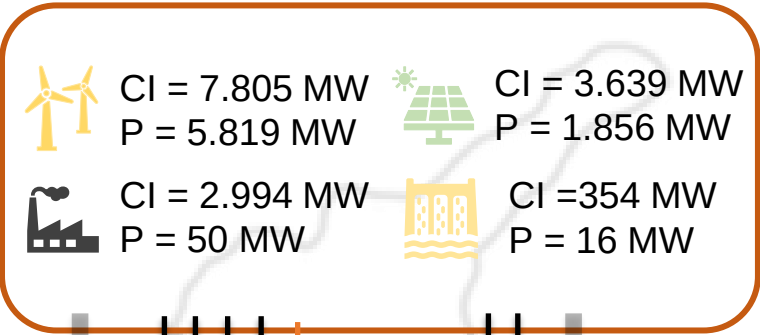
P.O.:DNmin 2037 SIN

$D_{Total} = 13.559 \text{ MW}$
 $GS_{Total} = 2.518 \text{ MW}$

Enlace AC 500 kV

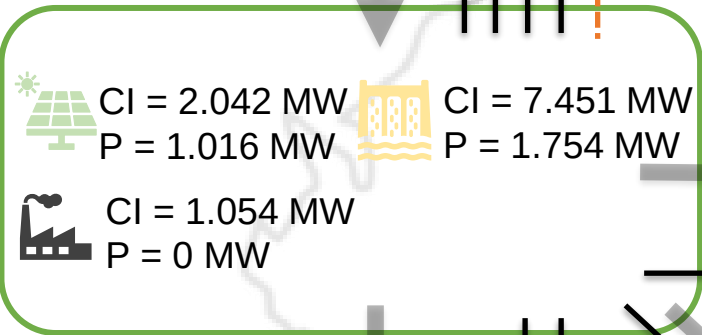
Propuesta enlace HVDC 2032

Caribe
 $D = 3.812 \text{ MW}$
 $GS = 66 \text{ MW}$
 $\%ERV_{Caribe} = 99\%$

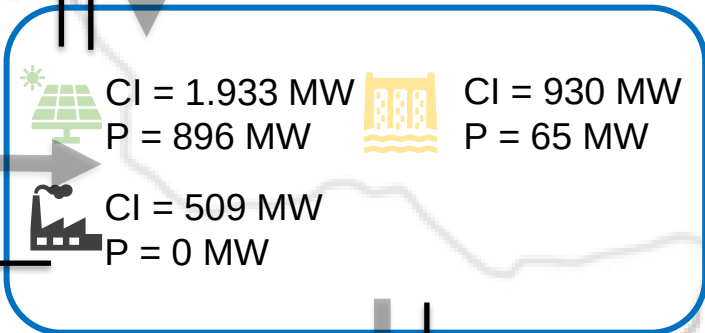


$f_{caribe}^{sur} = 3.929 \text{ MW}$

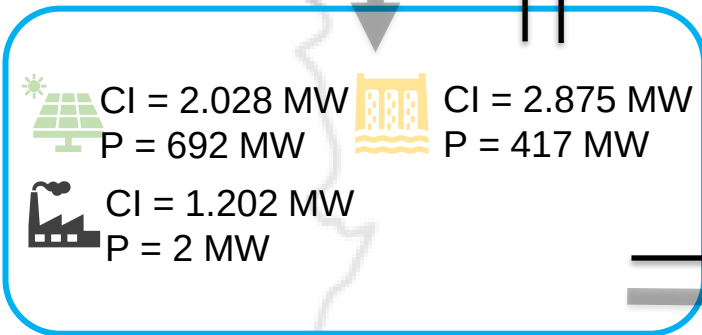
Antioquia
 $D = 1.690 \text{ MW}$
 $GS = 1.755$
 $\%ERV_{Antioquia} = 37\%$



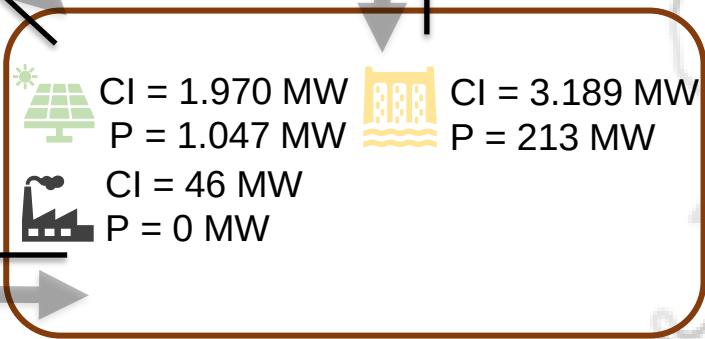
Nordeste
 $D = 1.625 \text{ MW}$
 $GS = 65 \text{ MW}$
 $\%ERV_{Nordeste} = 93\%$

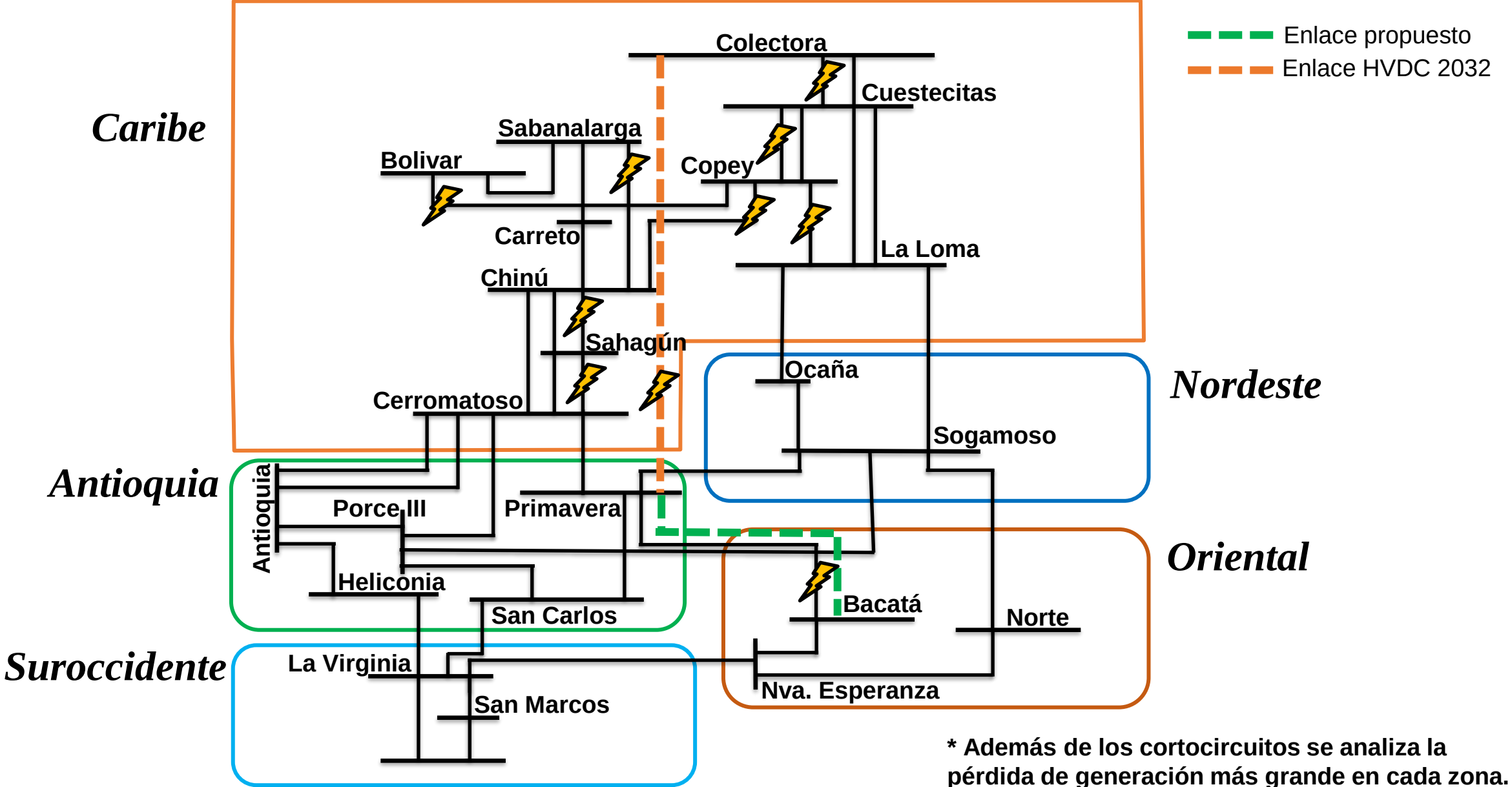


Suroccidente
 $D = 2.783 \text{ MW}$
 $GS = 419 \text{ MW}$
 $\%ERV_{Suroc} = 62\%$

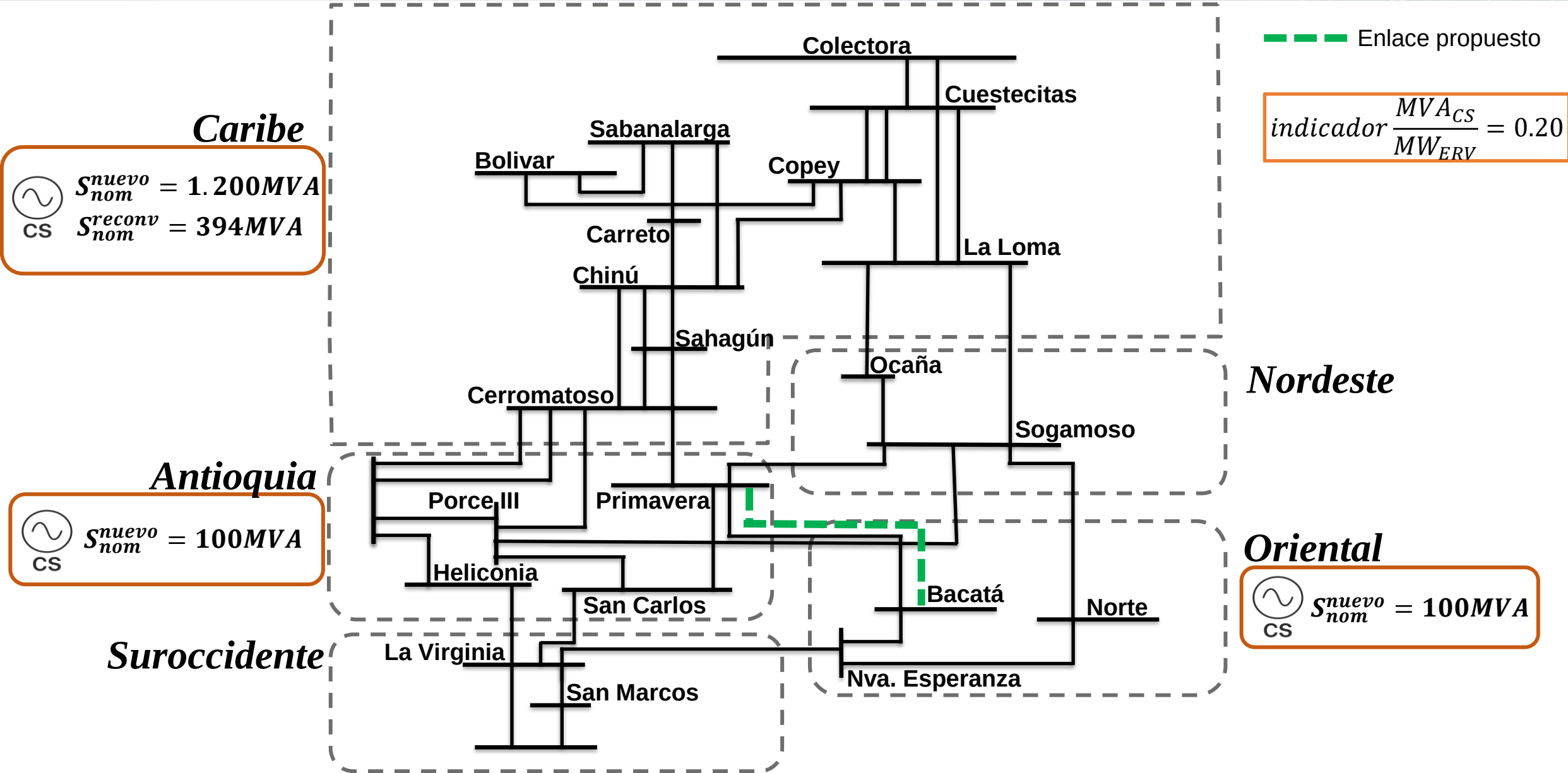


Oriental
 $D = 3.650 \text{ MW}$
 $GS = 213 \text{ MW}$
 $\%ERV_{Oriental} = 83\%$

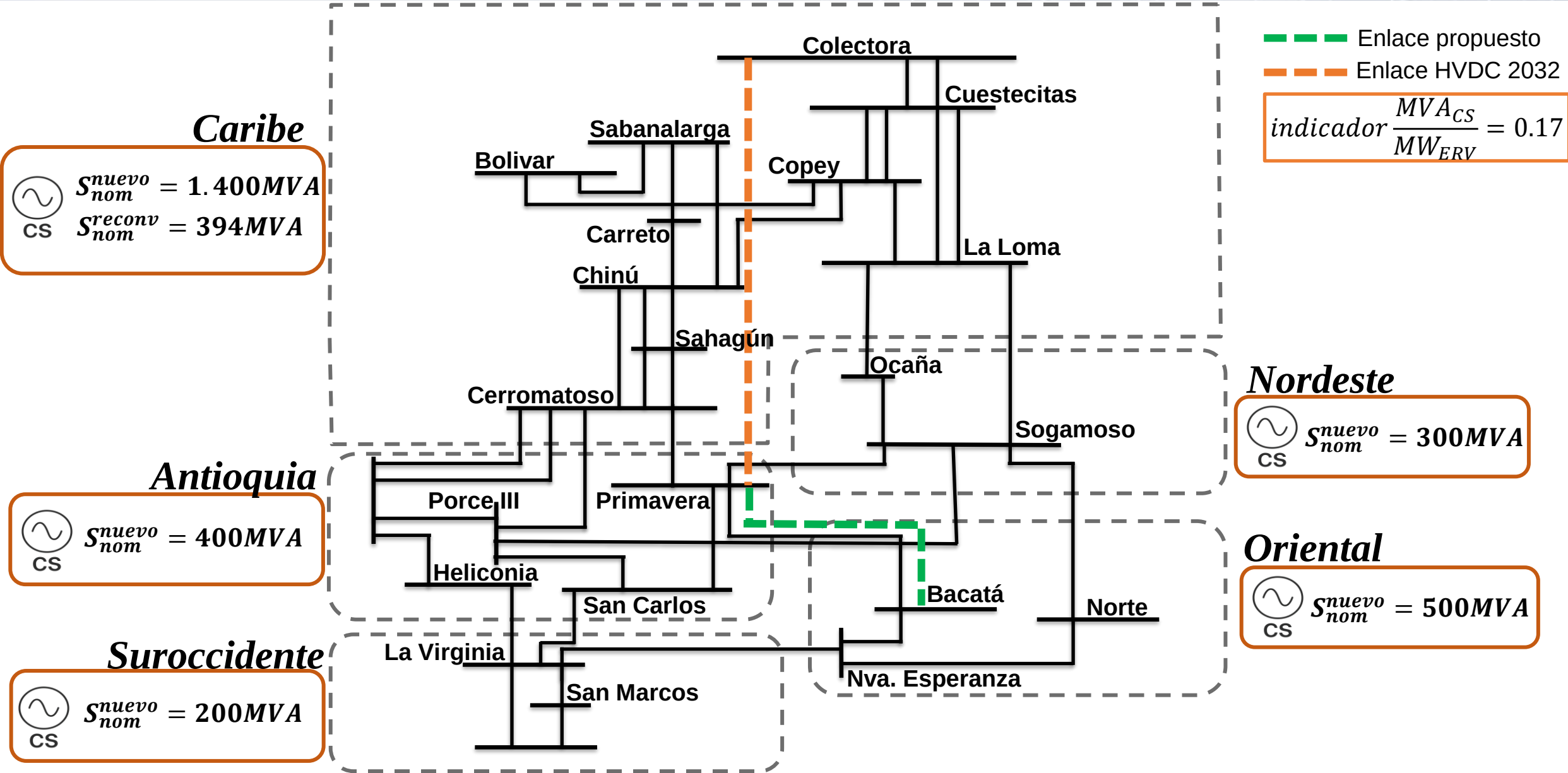




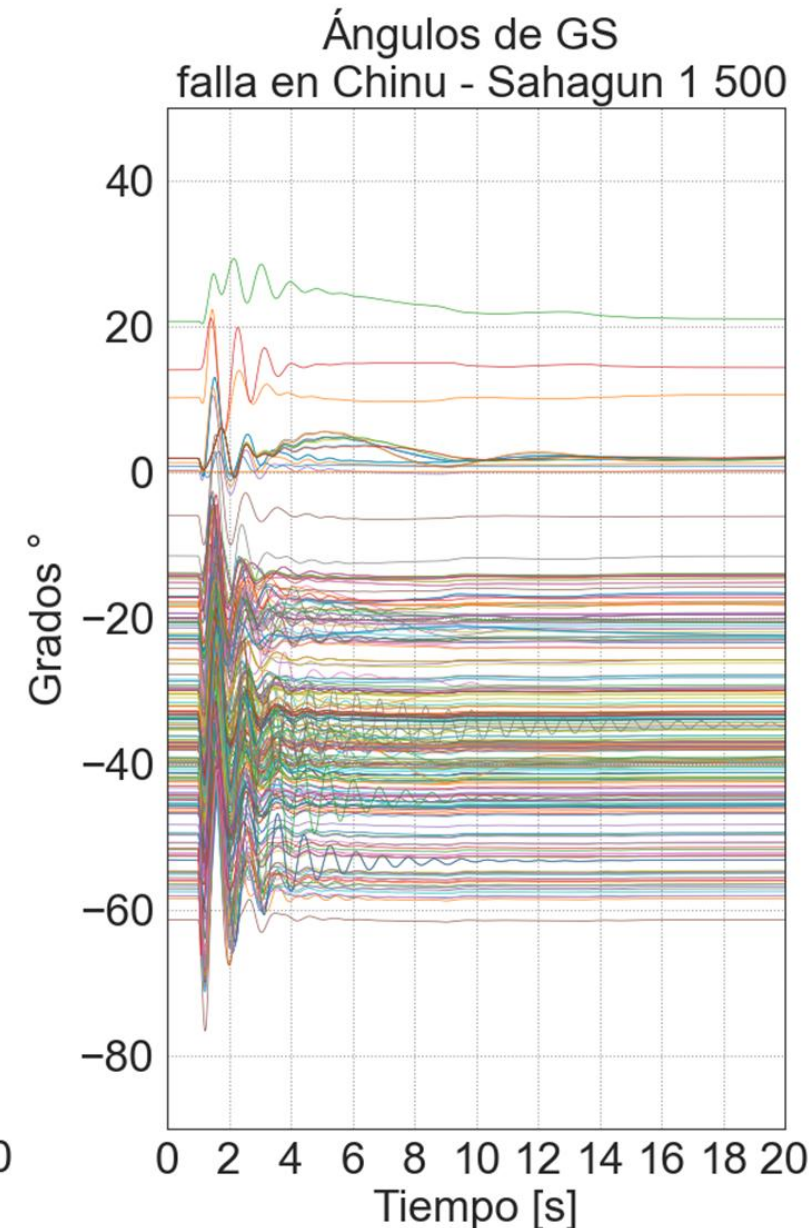
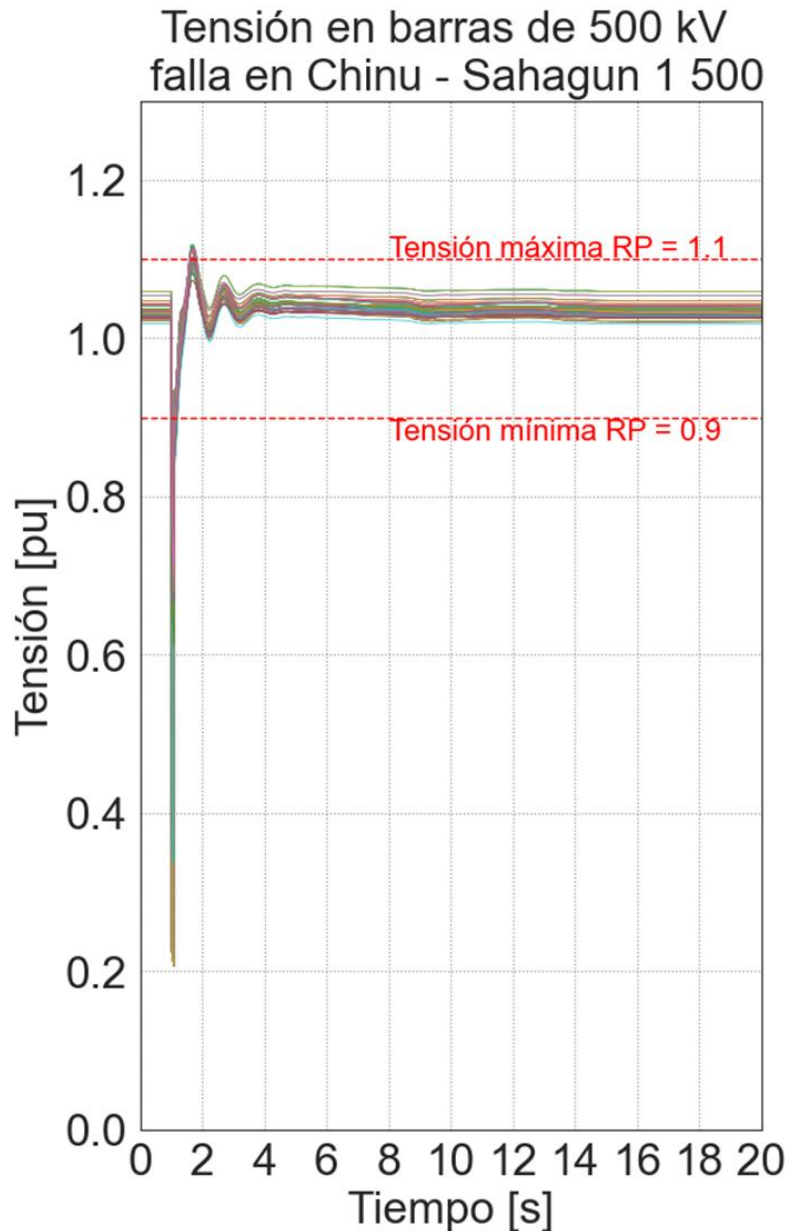
Medidas correctivas 2028 (1.794 MVA)



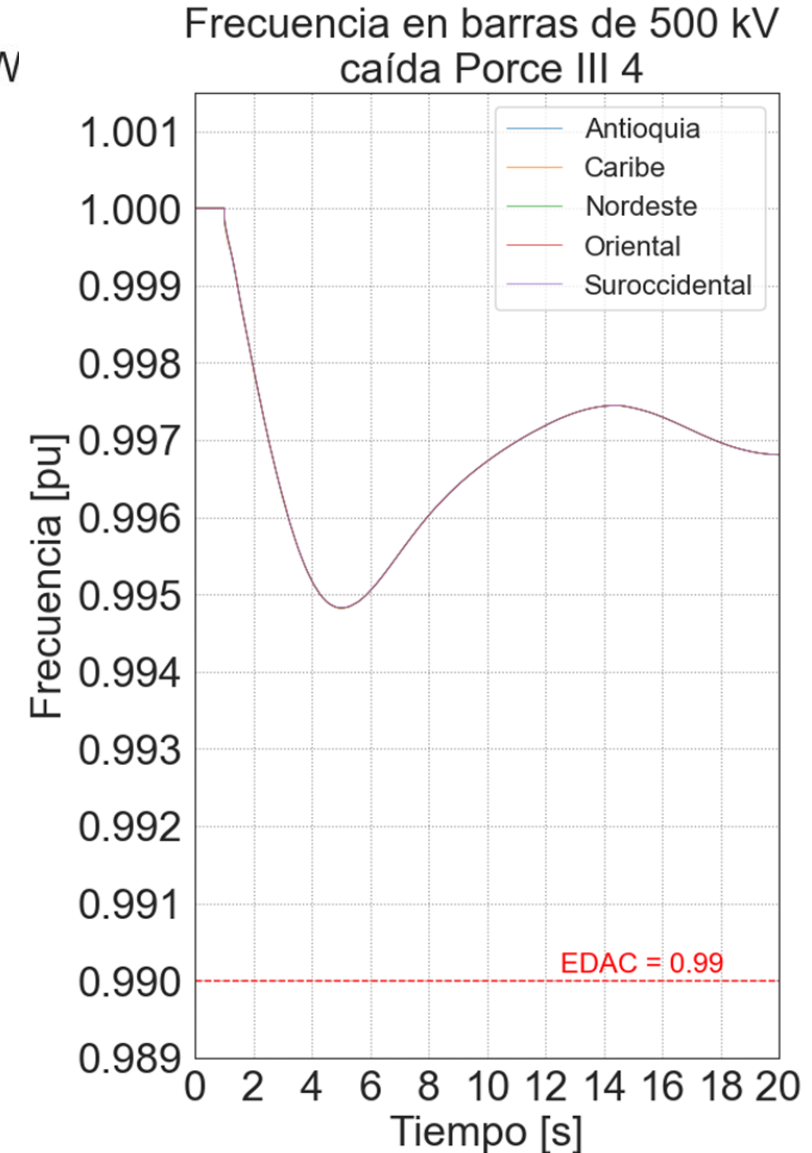
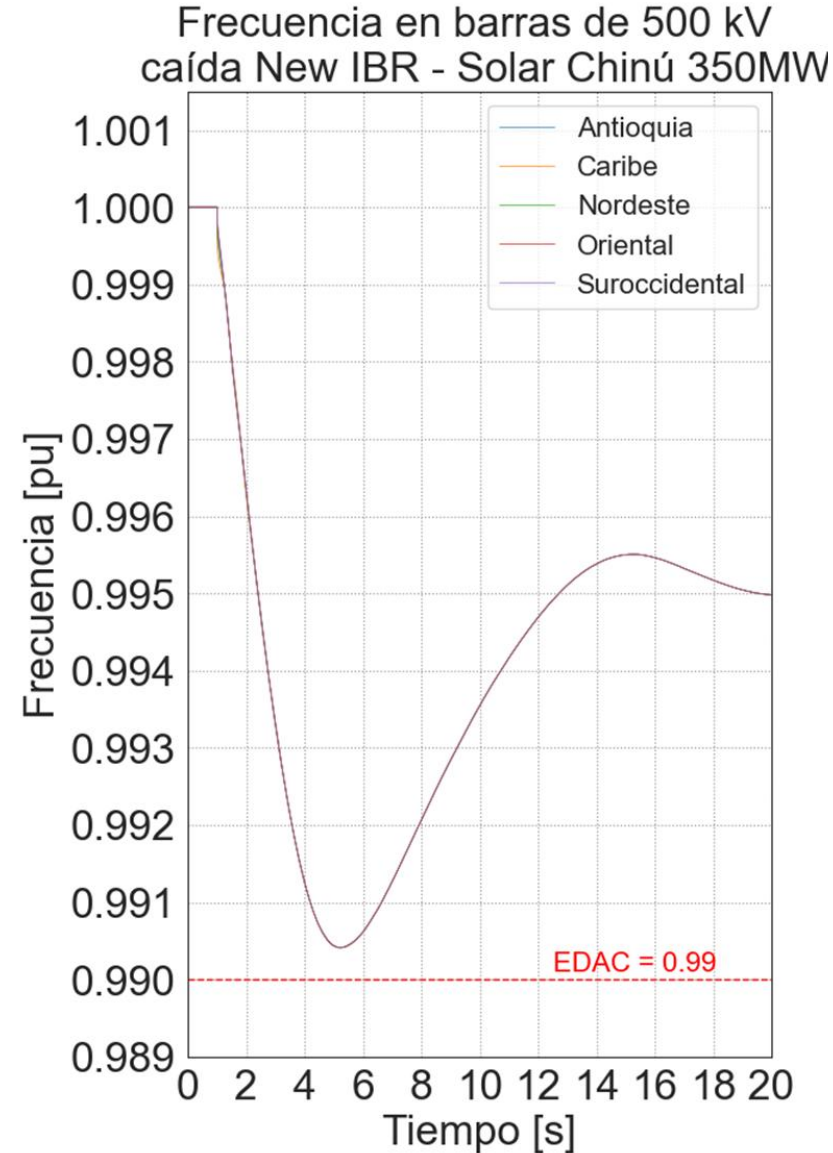
Medidas correctivas 2037 (3.194 MVA)



- Se considera el escenario de inercia mínima en Caribe año 2028.
- Se muestran los resultados al simular un cortocircuito trifásico en la línea Chinú - Sahagún 500 kV, cercano a Sahagún.
- Las **tensiones** en el SIN alcanzan un valor de **régimen permanente dentro de la banda** definida por la normativa.
- Las máquinas síncronas son capaces de **mantener el sincronismo**.
- **El SIN se logra sobreponer a esta falla de forma adecuada.**



- En las figuras se muestra:
 - Desconexión del parque ERV más cargado.
 - Desconexión de la unidad sincrónica más cargada.
- Ninguna de las desconexiones de generación provoca la **activación de los EDAC**.
- **El SIN se logra sobreponer a las pérdidas de generación de manera adecuada.**



Agenda

1. Introducción
2. Metodología
3. Planificación y operación estática
4. Estudios de estabilidad
5. Conclusiones y recomendaciones



- La descarbonización de la matriz energética del SIN requiere, en el largo plazo, la incorporación generalizada de **grandes bloques de generación renovable** variable.
- **Es posible avanzar en la descarbonización de la matriz energética del SIN, siempre que se implementen las medidas correctivas necesarias para preservar la seguridad y estabilidad del sistema.** En este estudio, se propone la instalación de condensadores sincrónicos y la expansión del sistema de transmisión.
- La solución propuesta en este estudio considera una capacidad instalada de **condensadores sincrónicos dentro del rango planteado por la UPME** en el “Plan Maestro de Modernización y Expansión de la Infraestructura de Transmisión Eléctrica” (750 - 4.500 MVA). Sin embargo, se recomienda profundizar los estudios respecto a la localización y el dimensionamiento óptimo de la compensación sincrónica.
- Asimismo, se sugiere analizar cómo se podrían flexibilizar estos requerimientos al incorporar **servicios complementarios** prestados por centrales renovables, tales como la respuesta rápida en frecuencia y la respuesta primaria en frecuencia.

- Una tecnología complementaria a los condensadores sincrónicos es el uso de convertidores *grid-forming*. La coexistencia de ambas tecnologías podría conformar un portafolio de medidas correctivas más eficiente.
- Considerando costos unitarios de 500 kUSD/MVA y 350 kUSD/MVA para CS nuevos y reconvertidos respectivamente, el costo de implementar los CS propuestos asciende a 838 MUSD para el 2028 y 1.538 MUSD para el 2037 (~1 USD/MWh).



Instituto Sistemas Complejos de Ingeniería
República 695, Santiago Centro, Chile
+56 2 2689 4429 / +56 2 2689 4403
contacto@isci.cl / www.isci.cl

Institución Albergante



FACULTAD DE INGENIERÍA
UNIVERSIDAD DE CHILE



Institución Asociada



Patrocina



- Estudios UPME:
 - Plan Maestro de Modernización y Expansión de la Infraestructura de Transmisión Eléctrica
- Licitación (convocatorias UPME 03-2024 y UPME 04-2024):
 - Convocatoria UPME 03-2024
 - Convocatoria UPME 04-2024
- Estudios XM:
 - Estudio de Flexibilidad del SIN:
 - Informe de planeamiento operativo eléctrico de largo plazo (IPOELP):
- Estudios externos:
 - Estudio de estabilidad de red eléctrica en GCM (PHC).
 - Task 2 (Transgrid/UPME)

- La base de datos utilizada para realizar las simulaciones dinámicas fue facilitada por XM.
- Las obras de expansión consideradas fueron extraídas del Plan de Expansión de Transmisión 2022 - 2036 de UPME y Informe de Planeamiento Operativo Eléctrico de Largo Plazo (IPOELP) Primer semestre 2024.
- Los límites de operación tanto de régimen permanente como en régimen transitorio considerados fueron extraídos de la normativa Resolución CREG 025 de 1995.
- En la BBDD de XM no se modela la dinámica de los Phase-Locked Loop (PLL). Estos corresponden al lazo de control utilizado para sincronizar las unidades ERV a la red. Considerando que se simularán escenarios de alta penetración ERV, esta dinámica no puede ser despreciada, debido a que las unidades con PLL tienden a presentar problemas en dichos escenarios (redes débiles).
- Es más, en el documento [1] se señala que no se cuenta con modelos validados para las ERV.
- En ese contexto, se modificaron los modelos de la librería de DlgSILENT WECC, para incluir la dinámica de los PLL.
- Para los modelos de centrales renovables se consideraron los requisitos establecidos en la normativa Resolución CREG 060 de 2019.

[1]. “Consideraciones y Supuestos del Modelo Eléctrico del SIN en DlgSILENT Power Factory IPOELP I de 2024”

- La información para modelar la red en **SimSEE** se obtuvo del “Análisis energético de largo plazo **MPODE**”.
- Sin embargo, los nombres de las unidades heredados de MPODE no coinciden necesariamente con los nombres utilizados en la base de datos de **DIgSILENT**.
- Por lo tanto, existen **diferencias entre las nomenclaturas utilizadas en SimSEE y DIgSILENT**.
- Para solucionar esto se creó en un **diccionario de homologación** para facilitar la comunicación entre los dos modelos.
- Además, el diccionario es útil para revisar la **coherencia entre los parámetros** definidos en ambos modelos.

 **SimSEE**

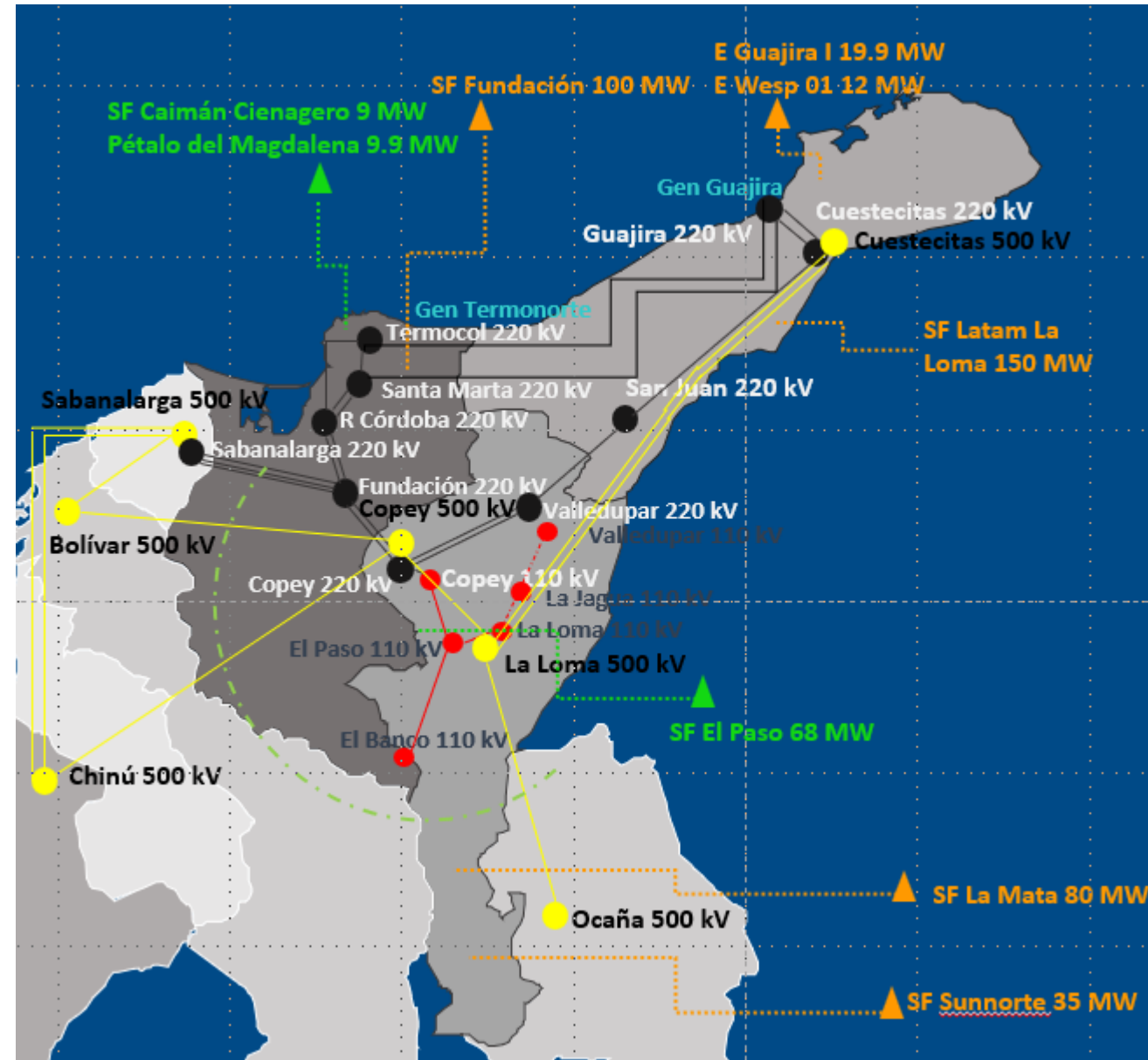


SILENT
DIG



- Uno de los estudios complementarios analizados corresponde al “**Estudio de estabilidad de red eléctrica en GCM** (Guajira Cesar Magdalena)” realizado por la consultora **PHC**.
- Se analiza la estabilidad del área GCM frente al retiro de la **central Termo-Guajira** para el año 2028.
- Se proponen **alternativas que permiten fortalecer** la red de GCM y el área Caribe a medida que se va dando la transición a una matriz eléctrica más limpia.
- Se concluye que **es posible mantener la estabilidad** del SIN gracias a la instalación de condensadores sincrónicos.

Se proponen modificaciones en ciertos **aspectos regulatorios**.



Area	Equipo	Hmin 2028	Dmin 2028	Hmin 2037	Dmin 2037
Nordeste	GS	3.174	3.217	425	363
Nordeste	CS	-	-	3.090	3.090
Suroccidental	GS	2.030	4.585	3.014	3.666
Suroccidental	CS	-	-	2.060	2.060
Caribe	GS	2.901	1.521	72	1.033
Caribe	CS	3.720	3.720	5.780	5.780
Antioquia	GS	19.113	17.007	15.562	10.416
Antioquia	CS	200	200	3.290	3.290
Oriental	GS	4.502	2.876	5.876	1.623
Oriental	CS	200	200	4.320	4.320
Total	GS	31.720	29.207	24.948	17.101
Total	CS	4.120	4.120	18.540	18.540

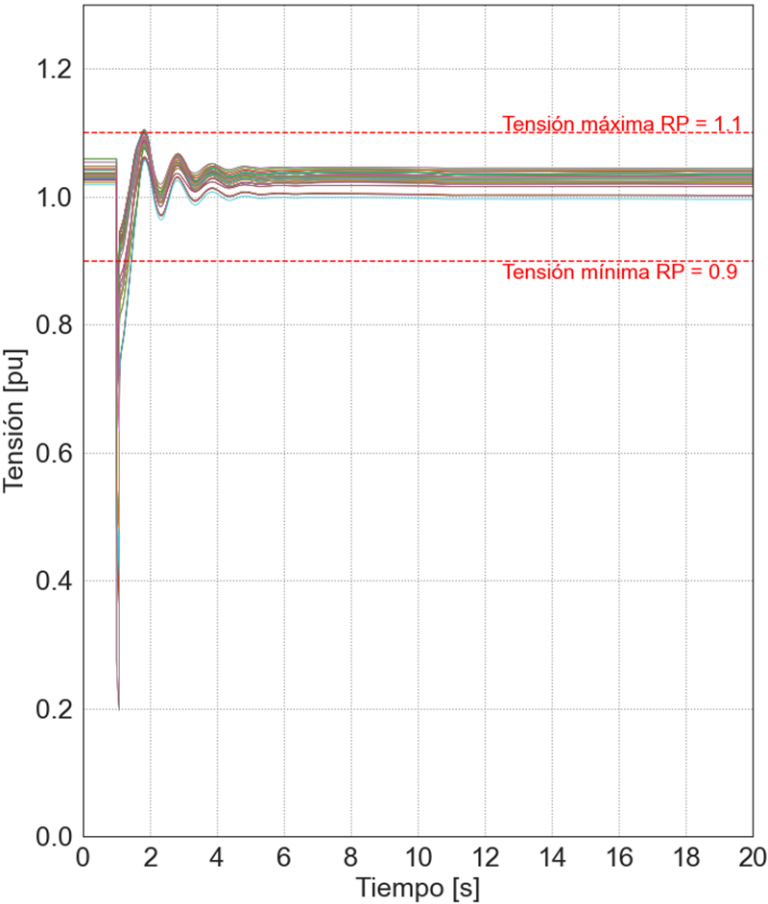
*Inercias expresadas en MVAs.

*GS: Generador sincrónico.

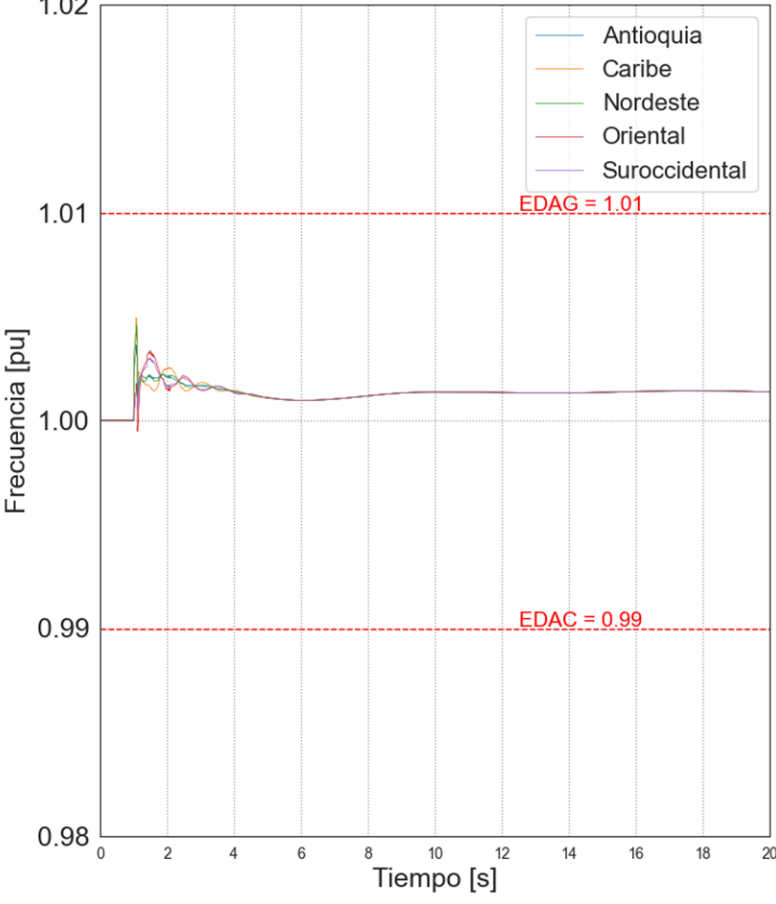
*CS: Condensador sincrónico.

Resultados inercia mínima en Caribe 2028

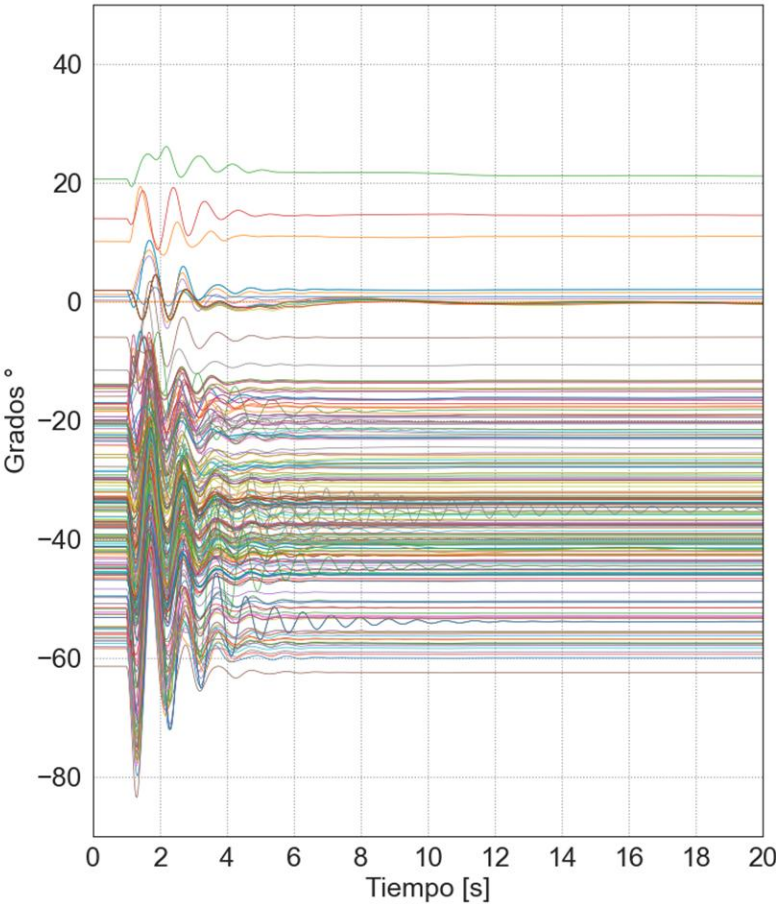
Tensión en barras de 500 kV
cortocircuito en Bacata - Primavera 1 500 T2



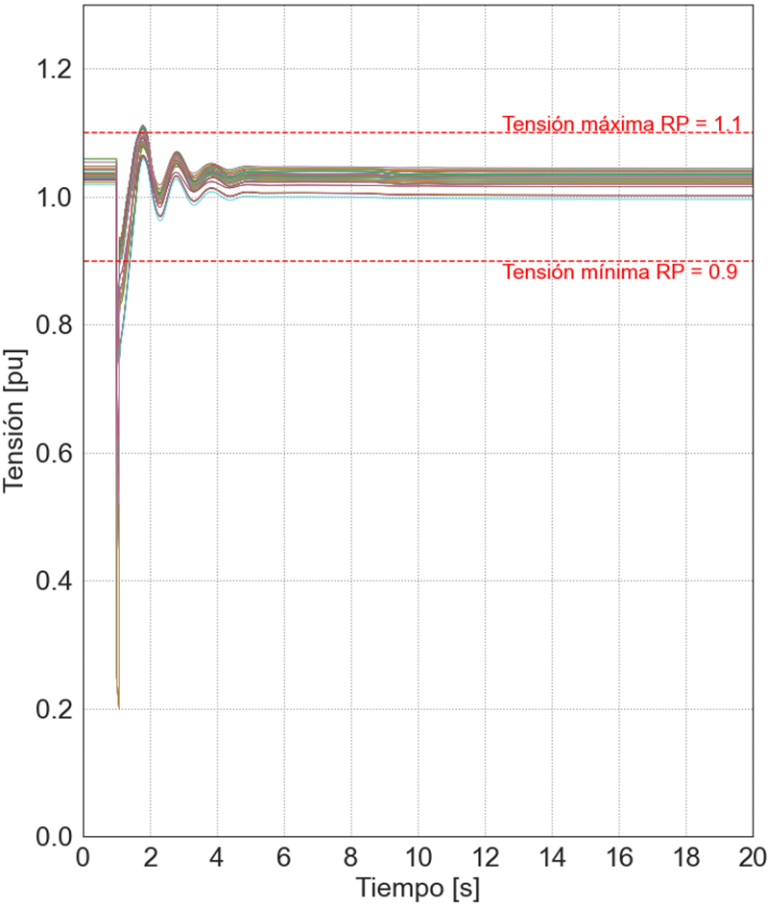
Frecuencia en barras de 500 kV
cortocircuito Bacata - Primavera 1 500 T2



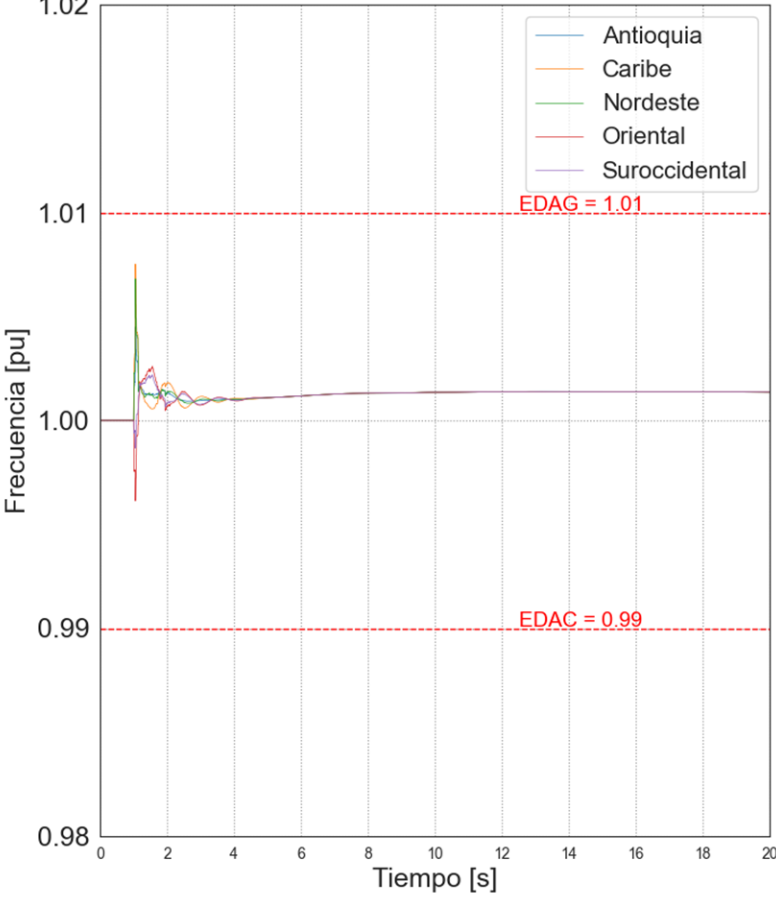
Ángulos de GS
cortocircuito en Bacata - Primavera 1 500 T2



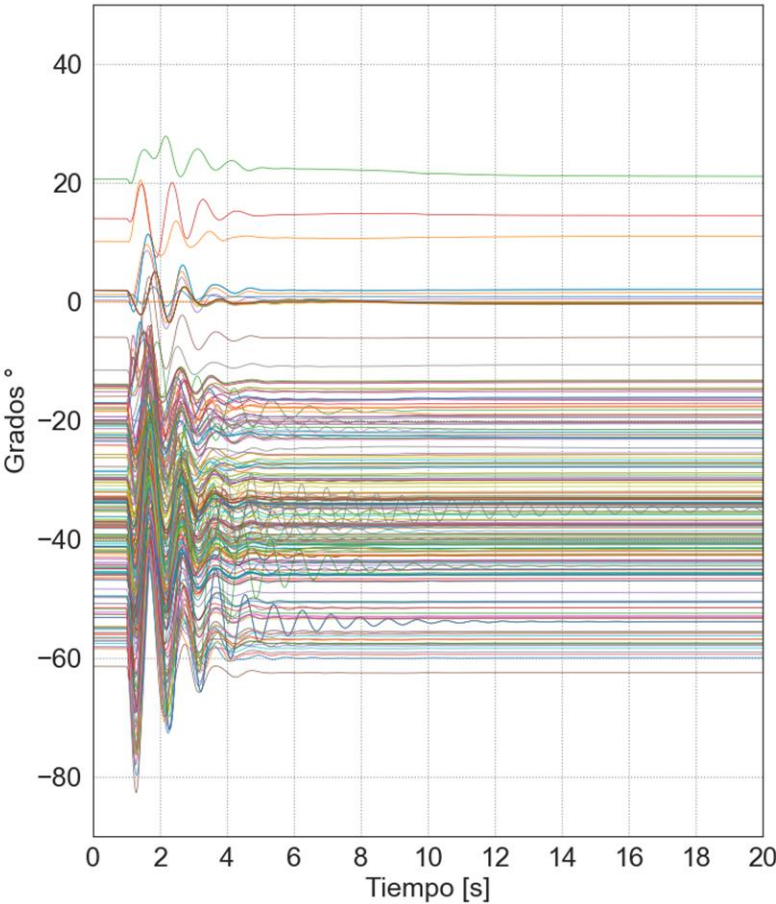
Tensión en barras de 500 kV
cortocircuito en Bacata - Primavera 1 500 T2



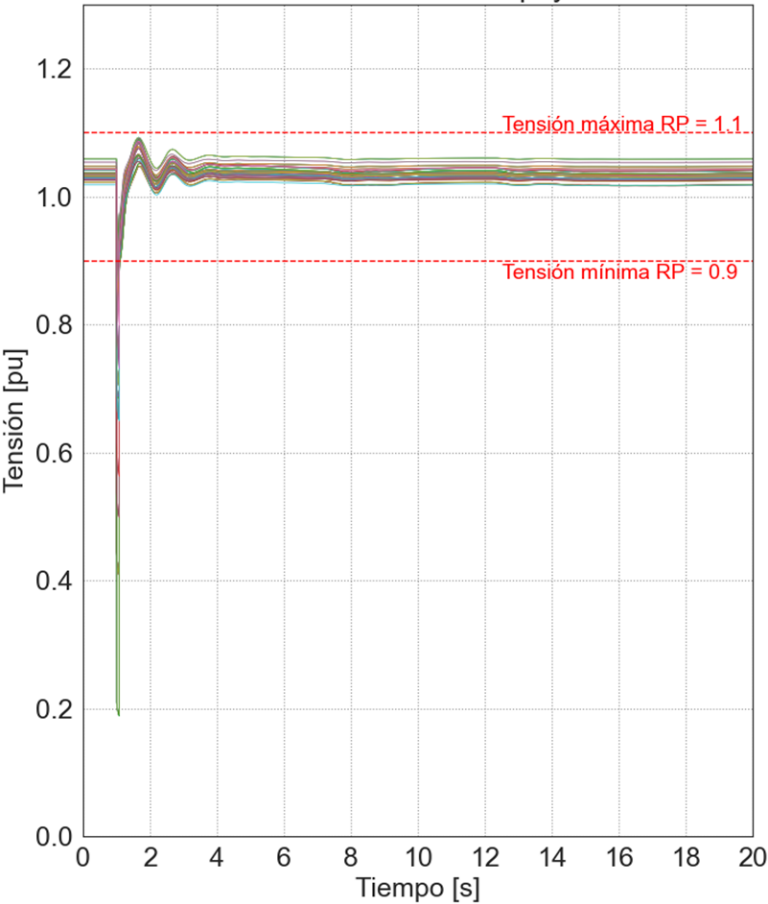
Frecuencia en barras de 500 kV
cortocircuito Bacata - Primavera 1 500 T2



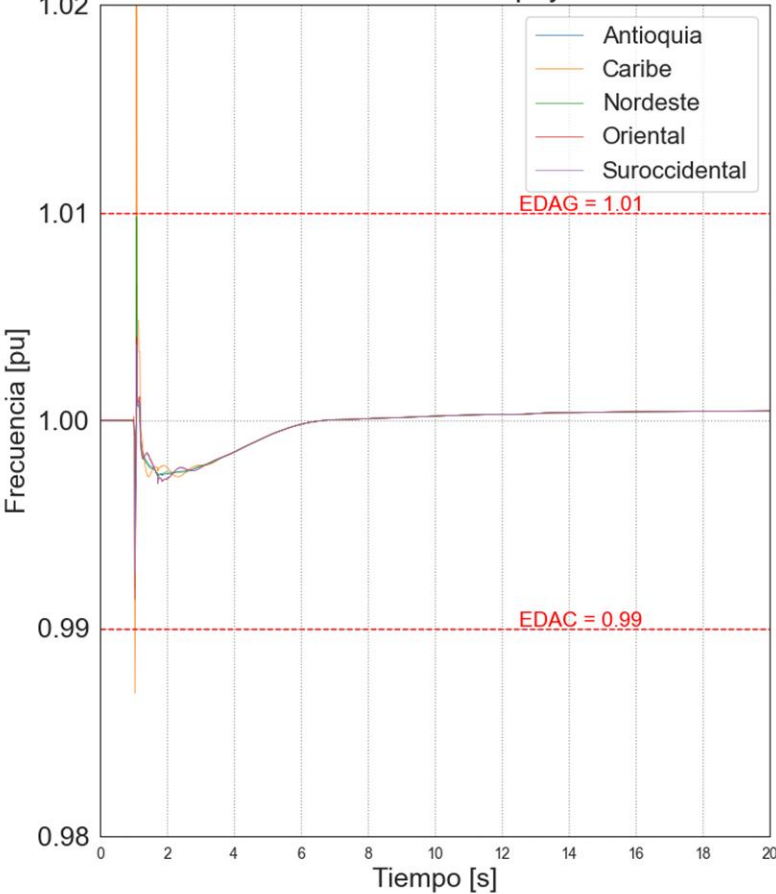
Ángulos de GS
cortocircuito en Bacata - Primavera 1 500 T2



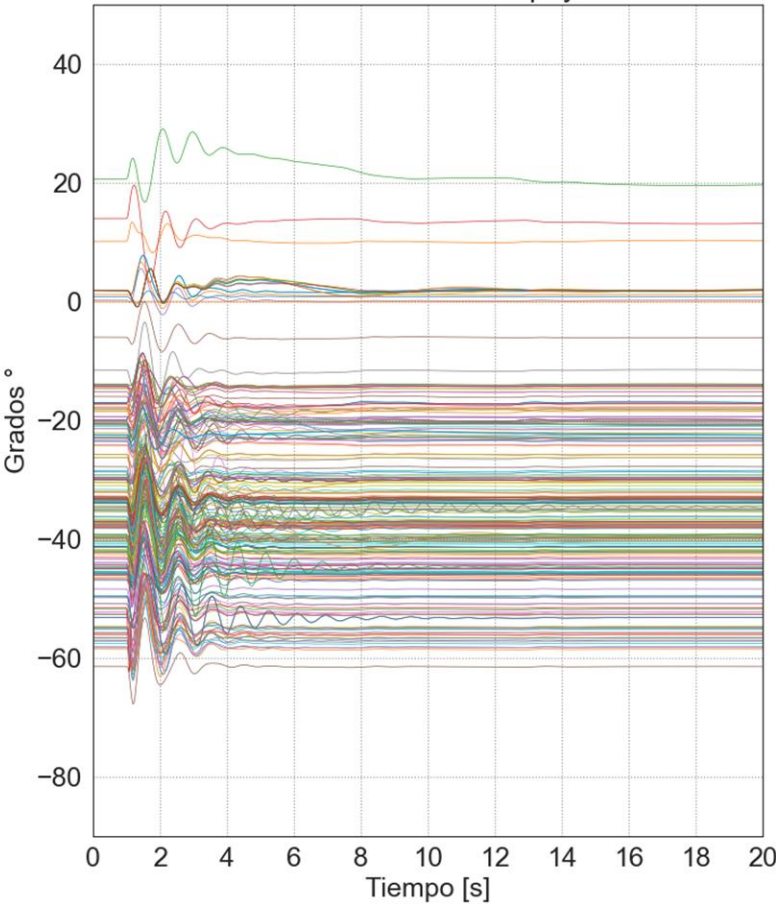
Tensión en barras de 500 kV
cortocircuito en Bolivar - Copey 1 500 T2

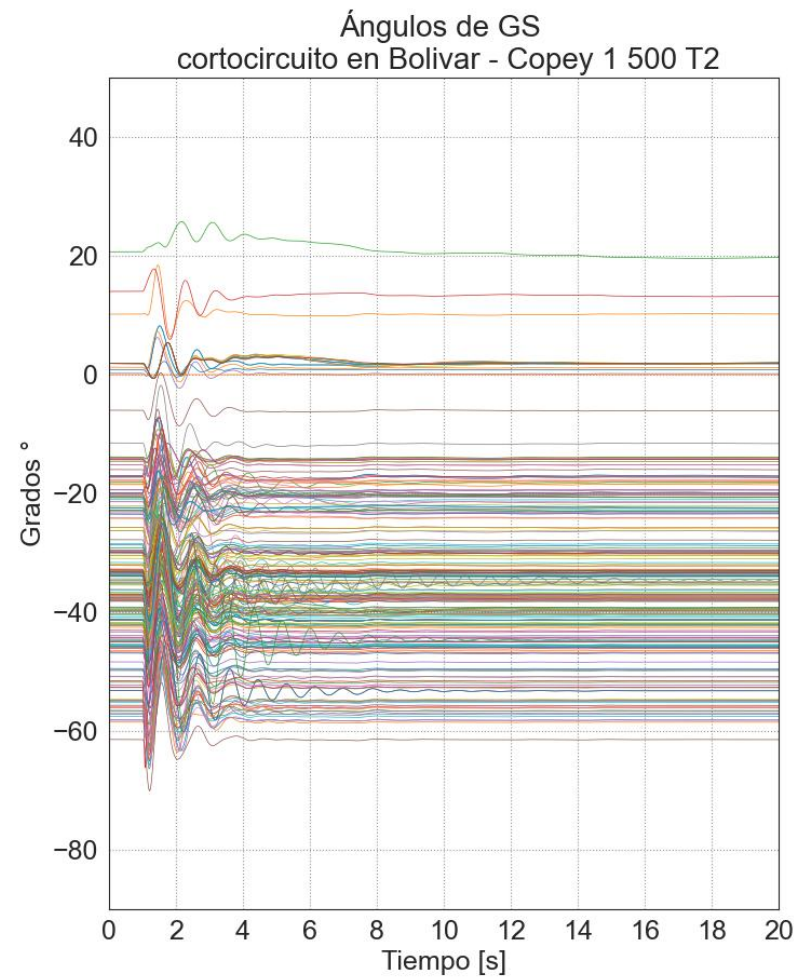
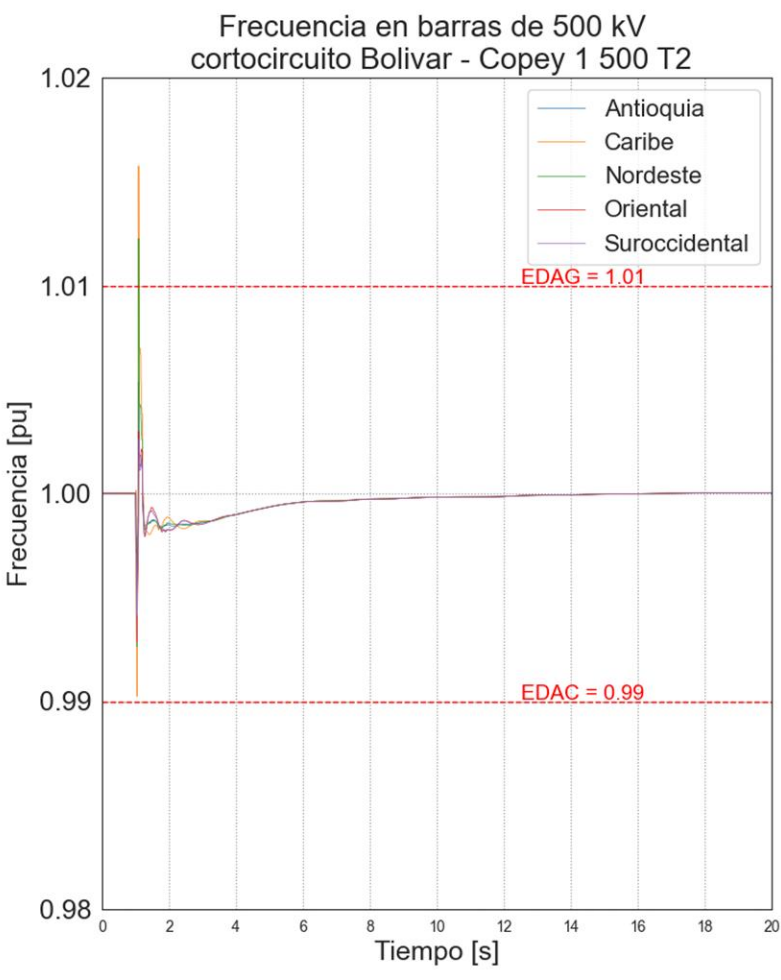
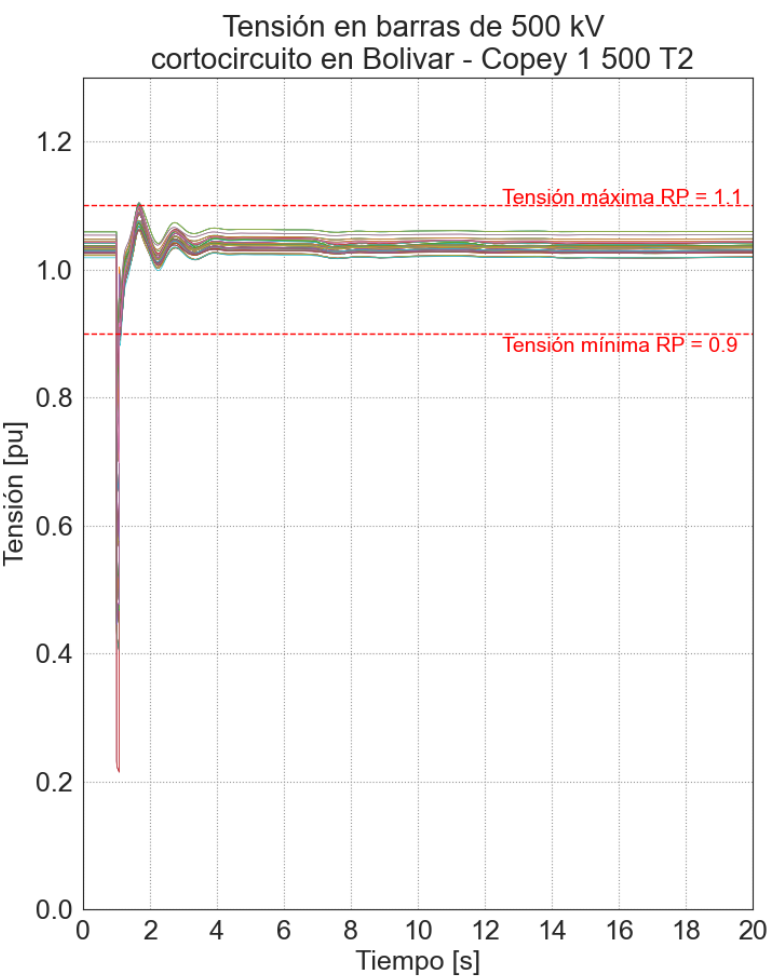


Frecuencia en barras de 500 kV
cortocircuito Bolivar - Copey 1 500 T2

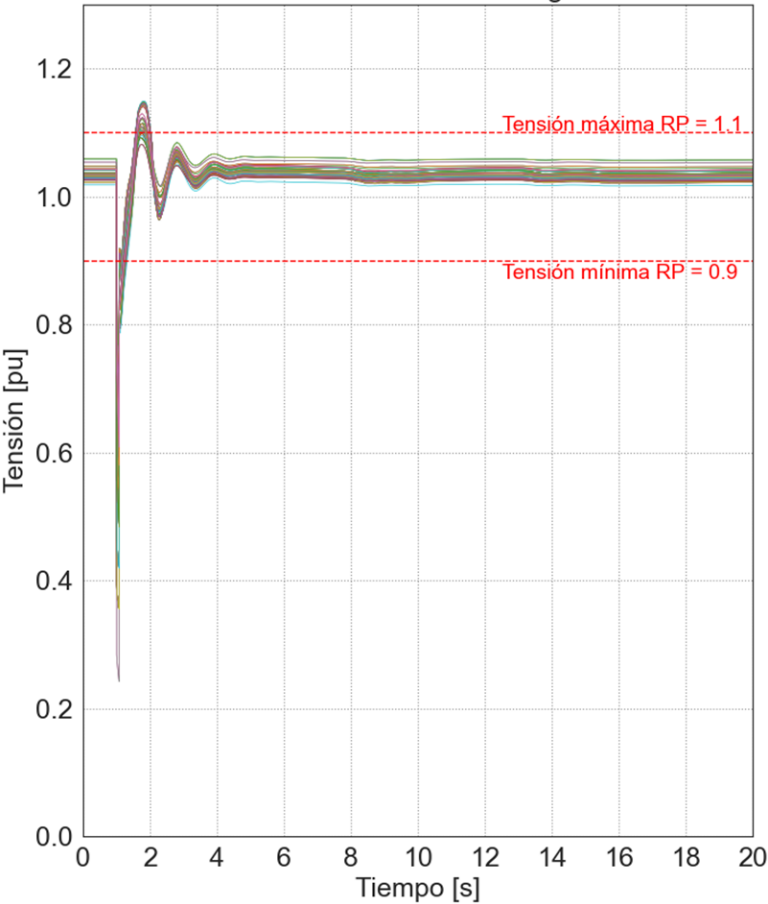


Ángulos de GS
cortocircuito en Bolivar - Copey 1 500 T2

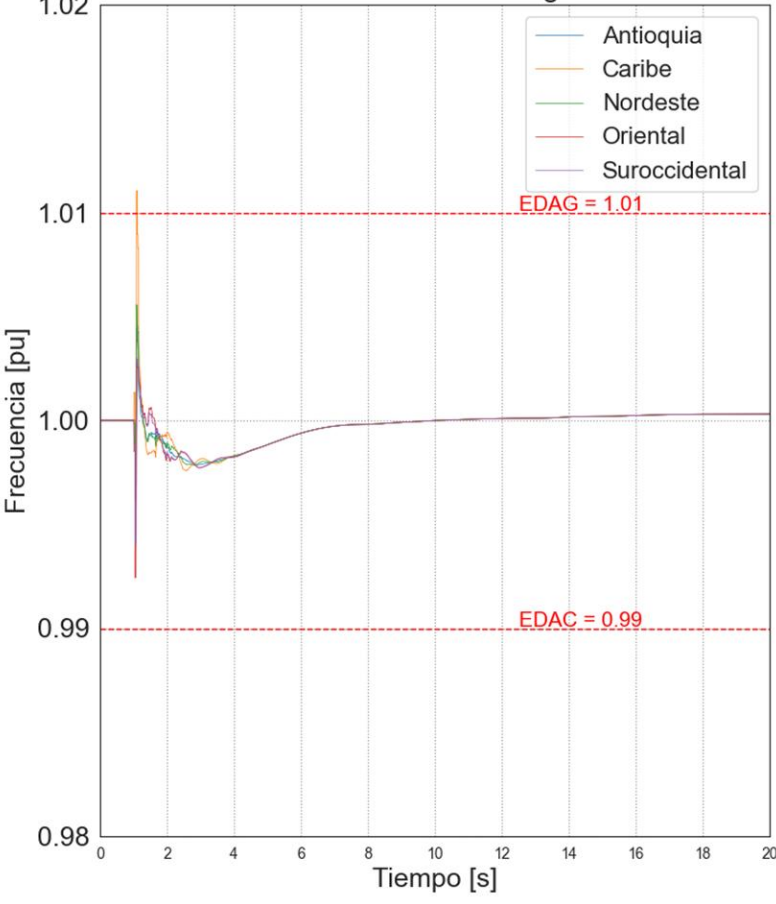




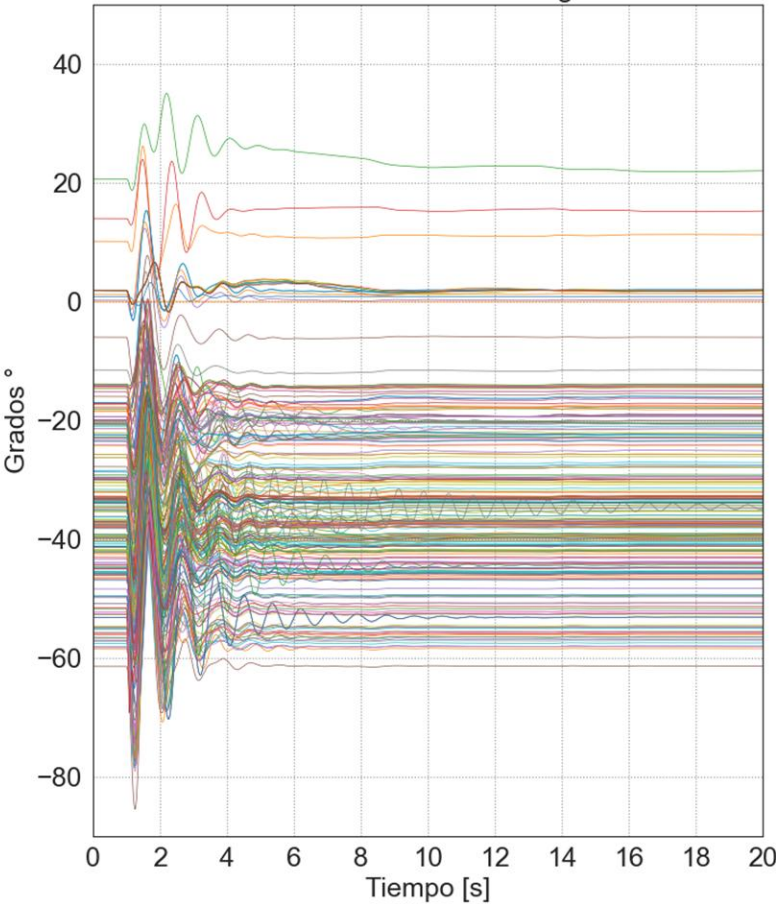
Tensión en barras de 500 kV
cortocircuito en Cerro - Sahagun 1 500

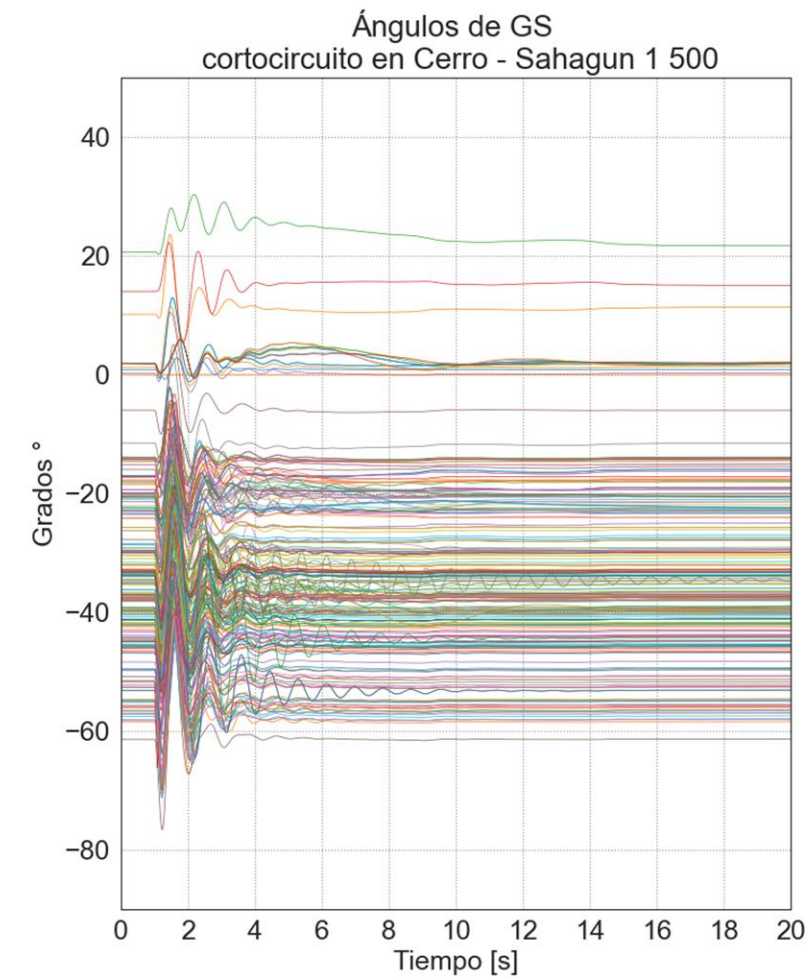
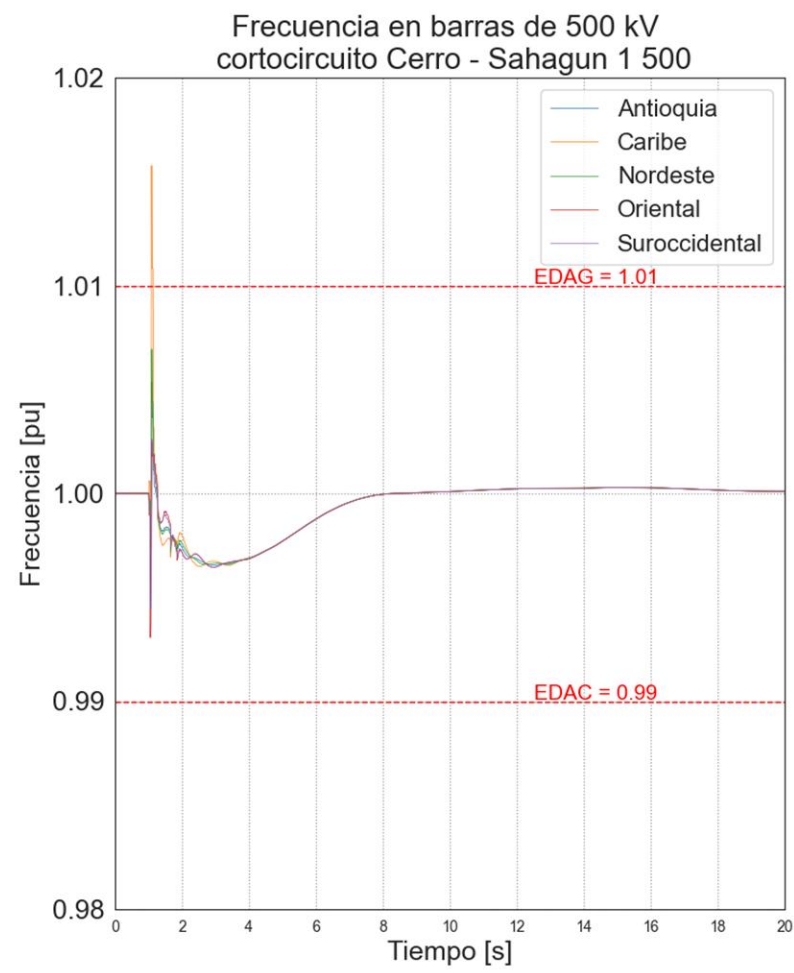
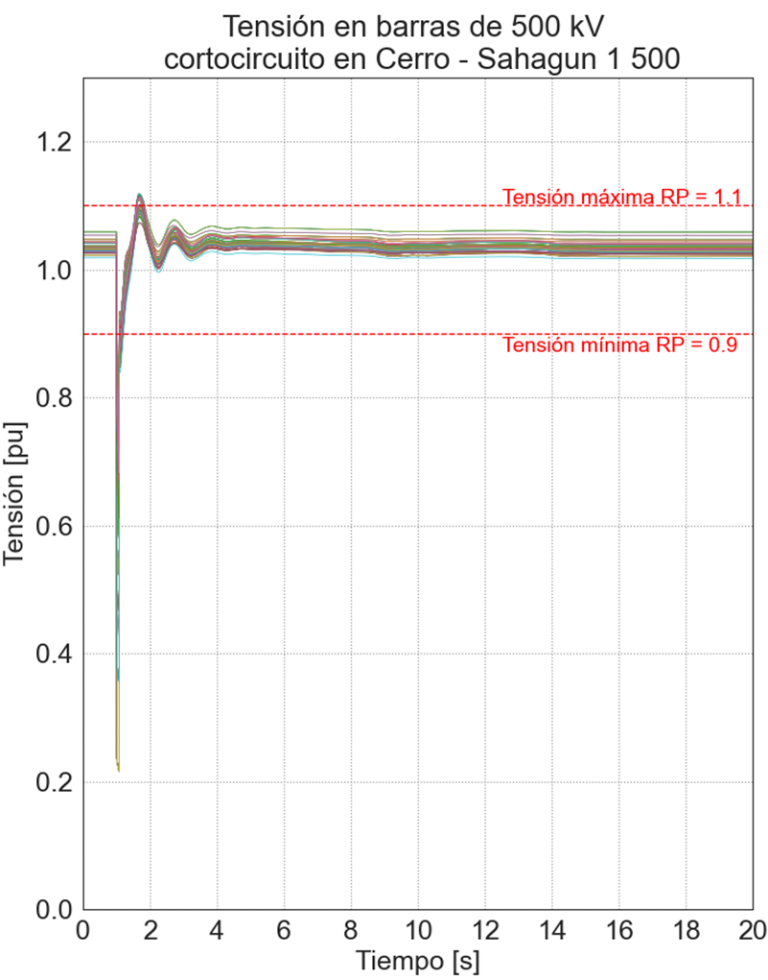


Frecuencia en barras de 500 kV
cortocircuito Cerro - Sahagun 1 500

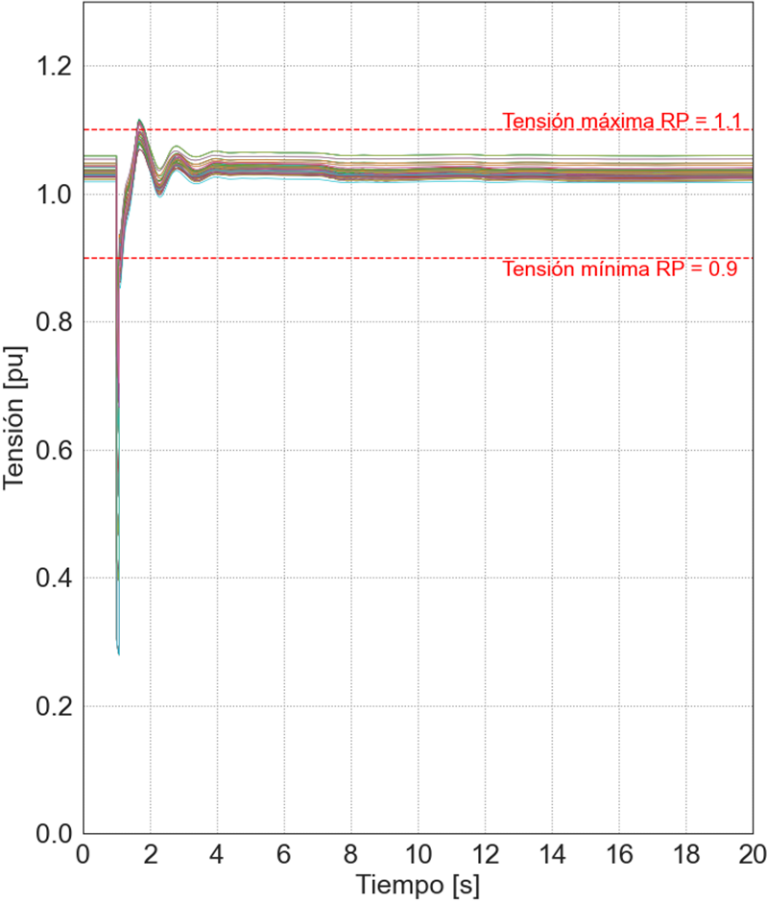


Ángulos de GS
cortocircuito en Cerro - Sahagun 1 500

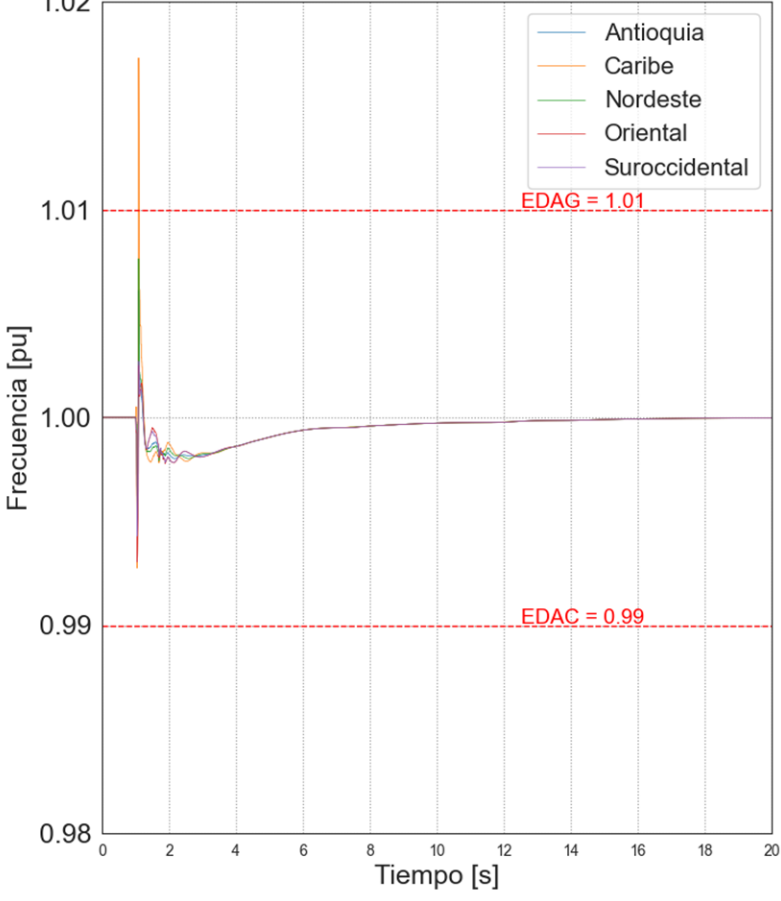




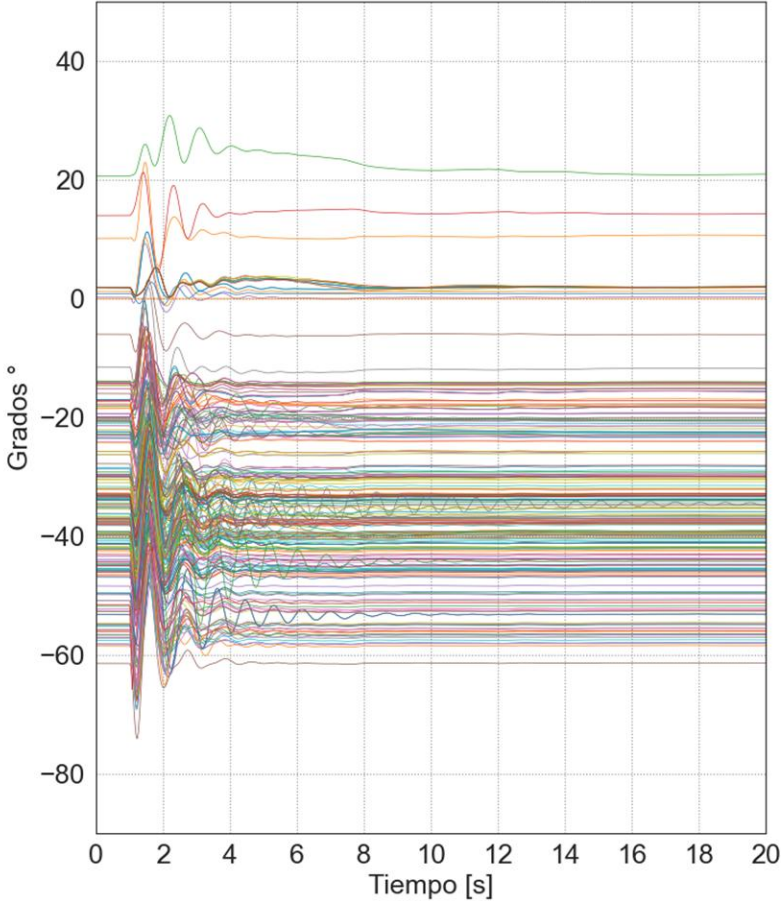
Tensión en barras de 500 kV
cortocircuito en Chinu - Copey 1 500

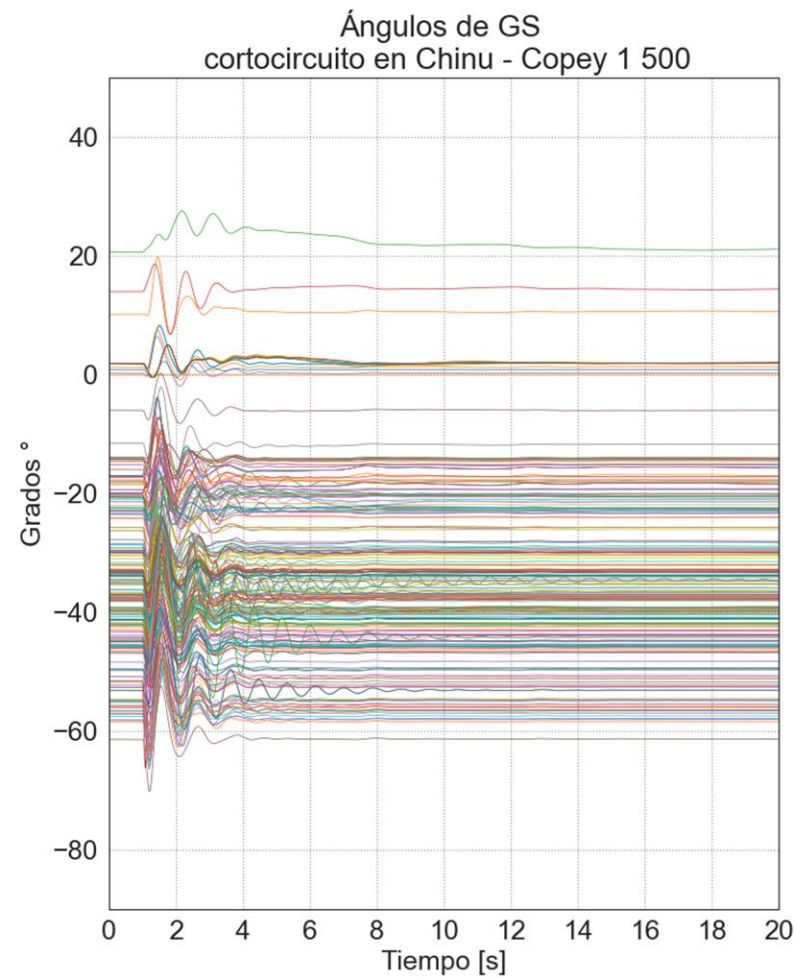
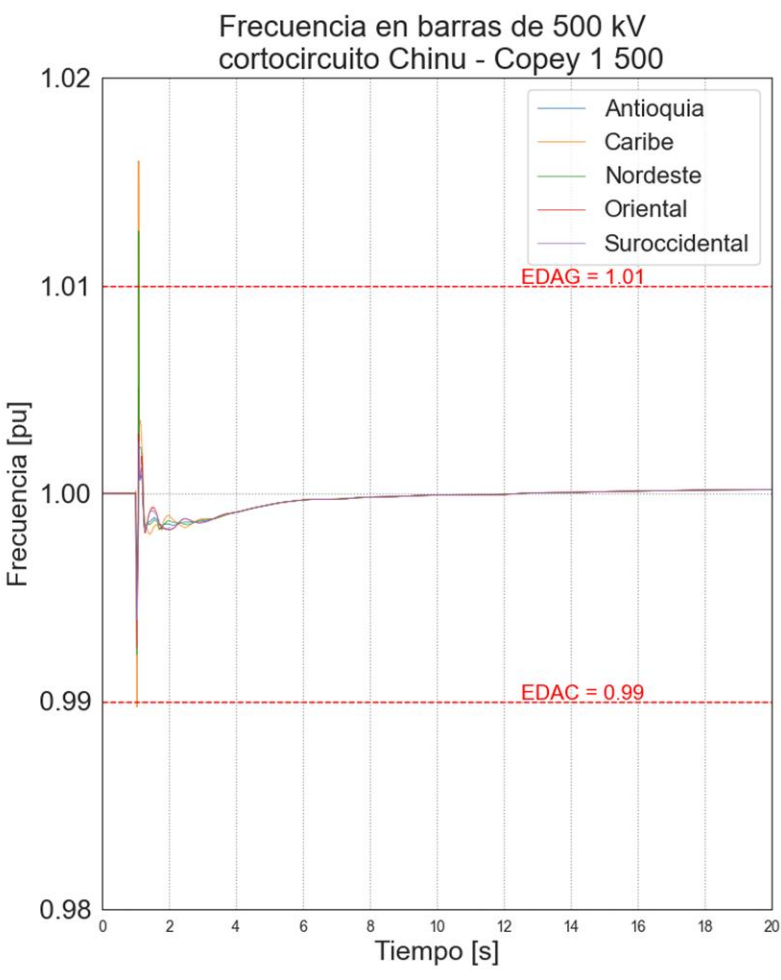
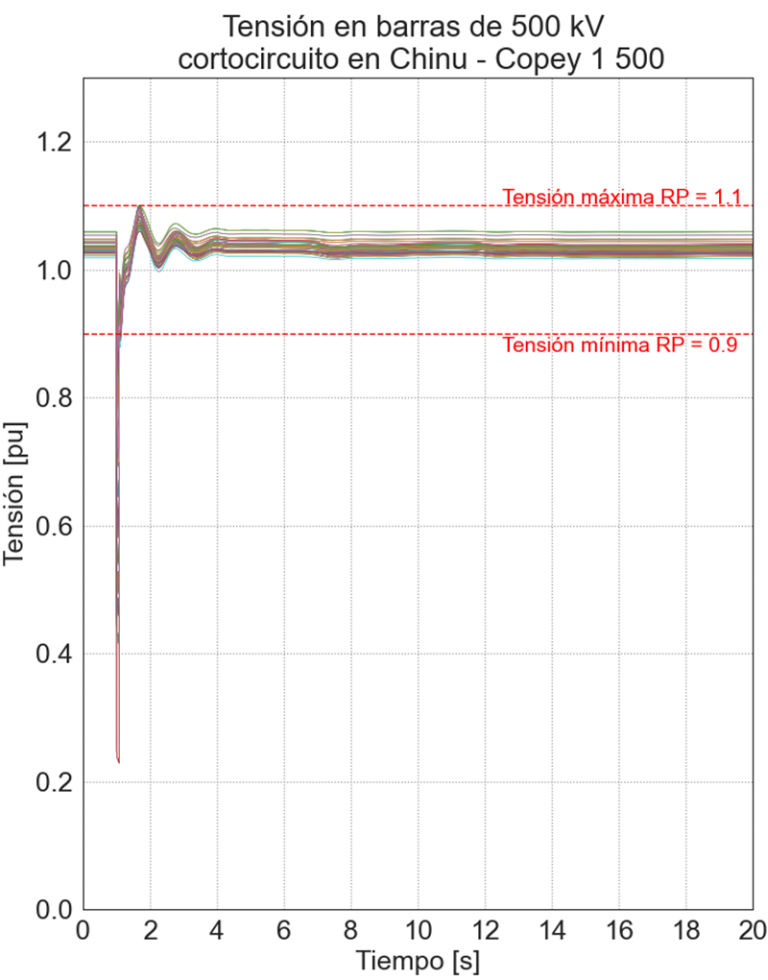


Frecuencia en barras de 500 kV
cortocircuito Chinu - Copey 1 500

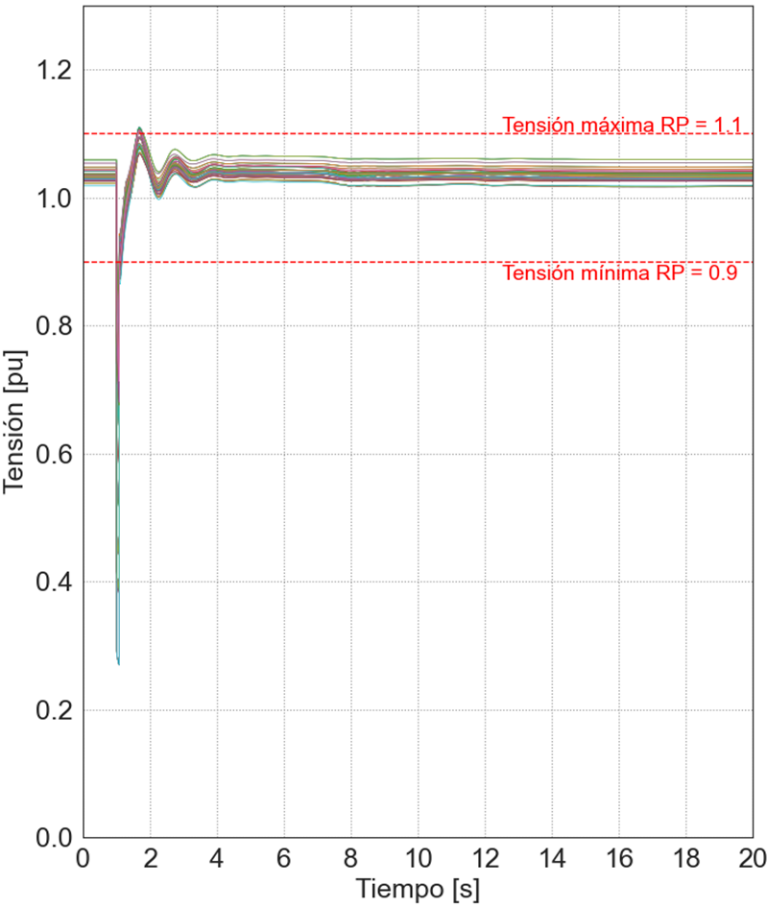


Ángulos de GS
cortocircuito en Chinu - Copey 1 500

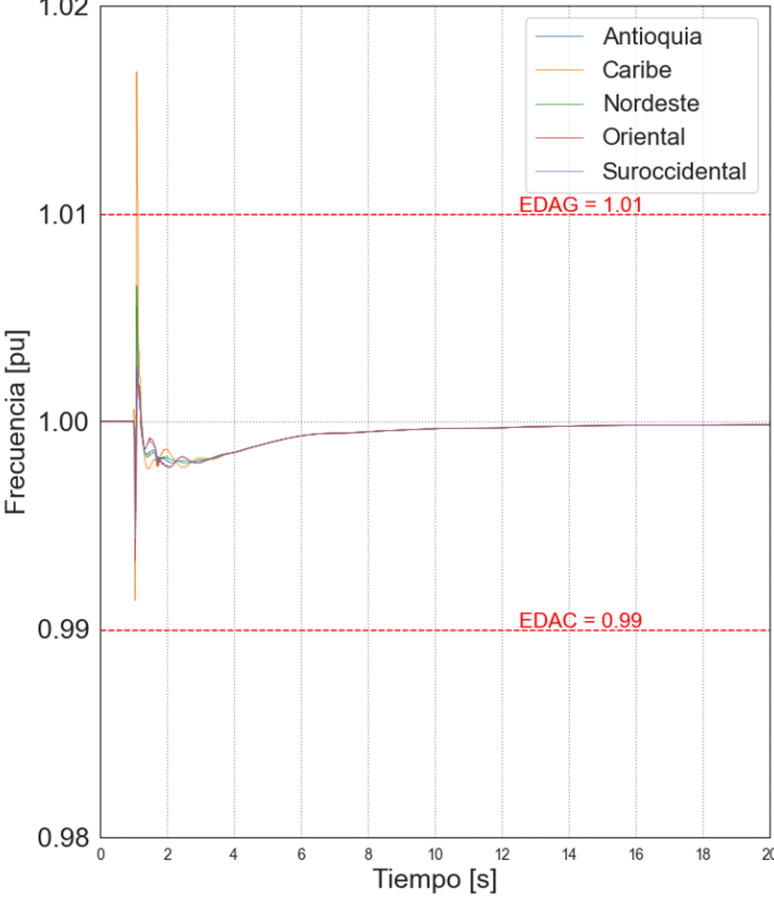




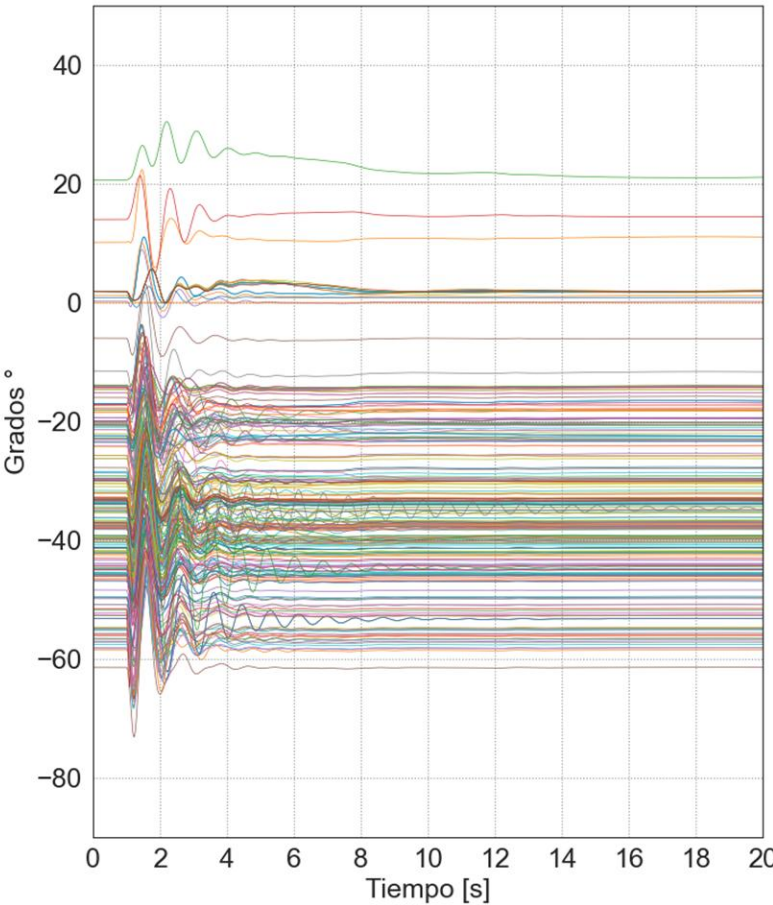
Tensión en barras de 500 kV
cortocircuito en Chinu - Sabana 2 500 T2

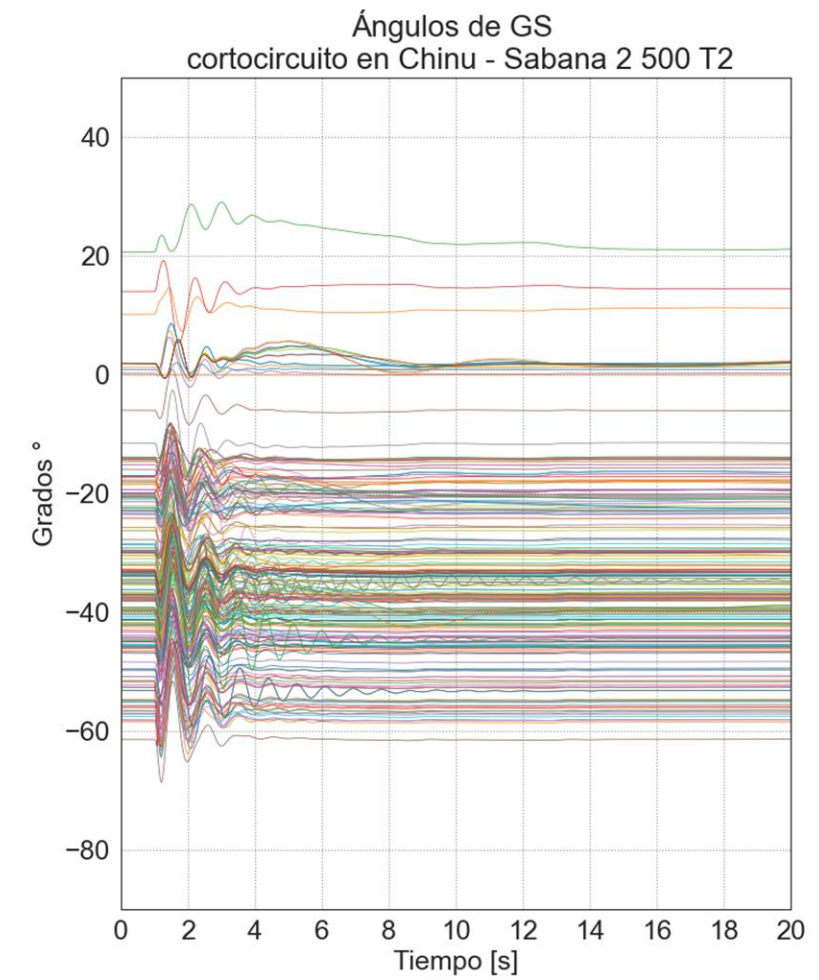
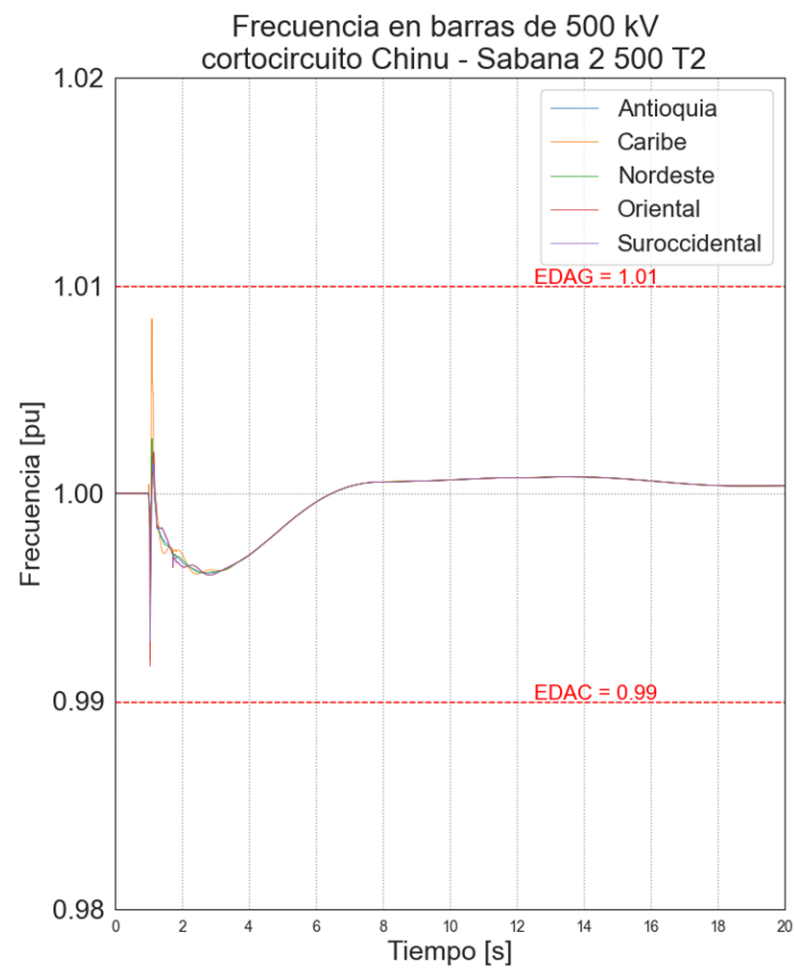
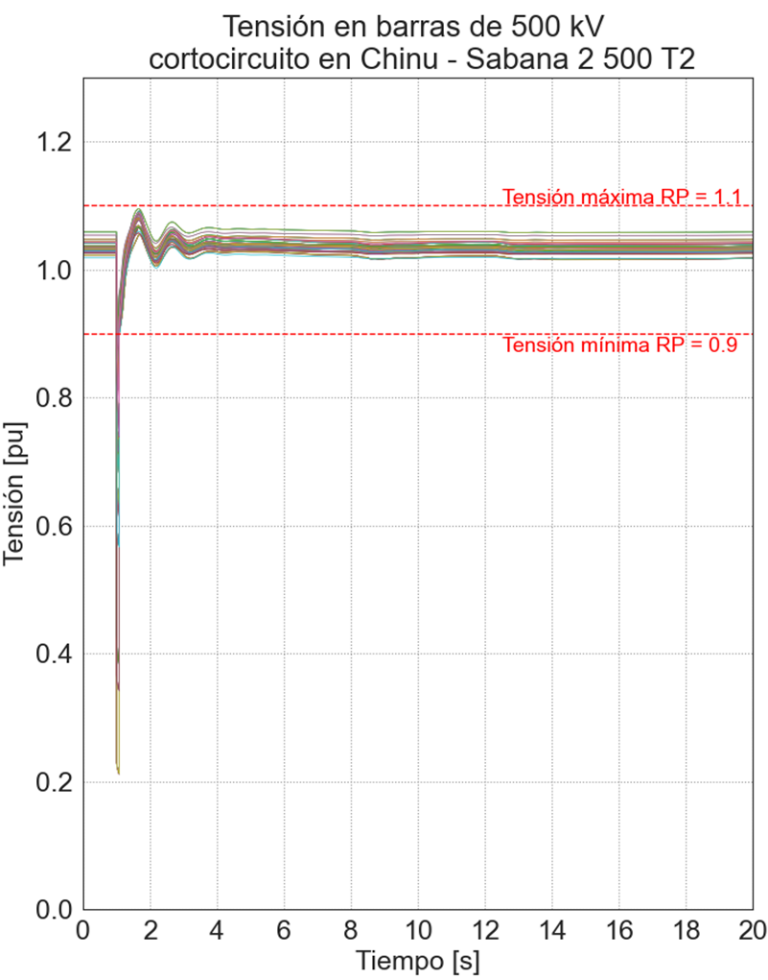


Frecuencia en barras de 500 kV
cortocircuito Chinu - Sabana 2 500 T2

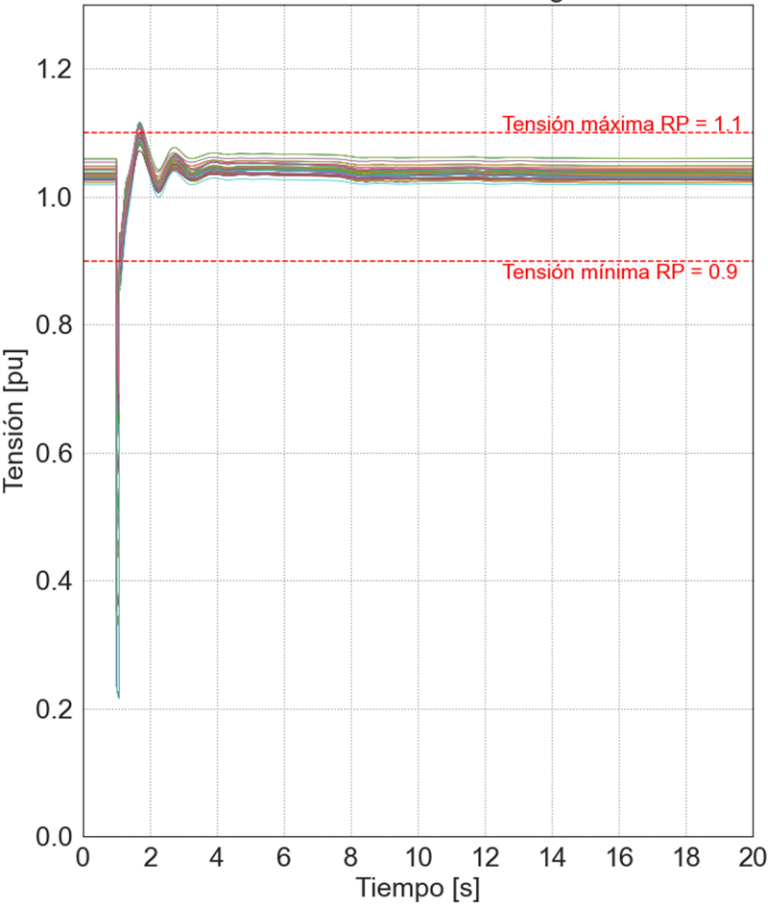


Ángulos de GS
cortocircuito en Chinu - Sabana 2 500 T2

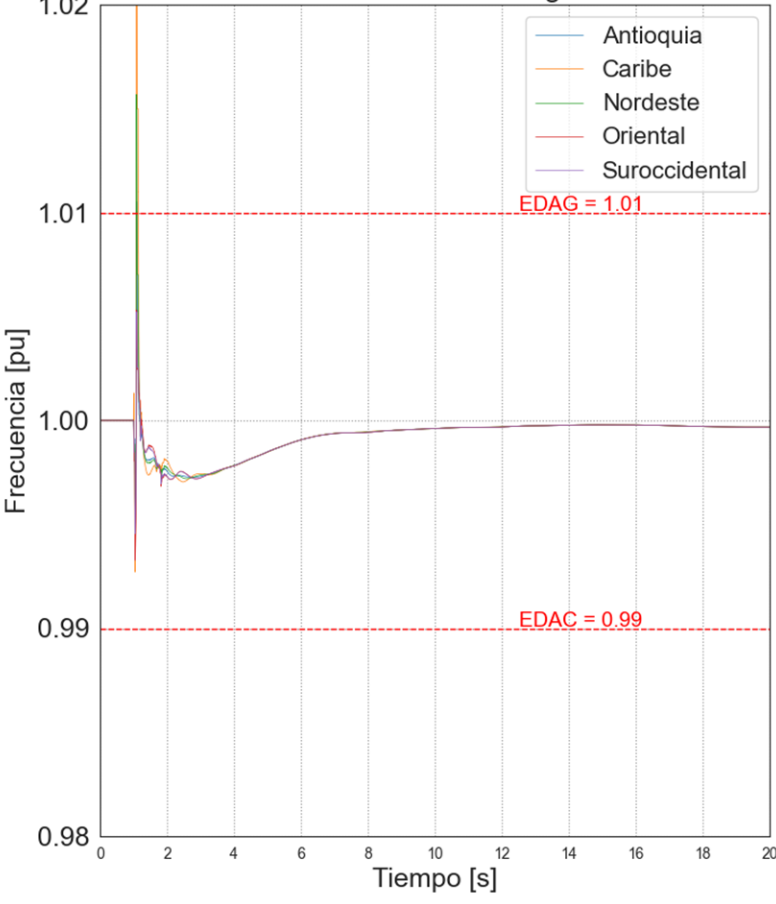




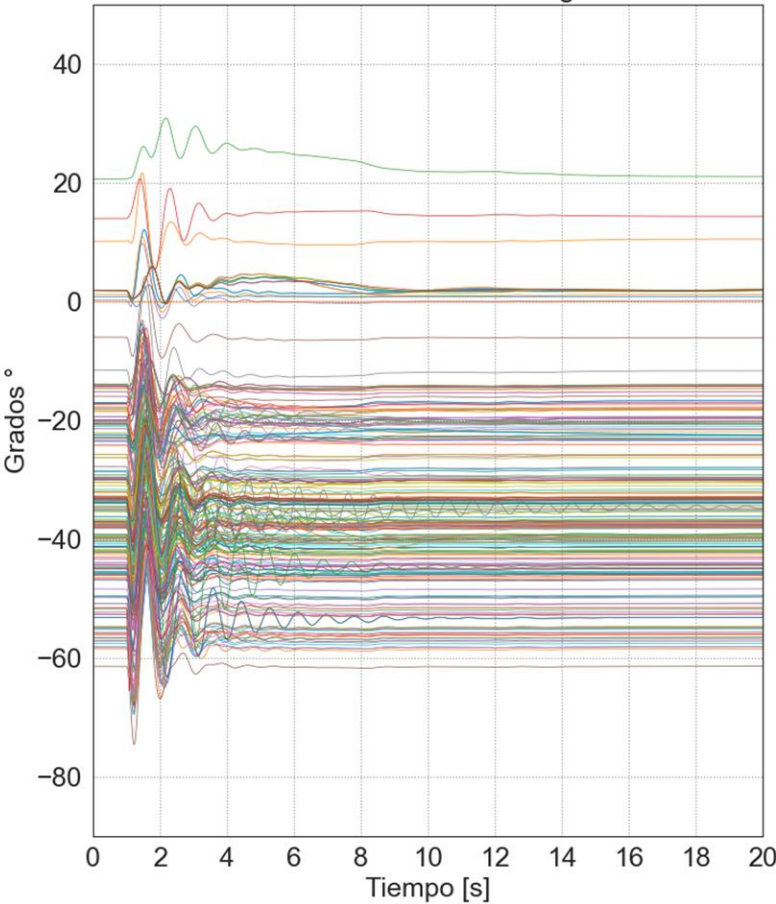
Tensión en barras de 500 kV
cortocircuito en Chinu - Sahagun 1 500

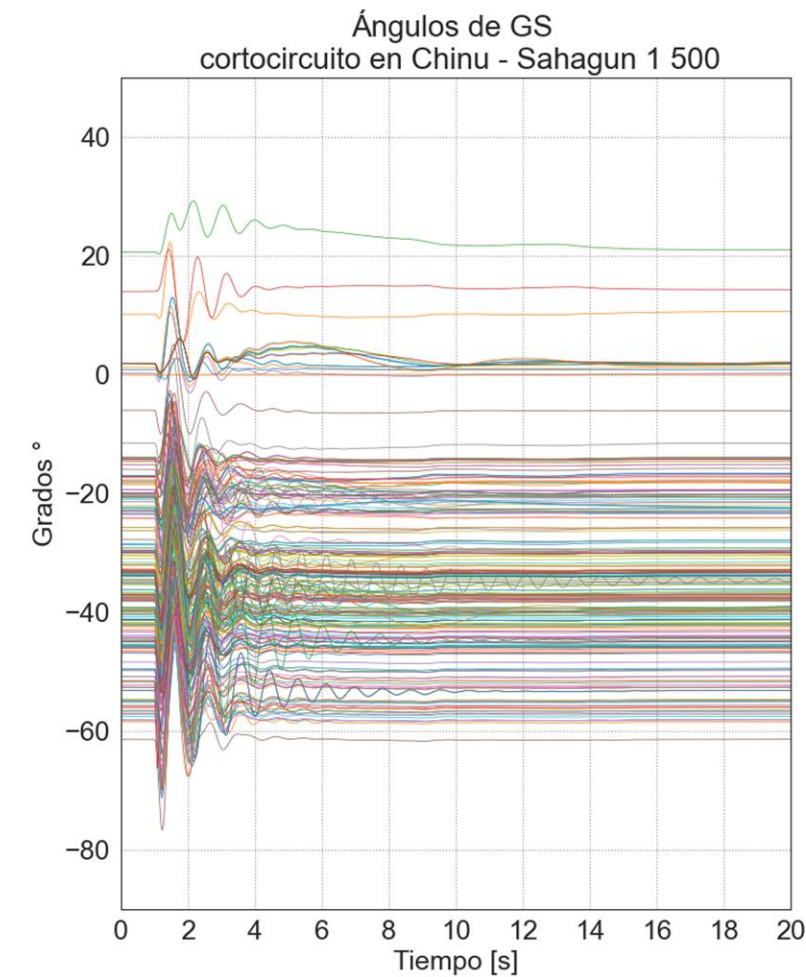
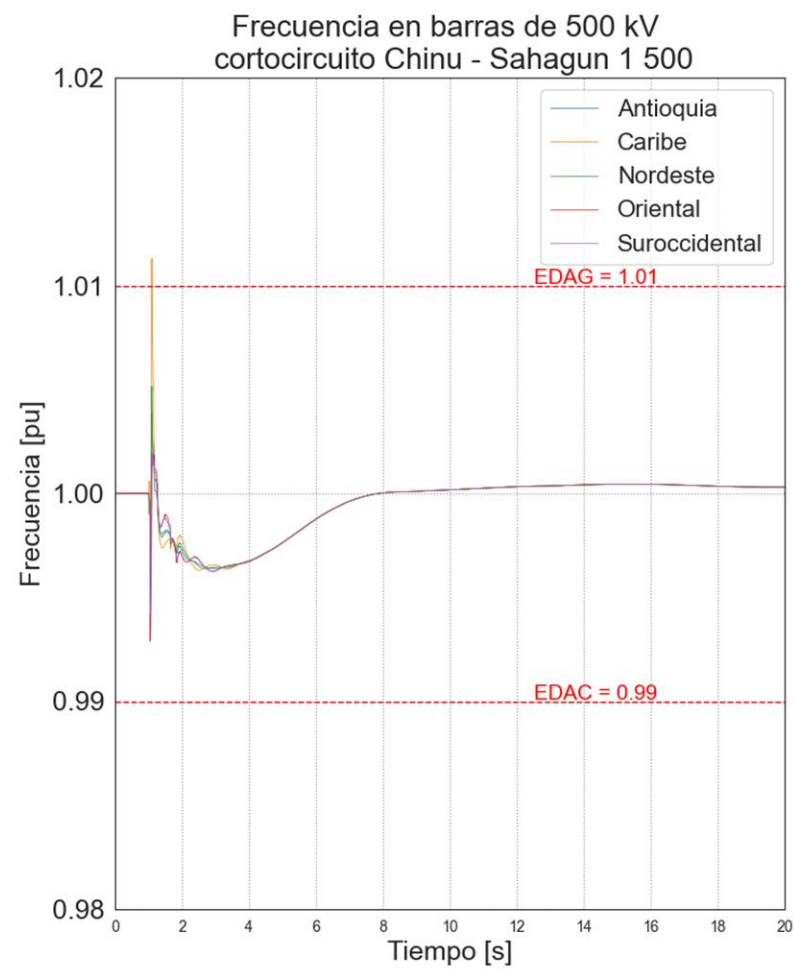
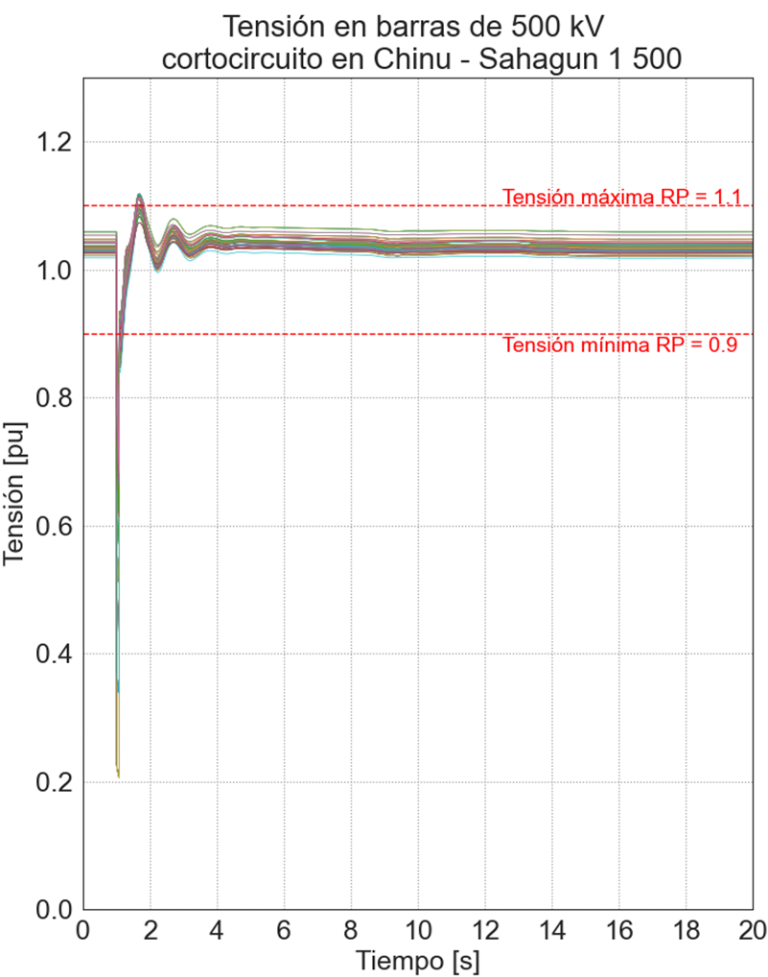


Frecuencia en barras de 500 kV
cortocircuito Chinu - Sahagun 1 500

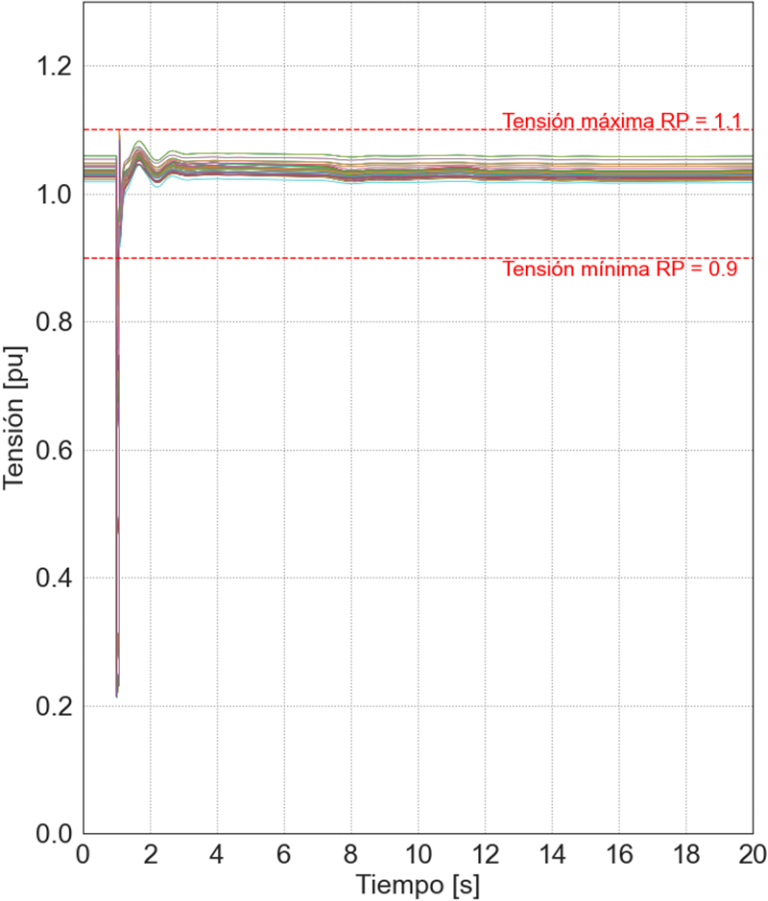


Ángulos de GS
cortocircuito en Chinu - Sahagun 1 500

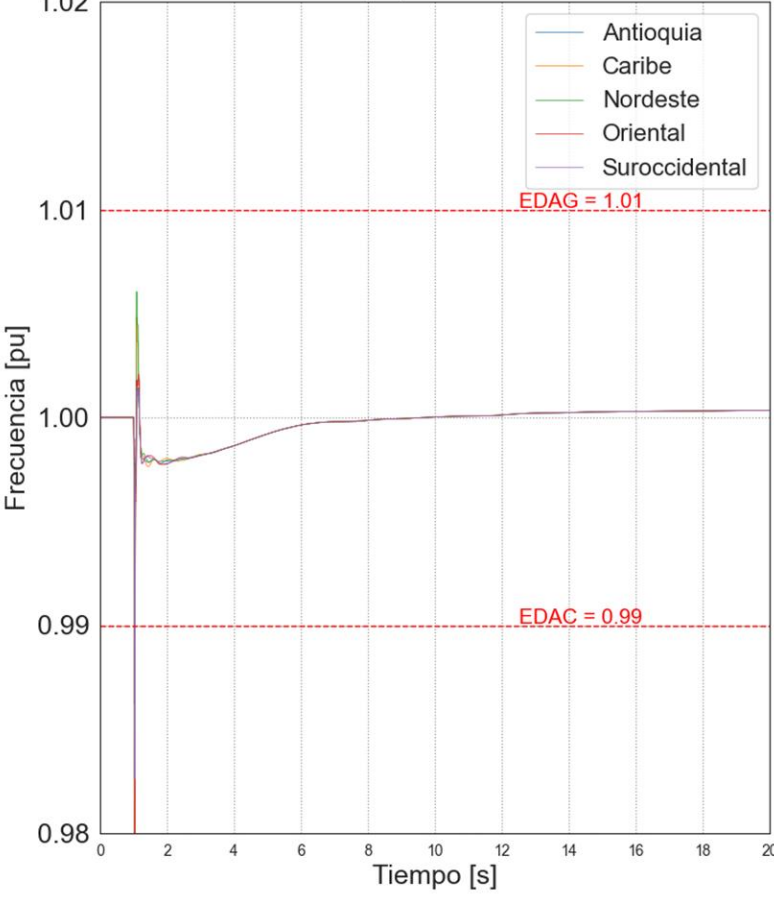




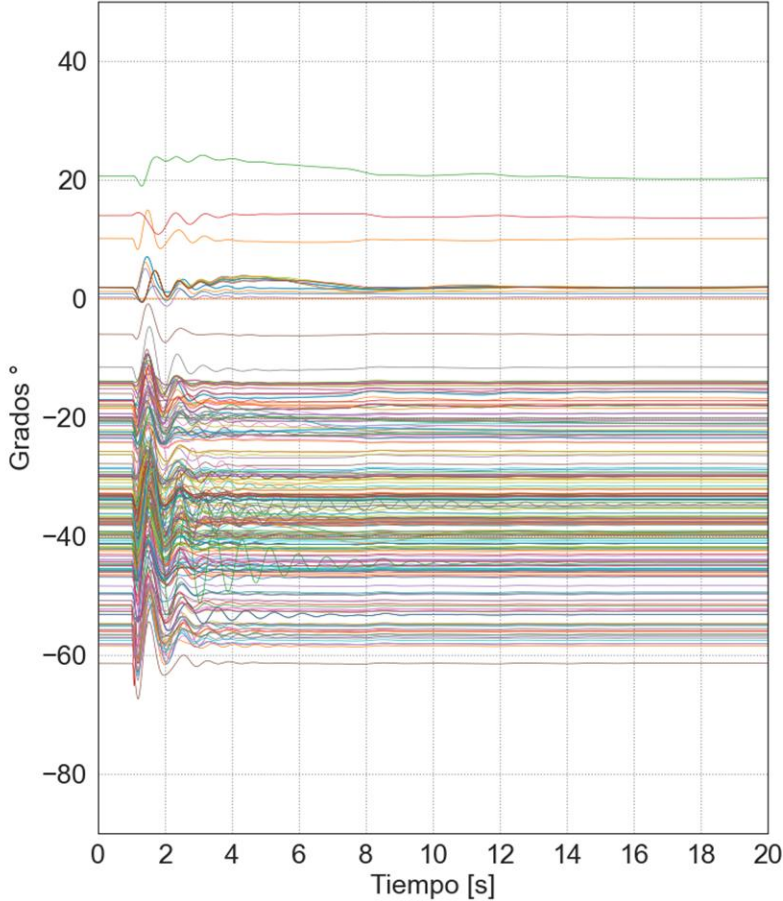
Tensión en barras de 500 kV
cortocircuito en Copey - Cuestecitas 1 500 T2



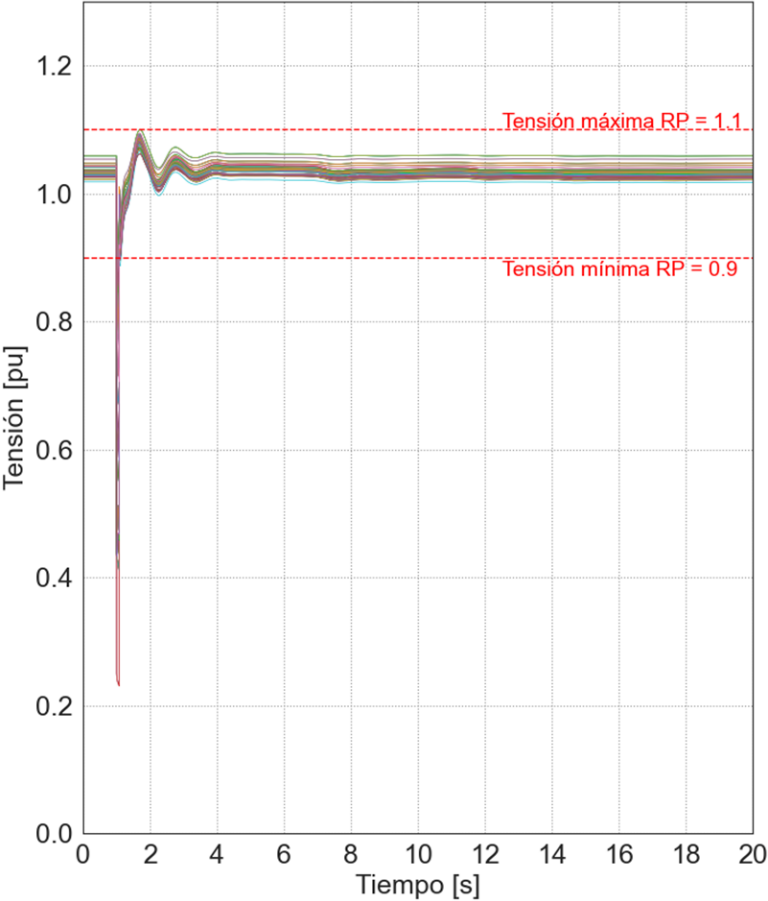
Frecuencia en barras de 500 kV
cortocircuito Copey - Cuestecitas 1 500 T2



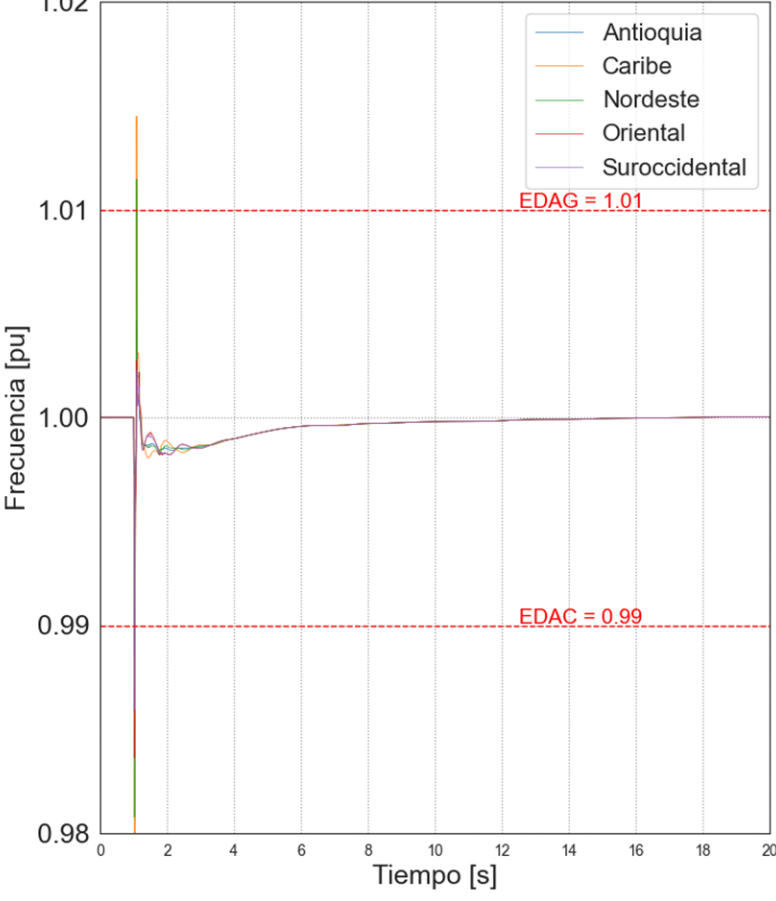
Ángulos de GS
cortocircuito en Copey - Cuestecitas 1 500 T2



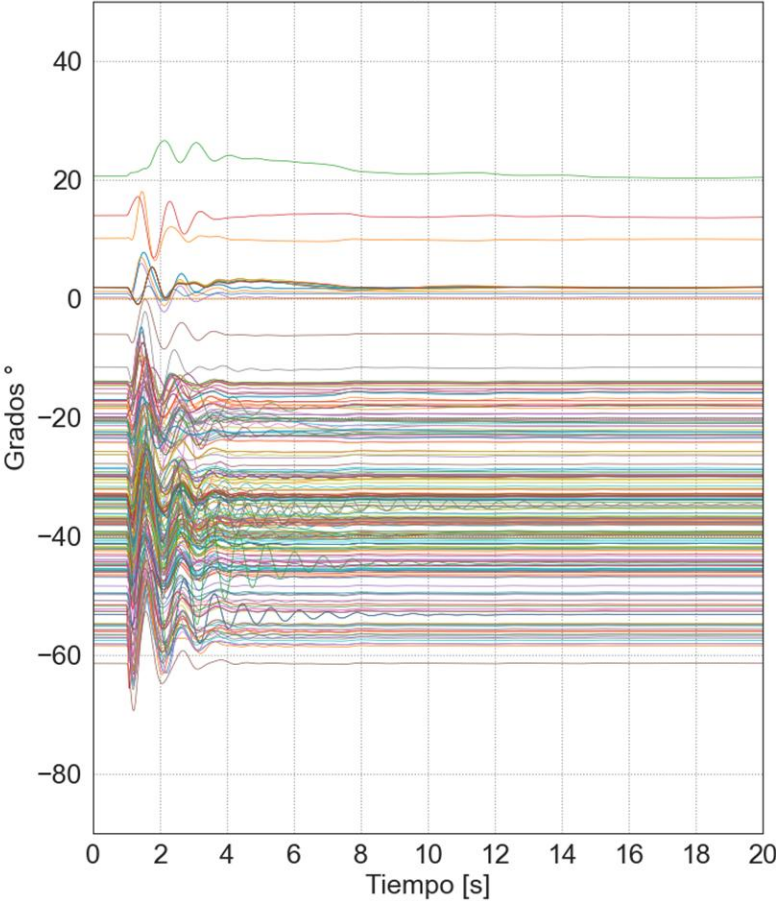
Tensión en barras de 500 kV
cortocircuito en Copey - Cuestecitas 1 500 T2



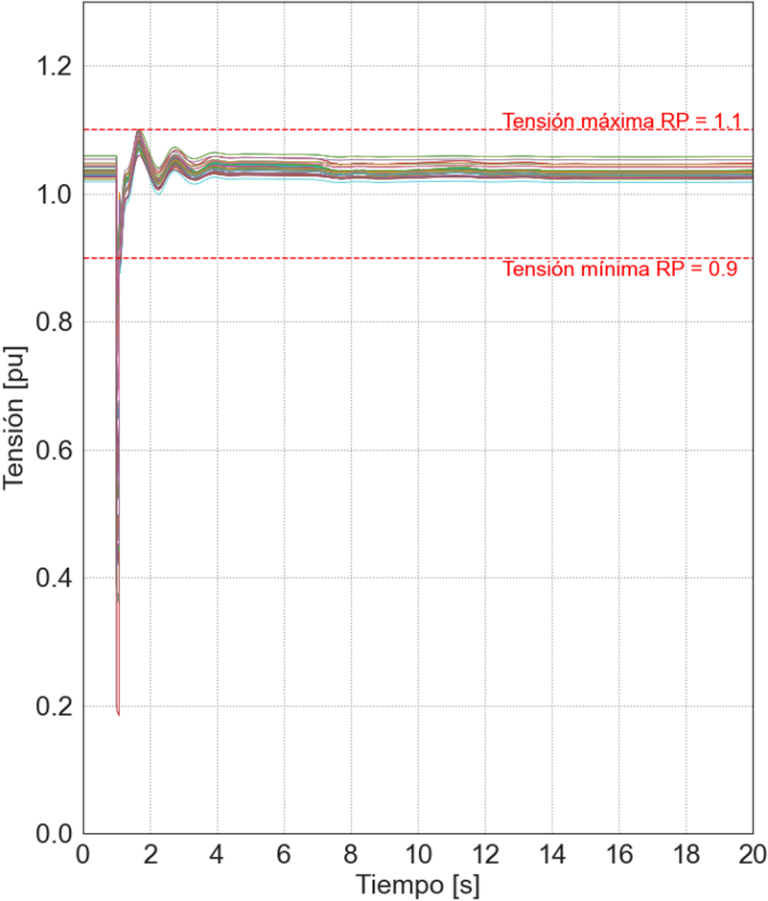
Frecuencia en barras de 500 kV
cortocircuito Copey - Cuestecitas 1 500 T2



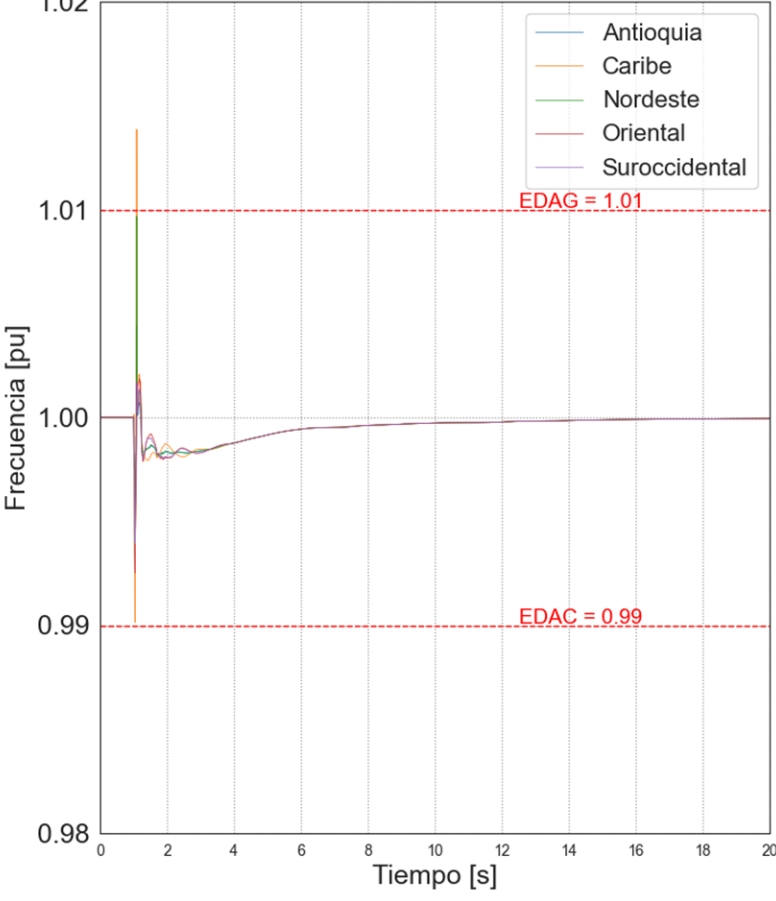
Ángulos de GS
cortocircuito en Copey - Cuestecitas 1 500 T2



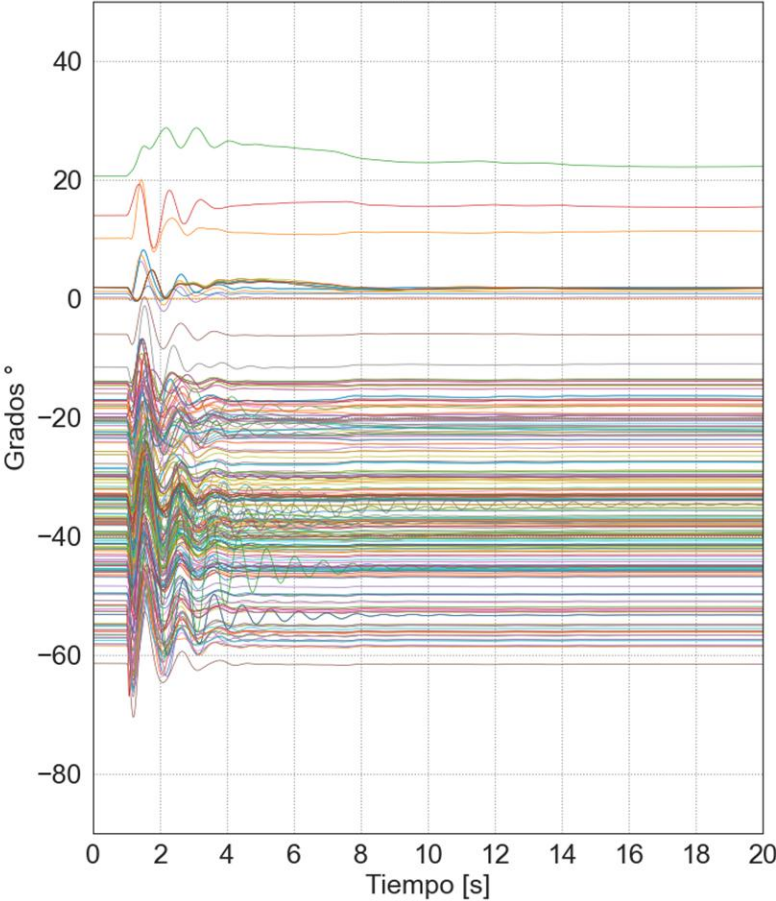
Tensión en barras de 500 kV
cortocircuito en Copey - La Loma 1 500 T2

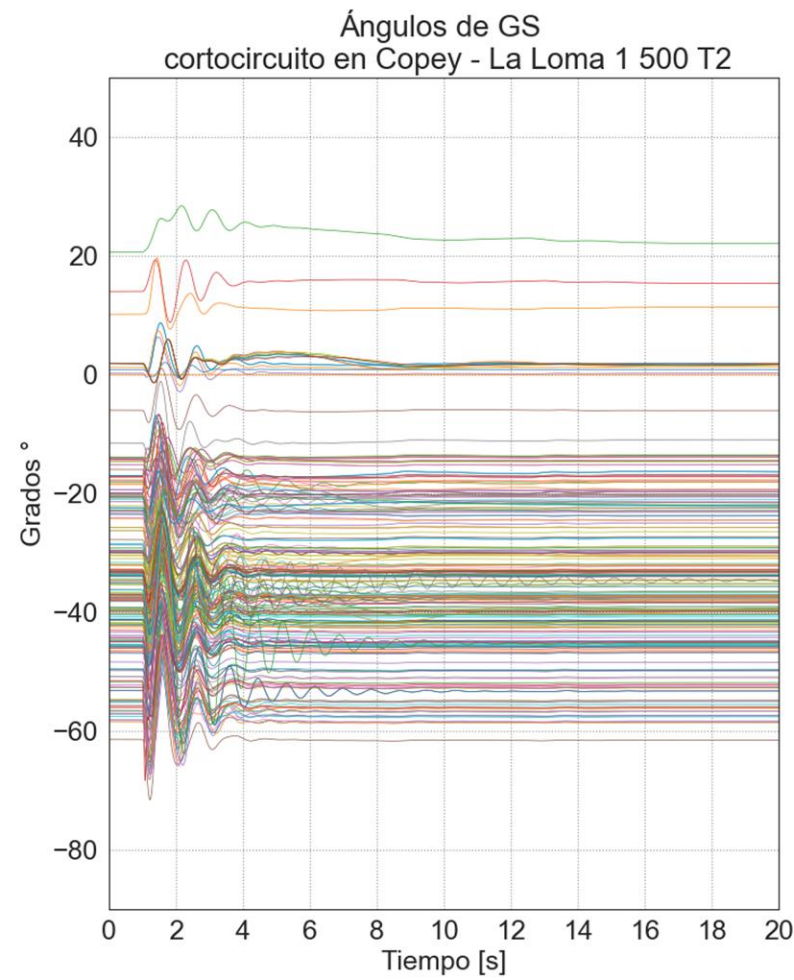
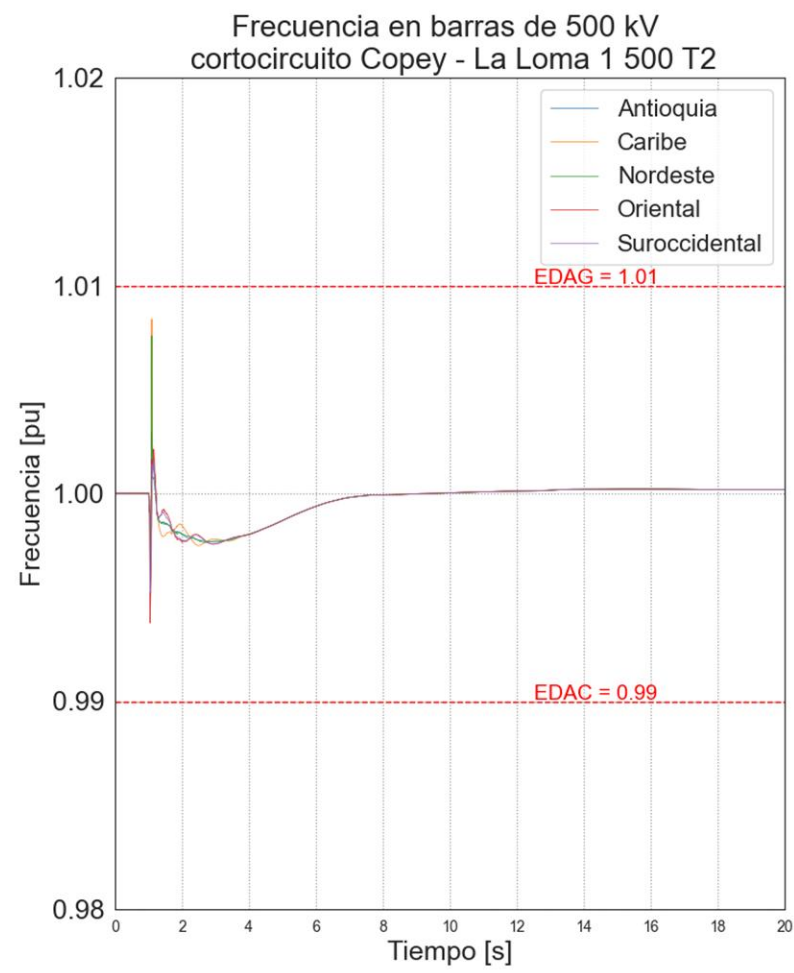
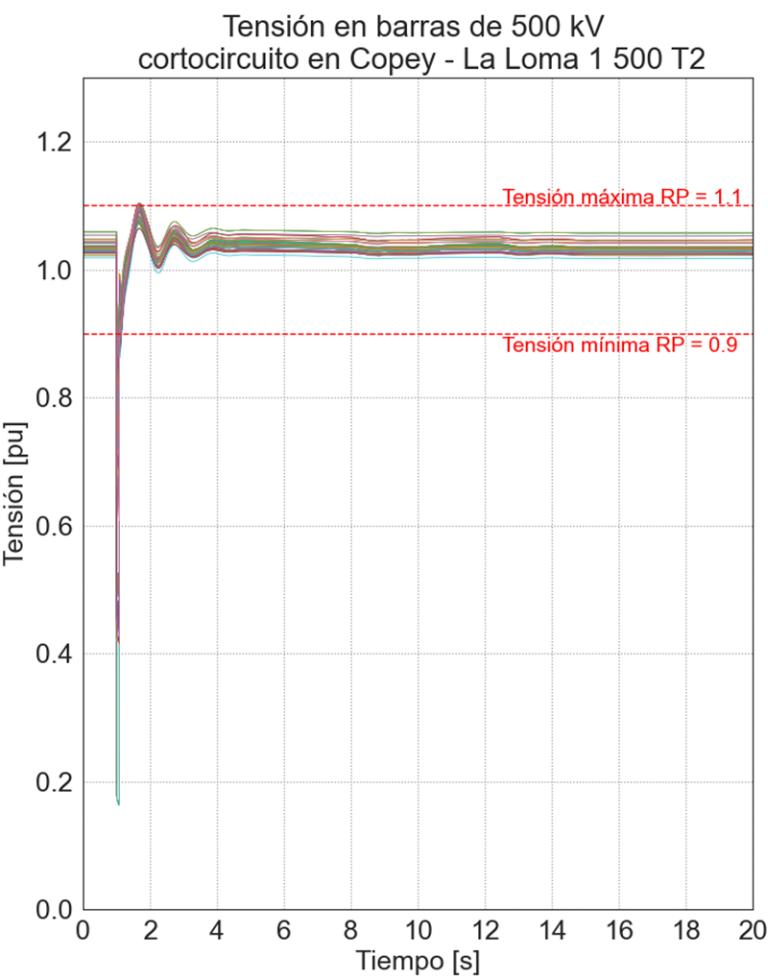


Frecuencia en barras de 500 kV
cortocircuito Copey - La Loma 1 500 T2

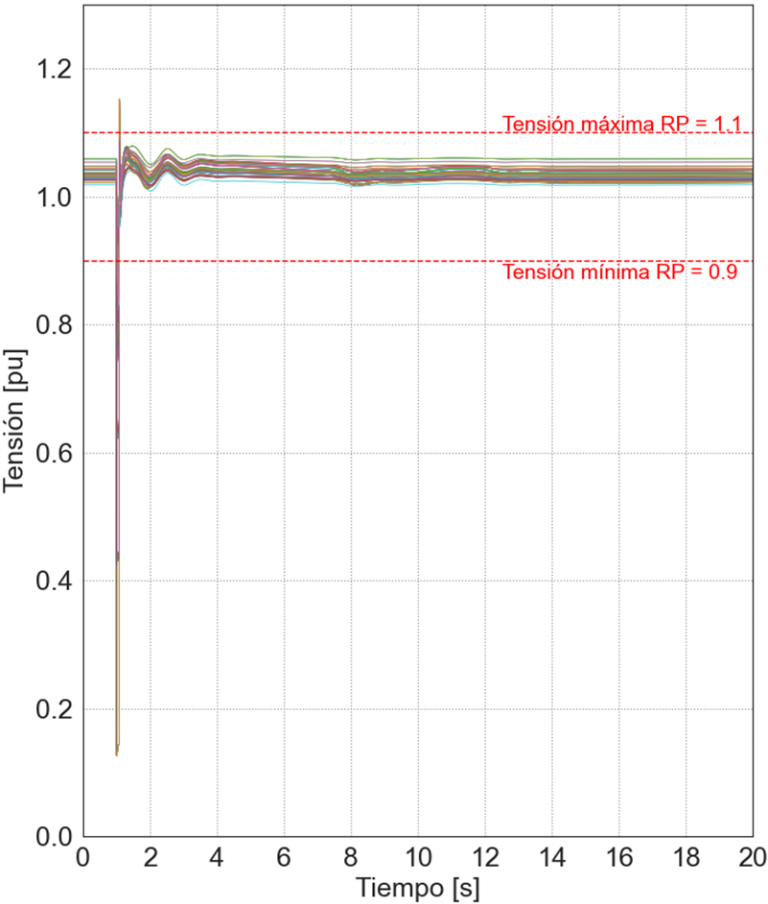


Ángulos de GS
cortocircuito en Copey - La Loma 1 500 T2

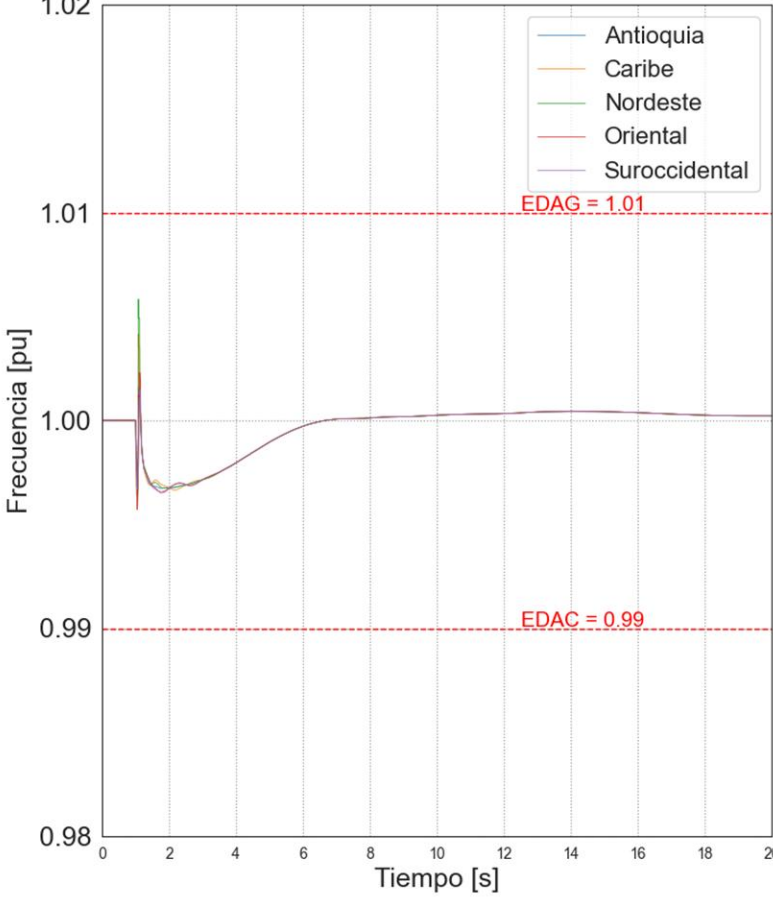




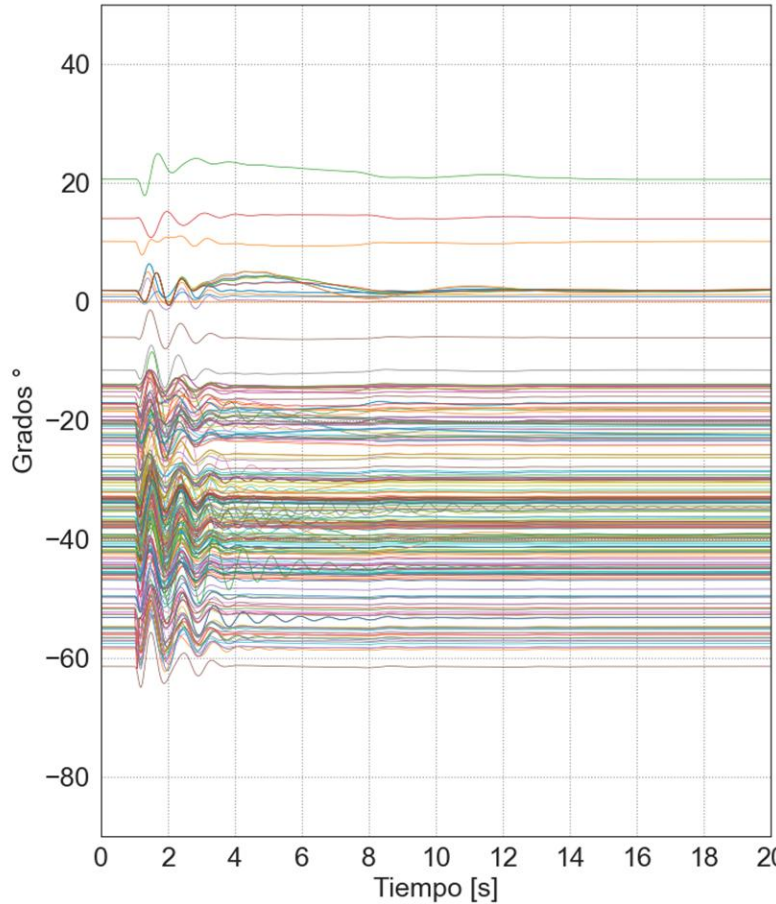
Tensión en barras de 500 kV
cortocircuito en Cuestecitas - Colectora1 1 500 T2

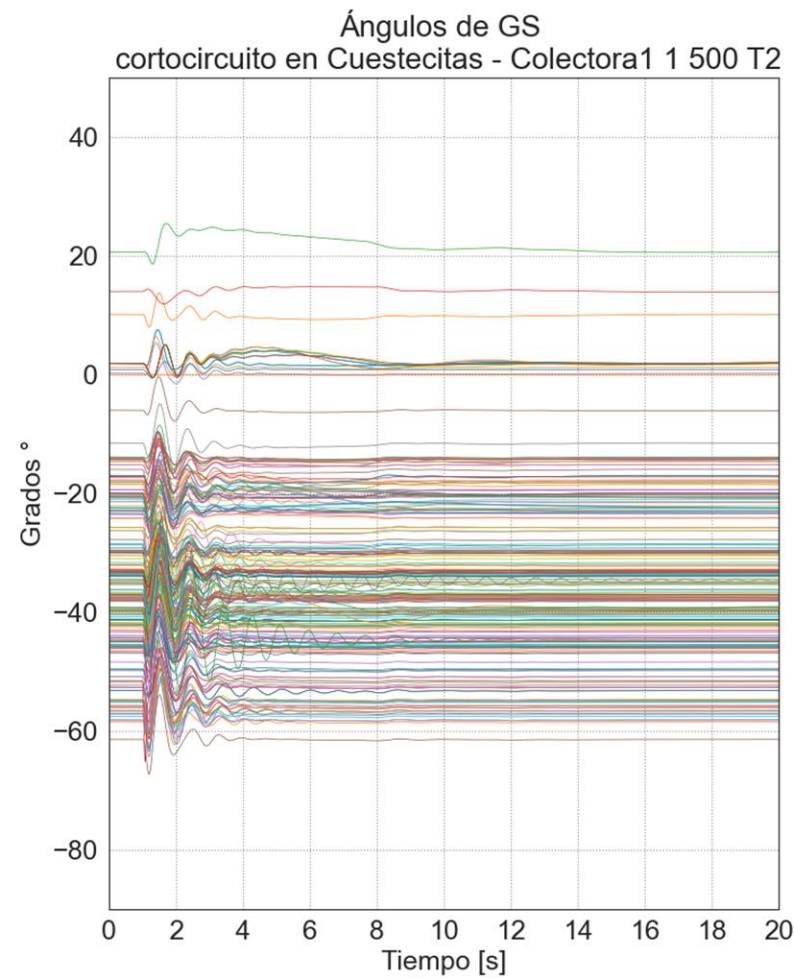
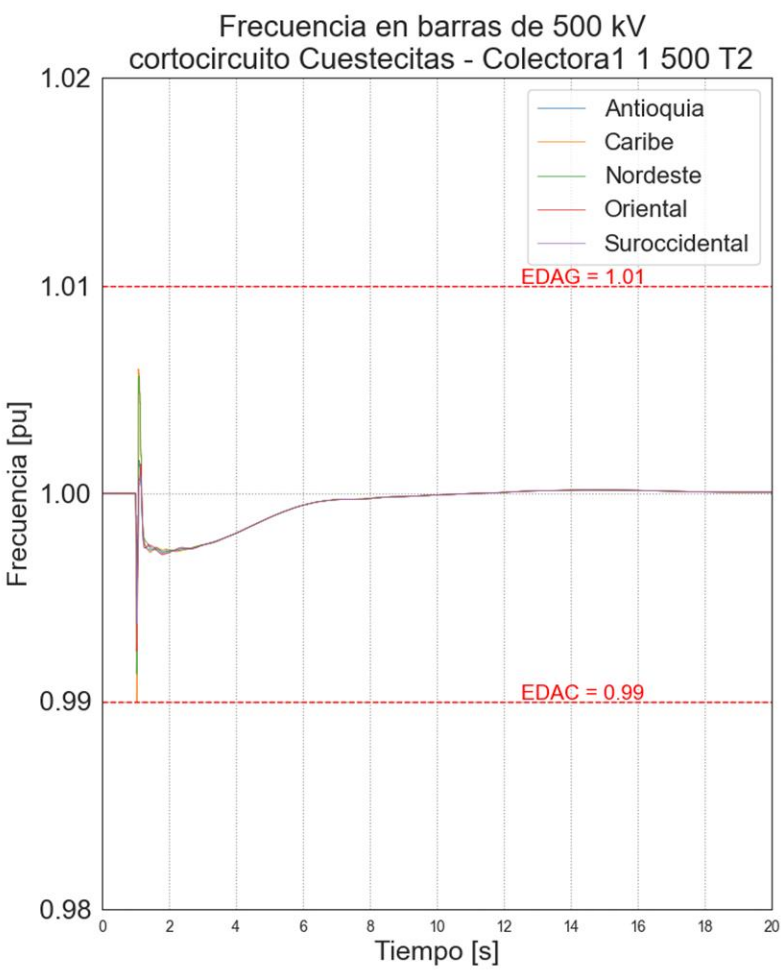
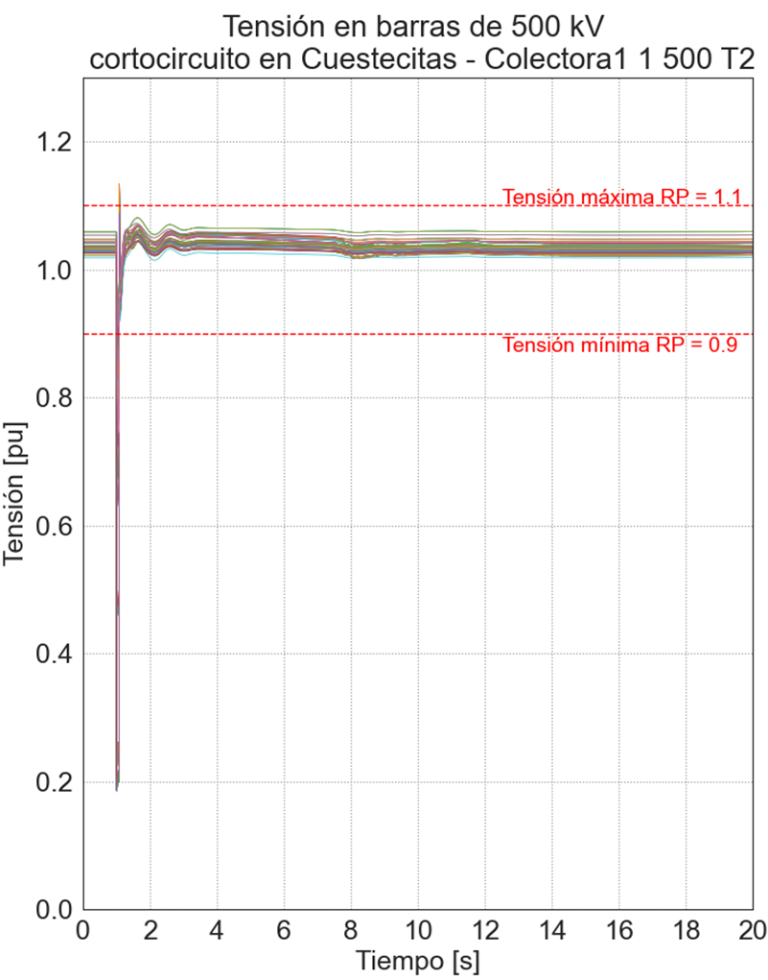


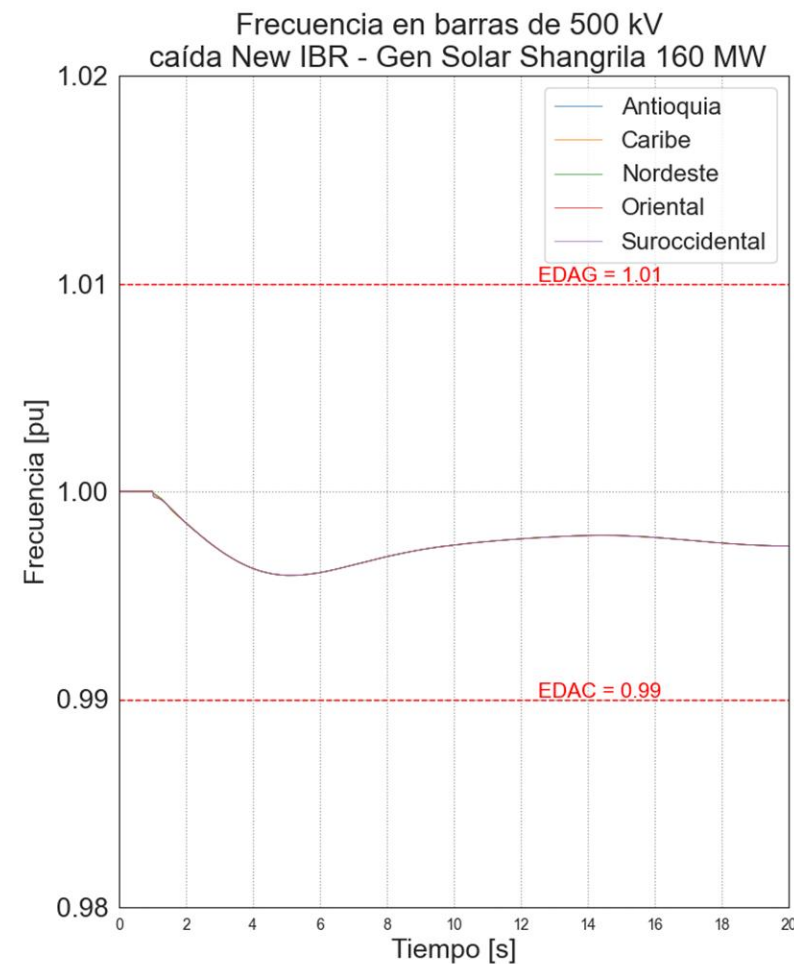
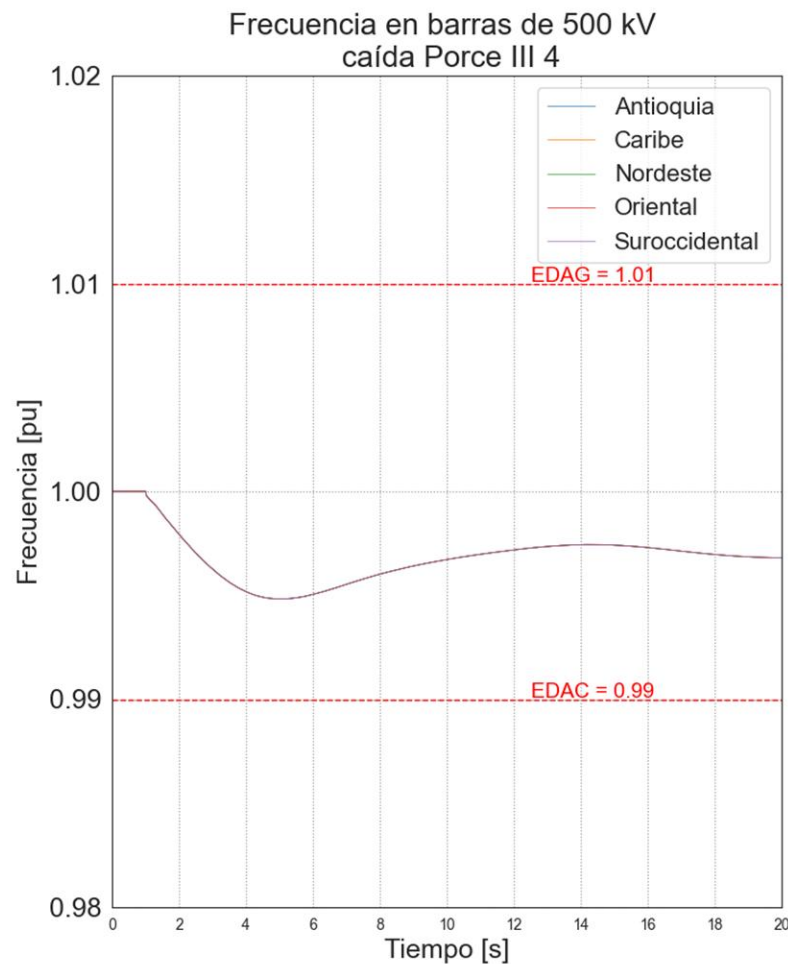
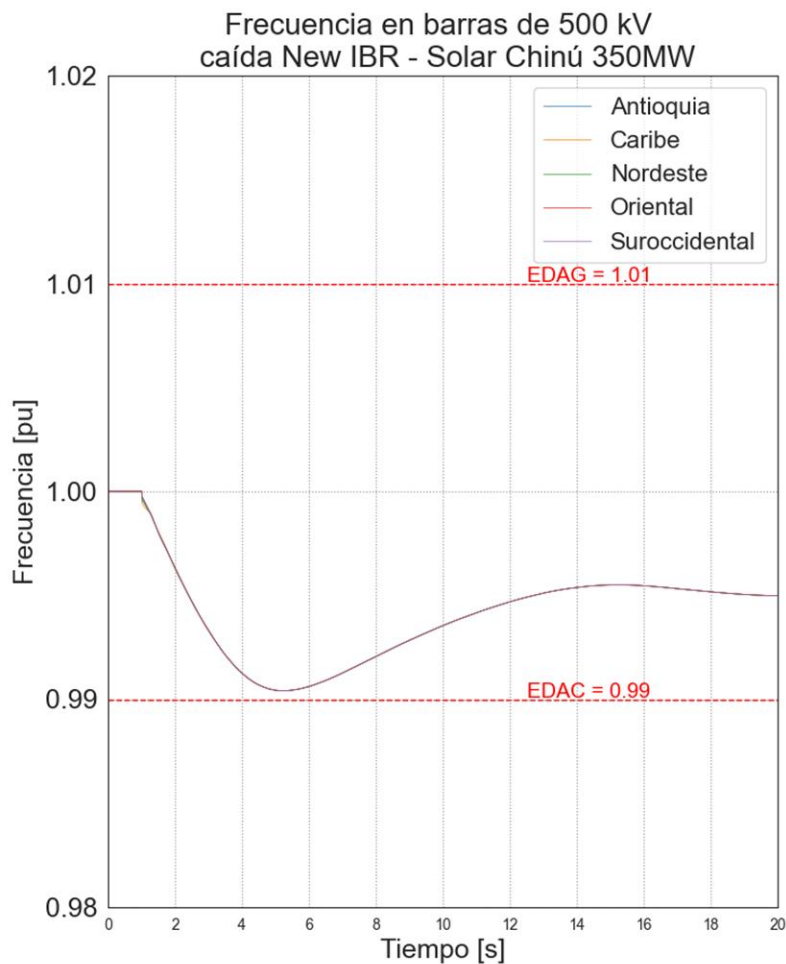
Frecuencia en barras de 500 kV
cortocircuito Cuestecitas - Colectora1 1 500 T2

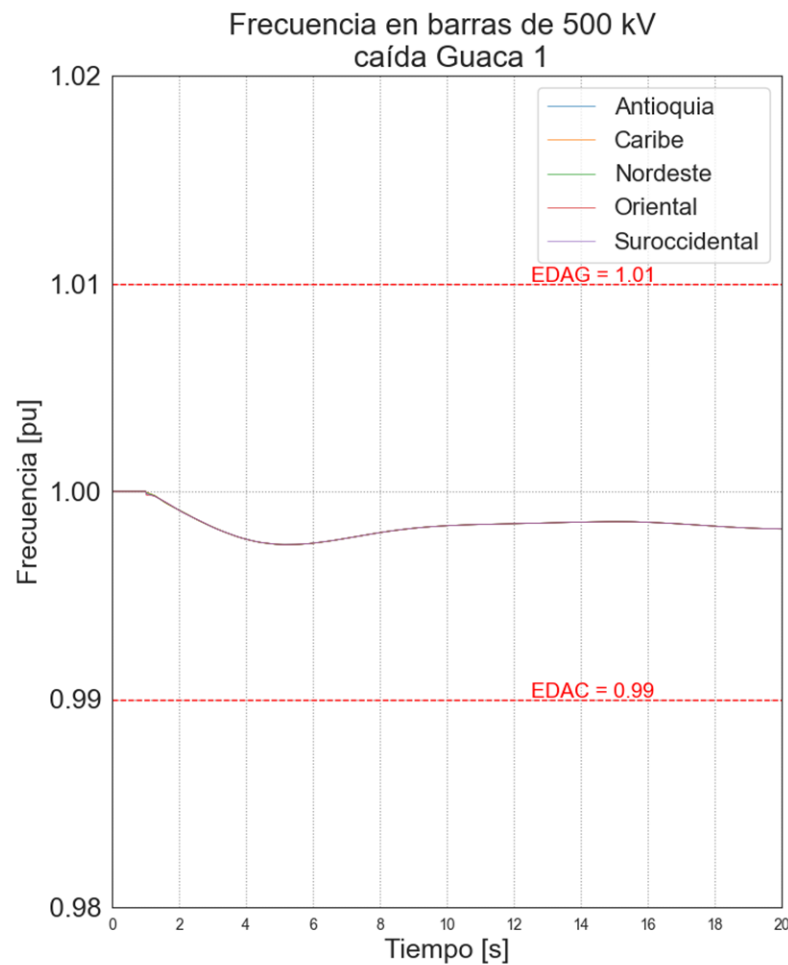
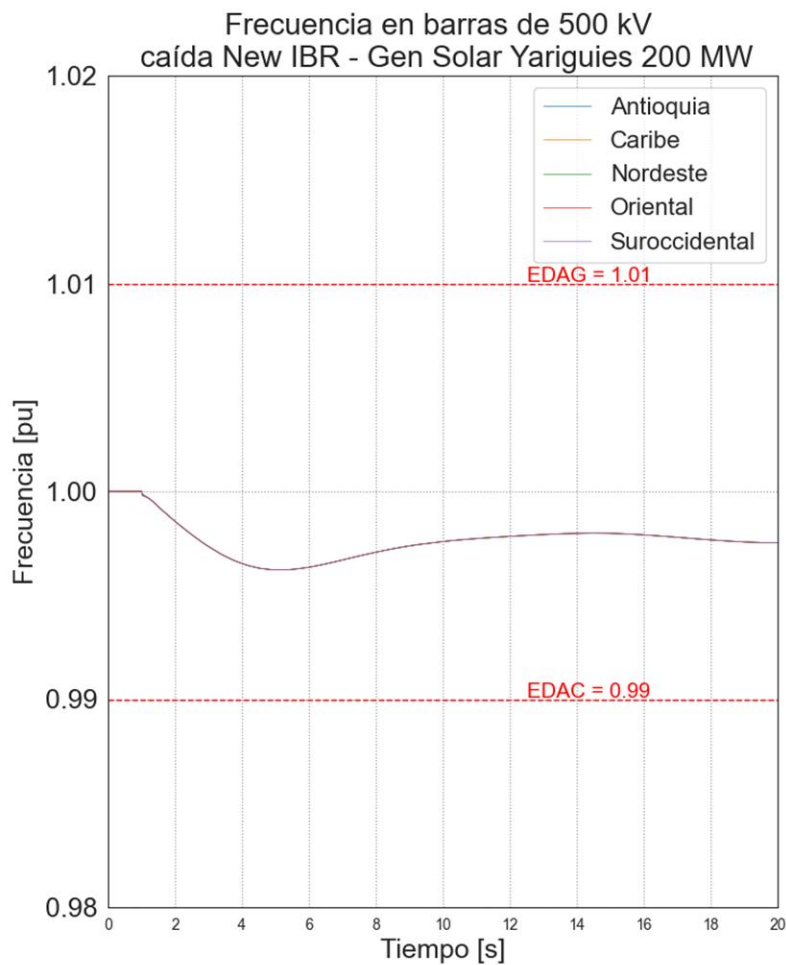


Ángulos de GS
cortocircuito en Cuestecitas - Colectora1 1 500 T2



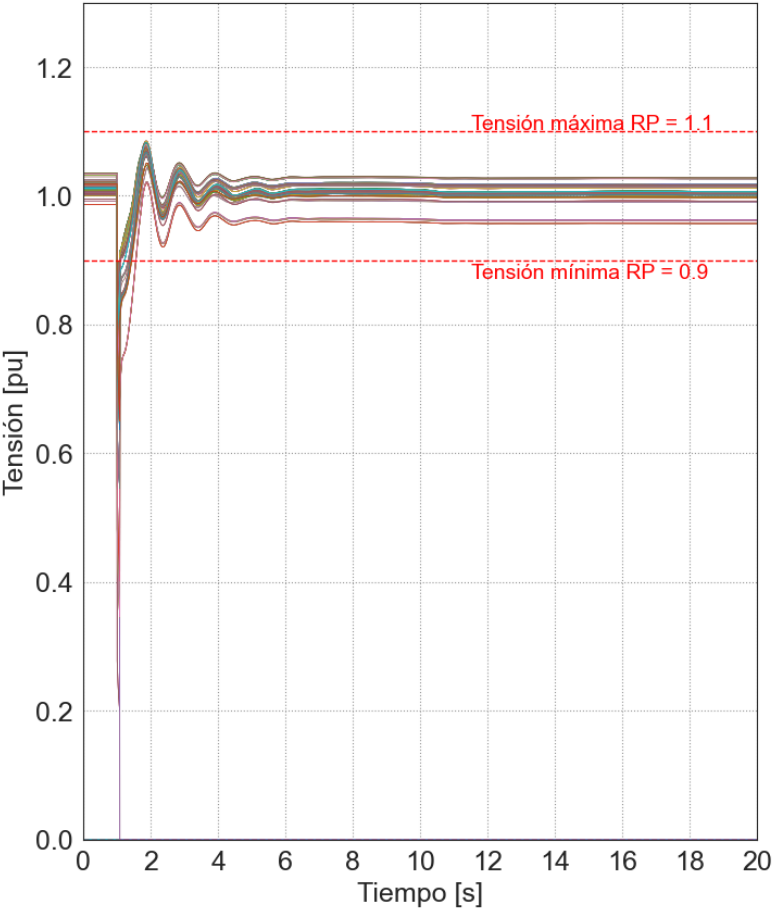




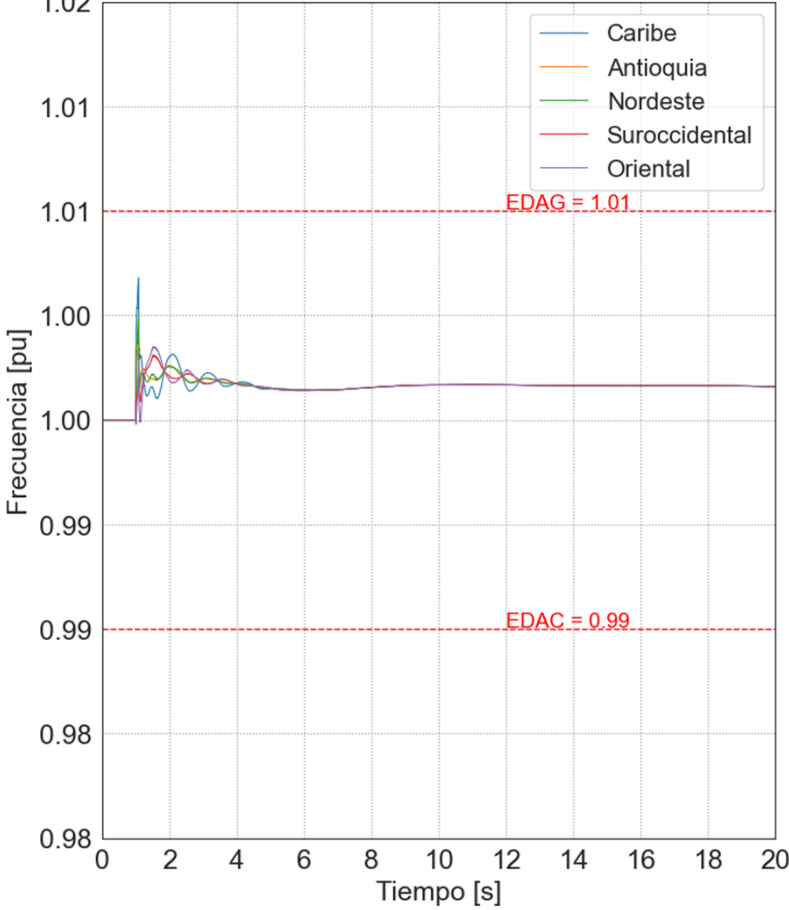


Resultados demanda neta mínima 2028

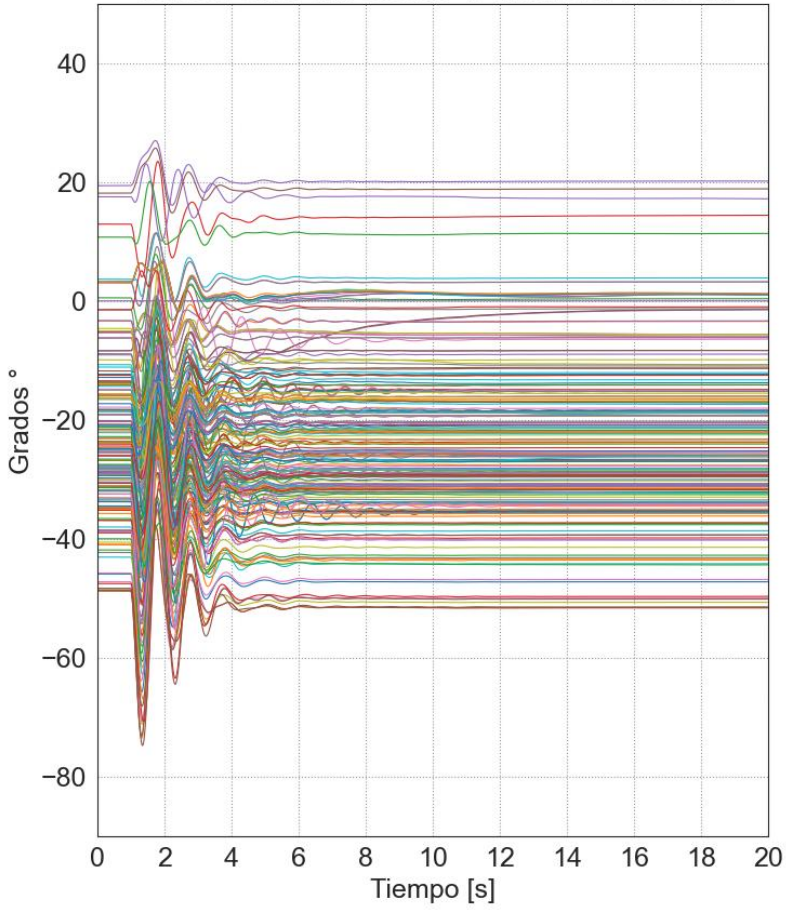
Tensión en barras de 500 kV
cortocircuito en Bacata - Primavera 1 500 T2

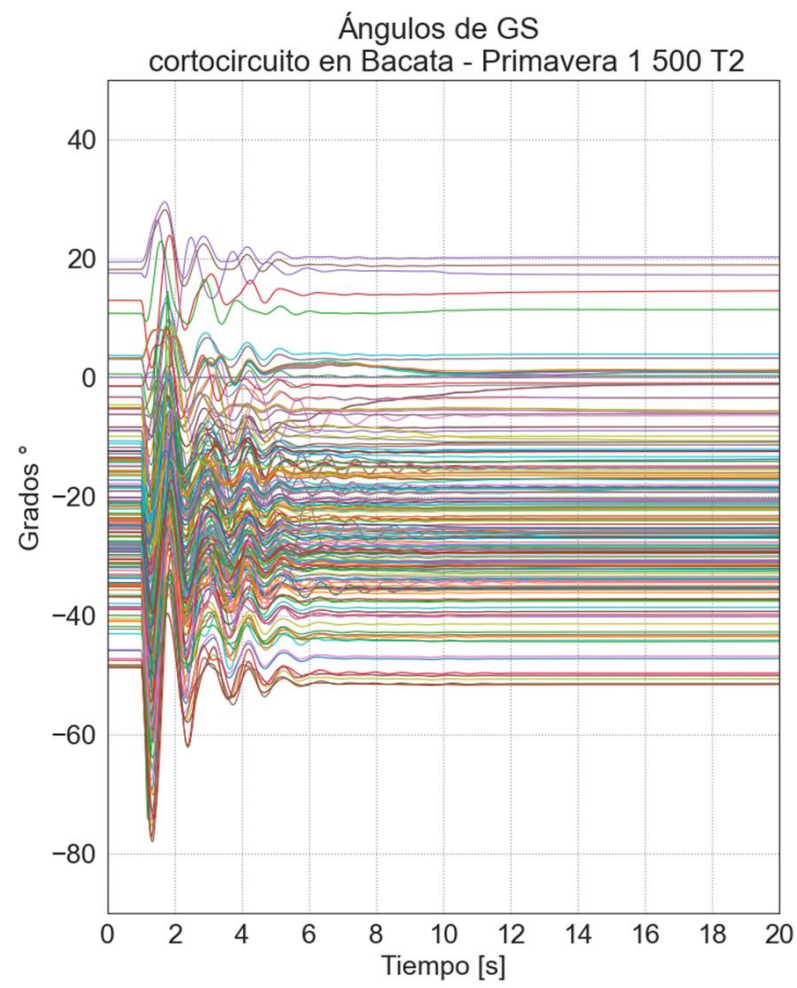
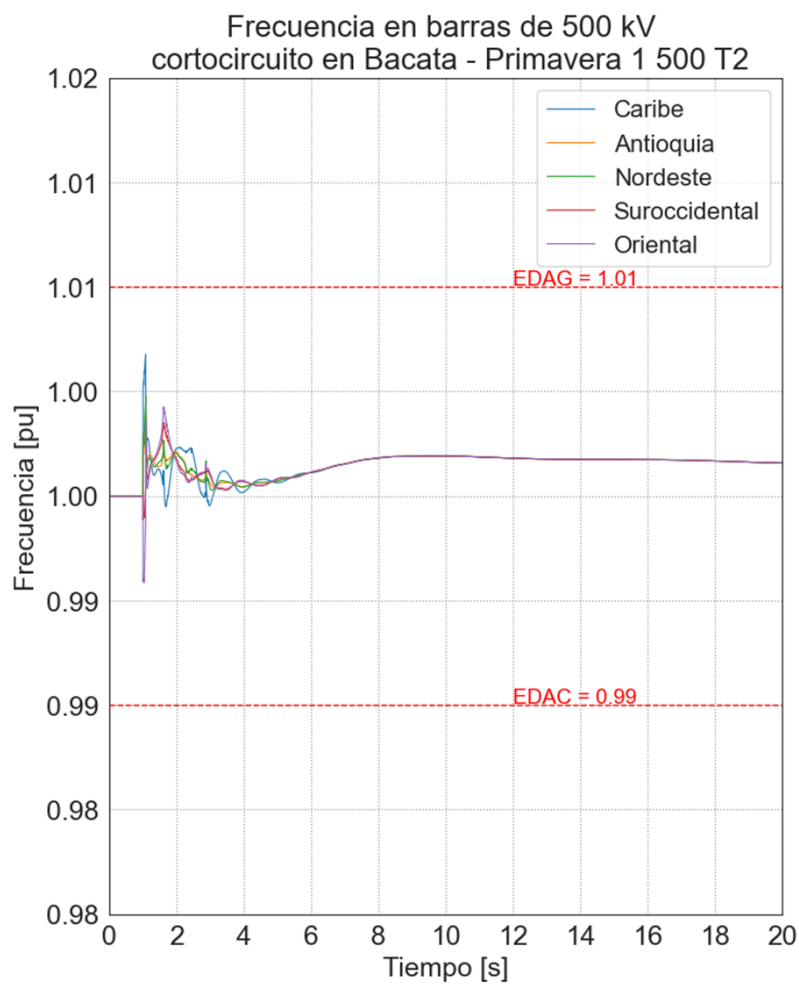
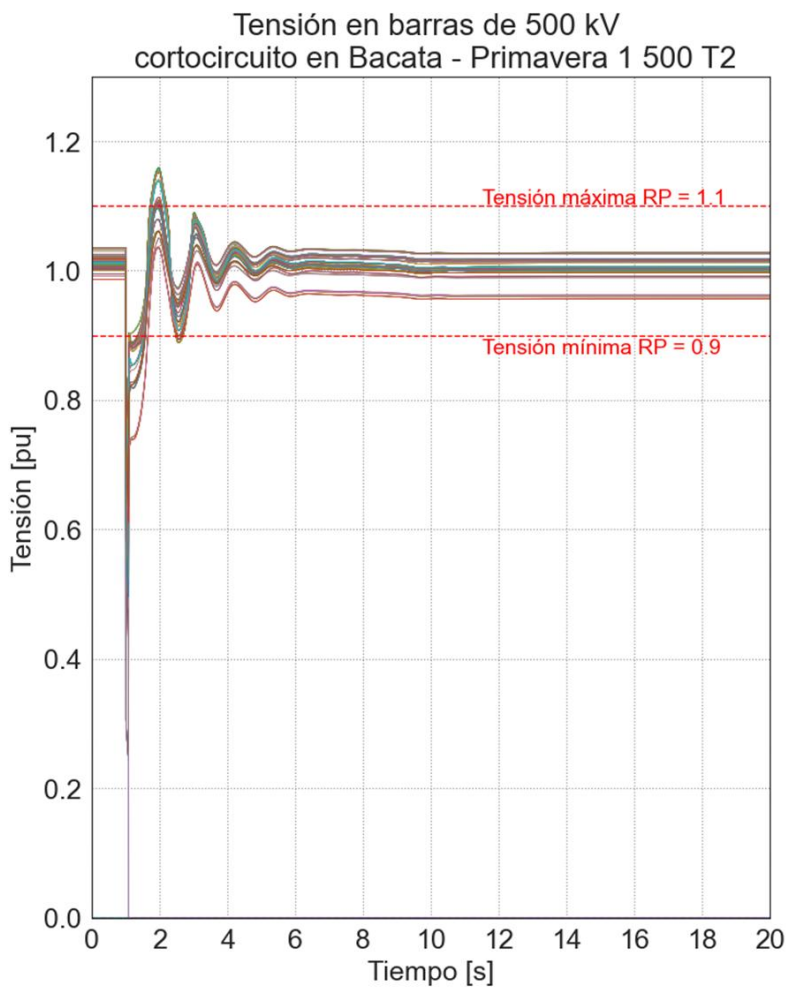


Frecuencia en barras de 500 kV
cortocircuito en Bacata - Primavera 1 500 T2

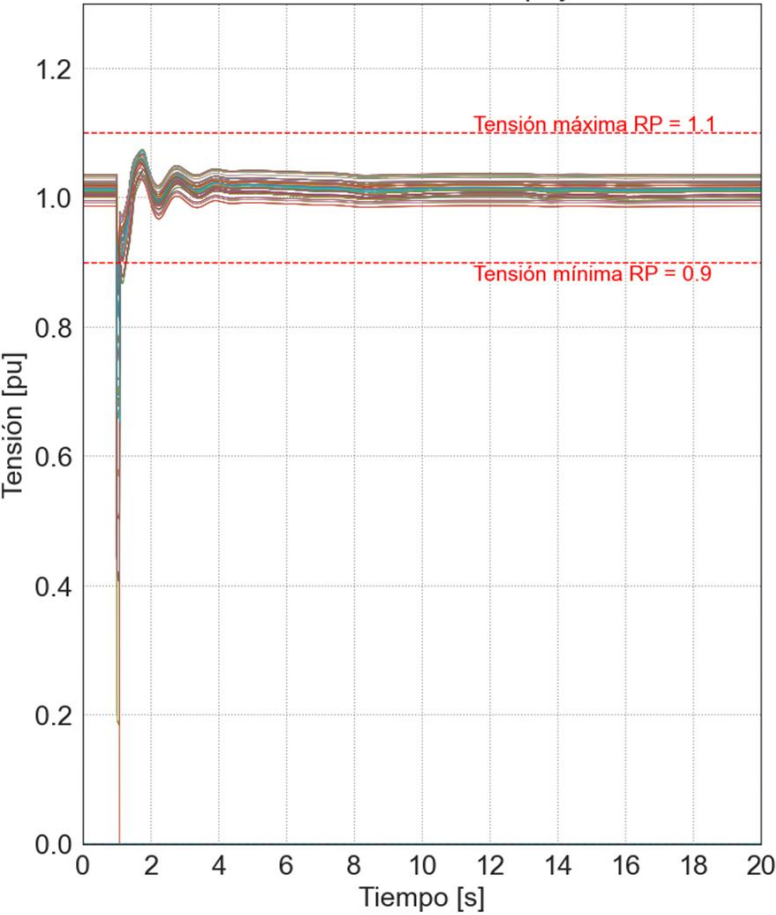


Ángulos de GS
cortocircuito en Bacata - Primavera 1 500 T2

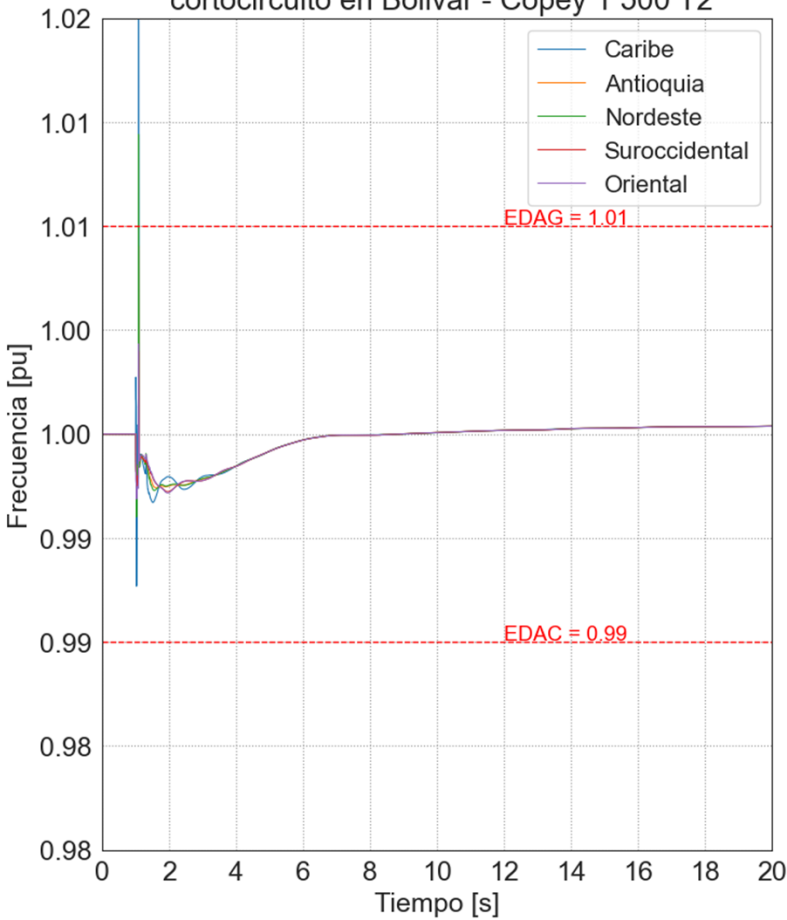




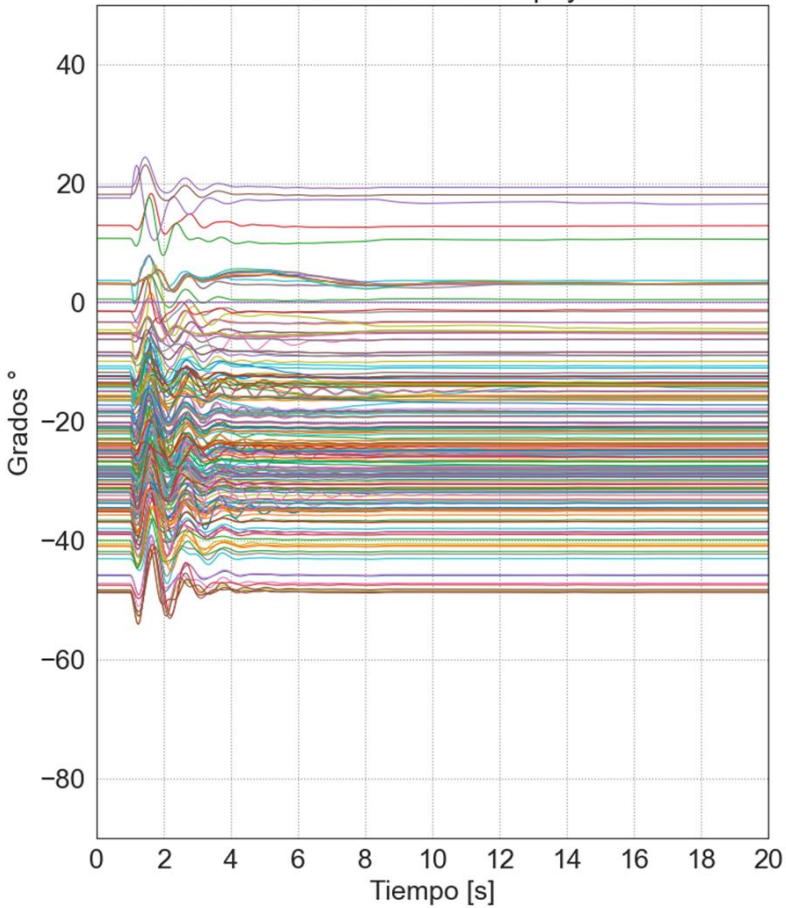
Tensión en barras de 500 kV
cortocircuito en Bolivar - Copey 1 500 T2



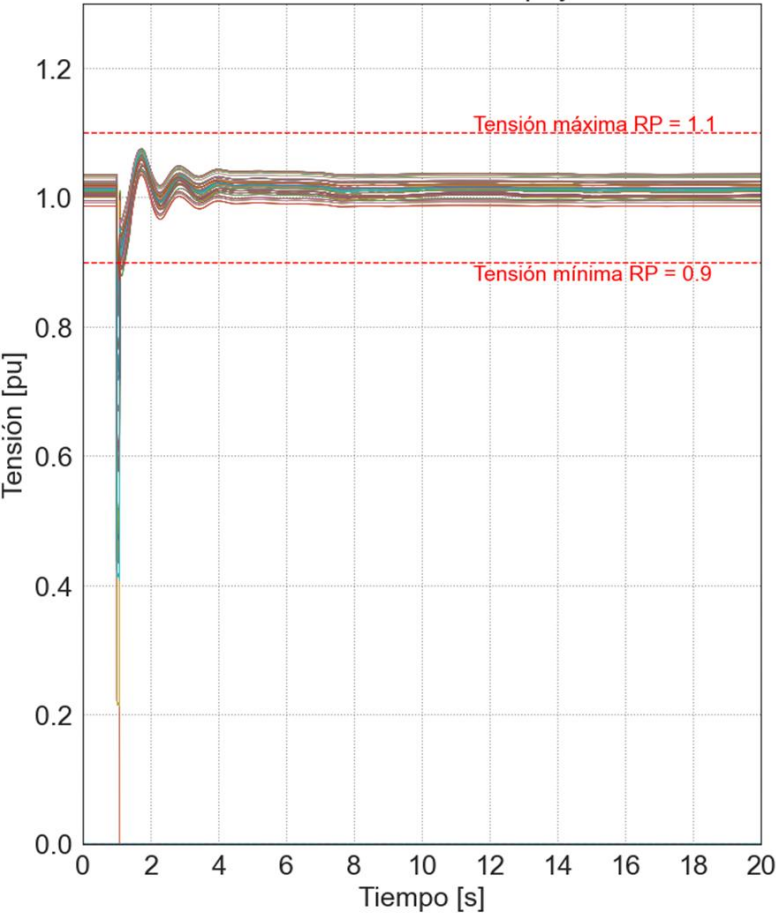
Frecuencia en barras de 500 kV
cortocircuito en Bolivar - Copey 1 500 T2



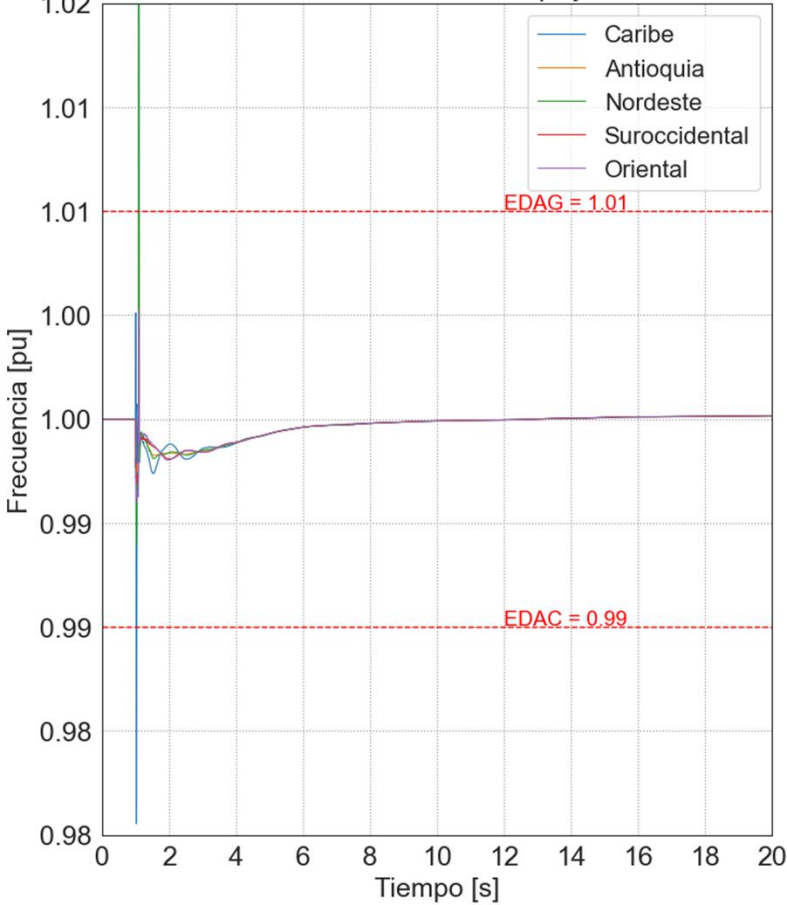
Ángulos de GS
cortocircuito en Bolivar - Copey 1 500 T2



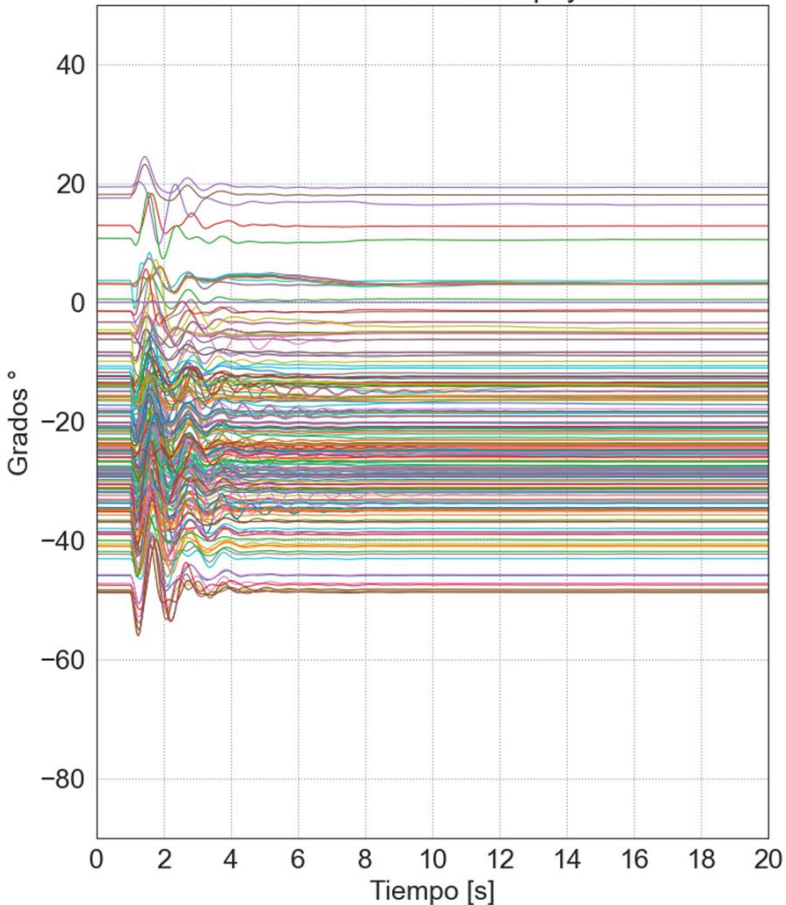
Tensión en barras de 500 kV
cortocircuito en Bolivar - Copey 1 500 T2



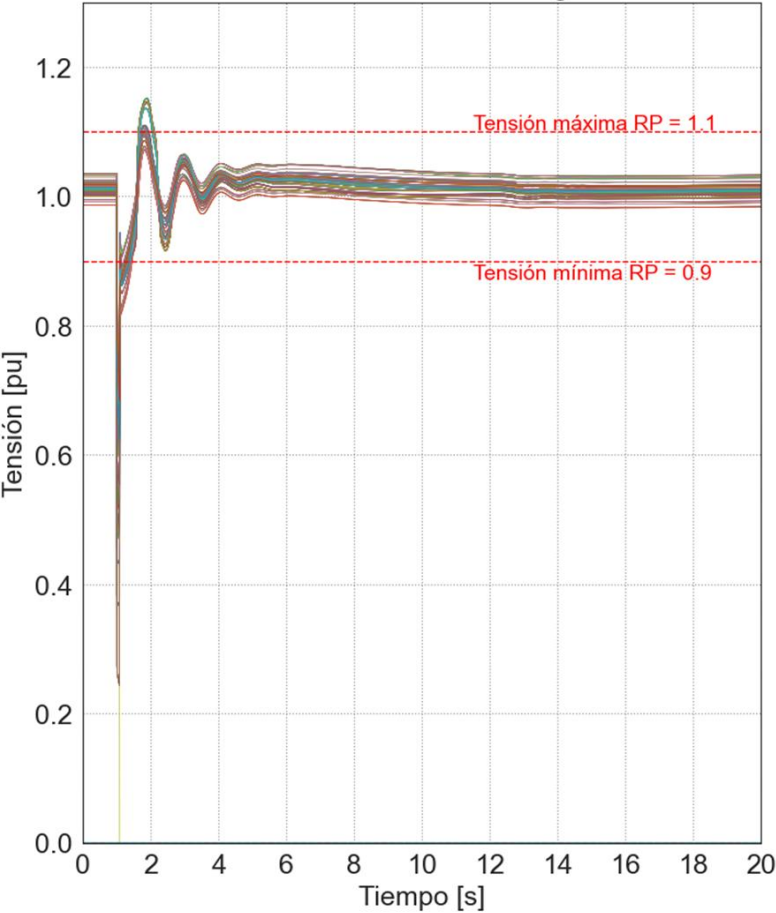
Frecuencia en barras de 500 kV
cortocircuito en Bolivar - Copey 1 500 T2



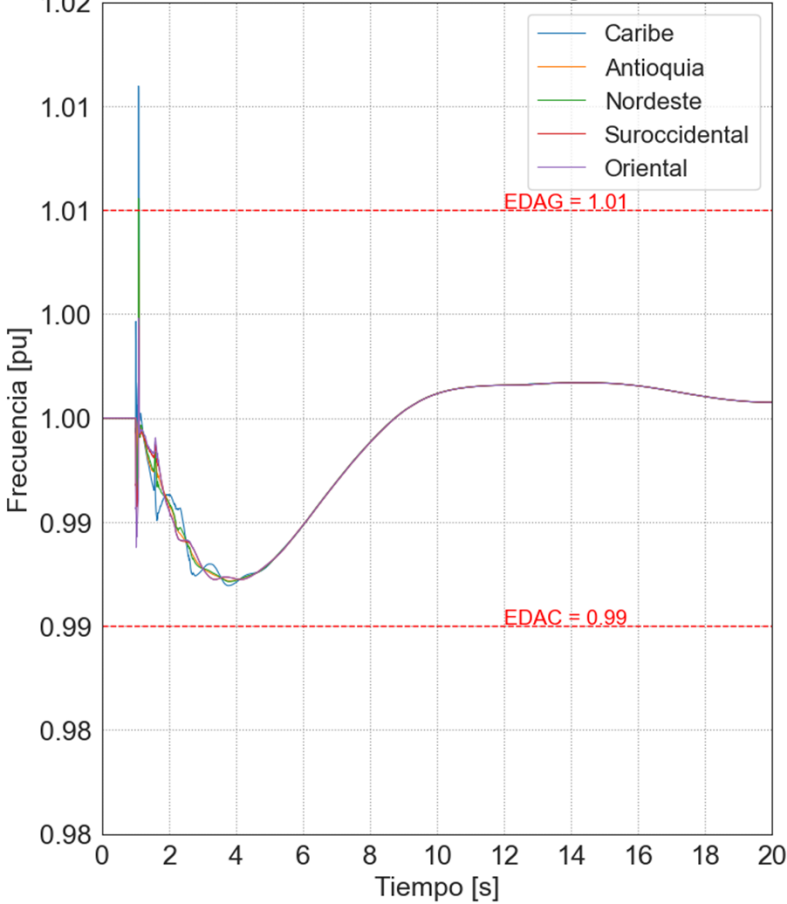
Ángulos de GS
cortocircuito en Bolivar - Copey 1 500 T2



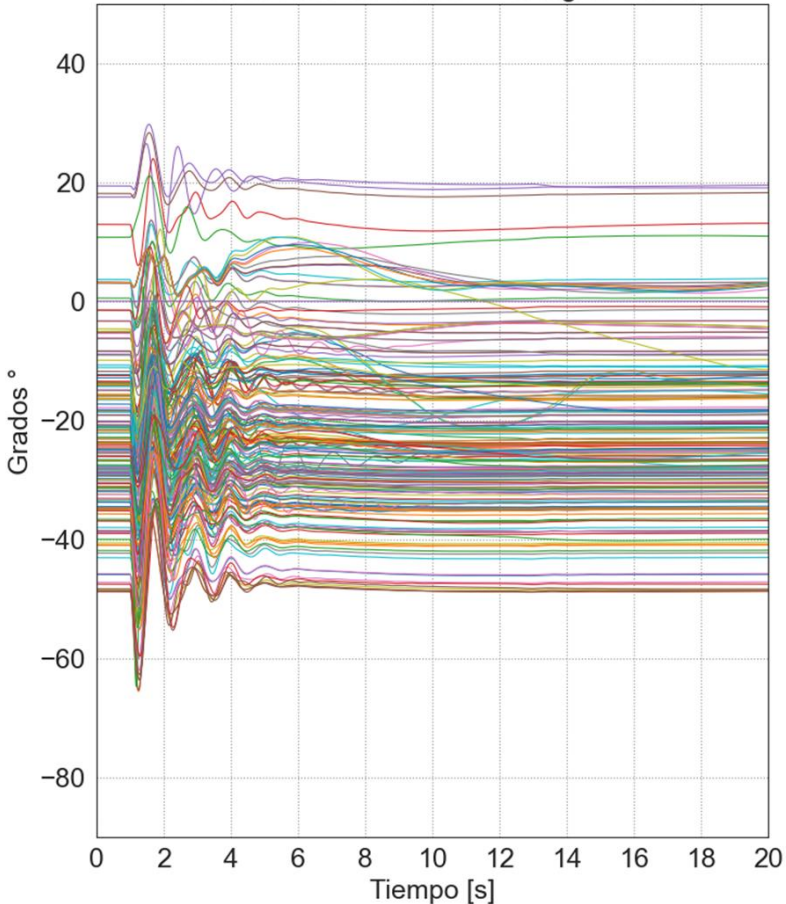
Tensión en barras de 500 kV
cortocircuito en Cerro - Sahagun 1 500



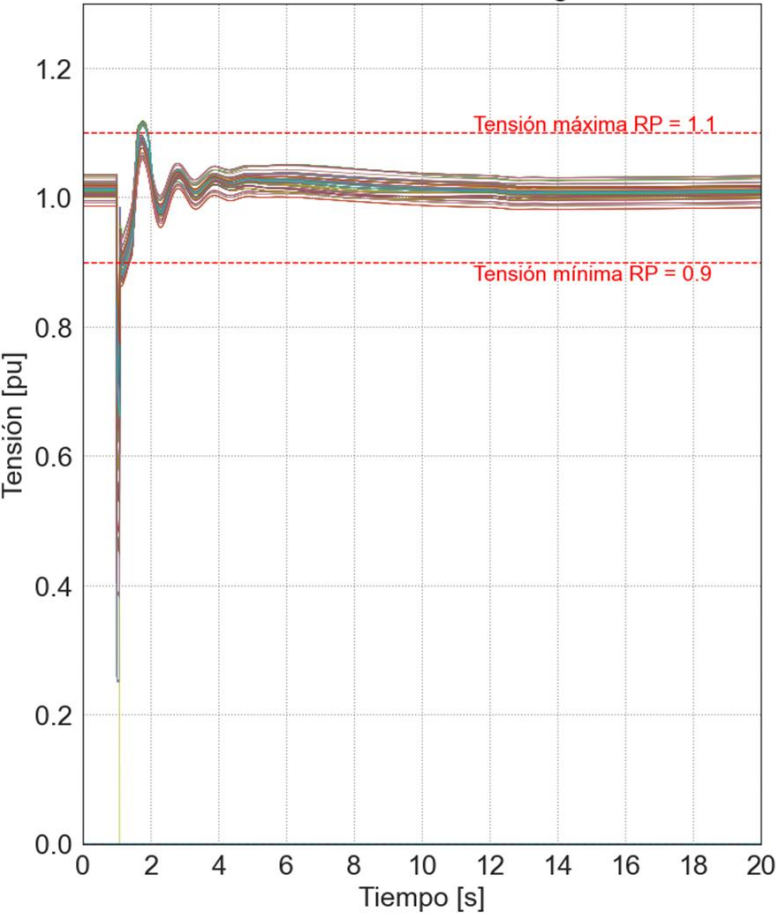
Frecuencia en barras de 500 kV
cortocircuito en Cerro - Sahagun 1 500



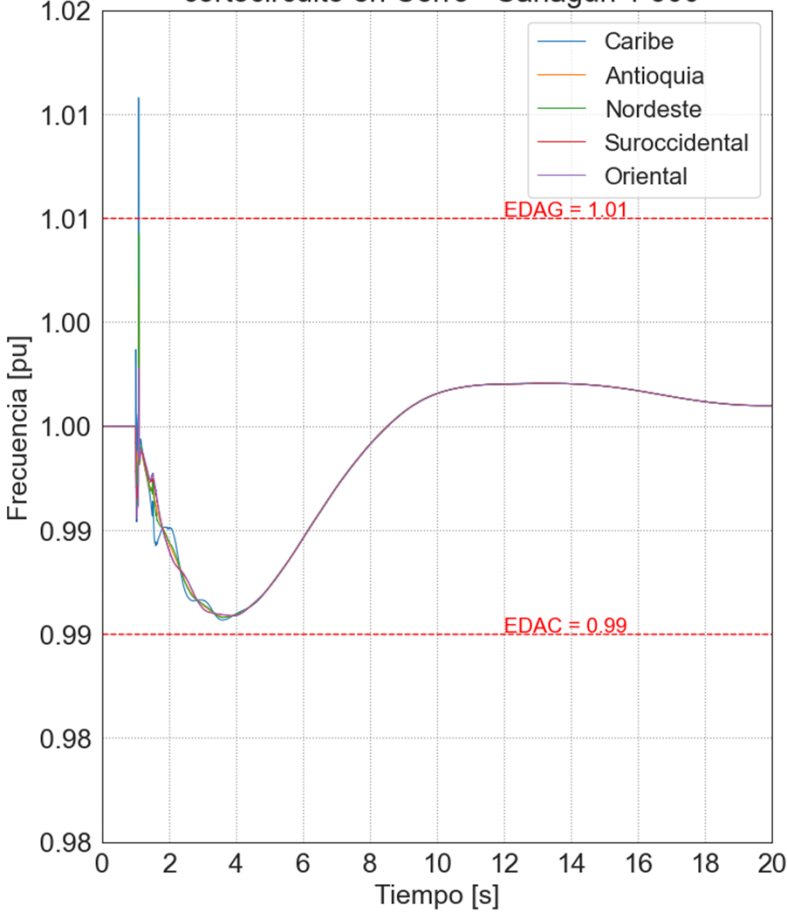
Ángulos de GS
cortocircuito en Cerro - Sahagun 1 500



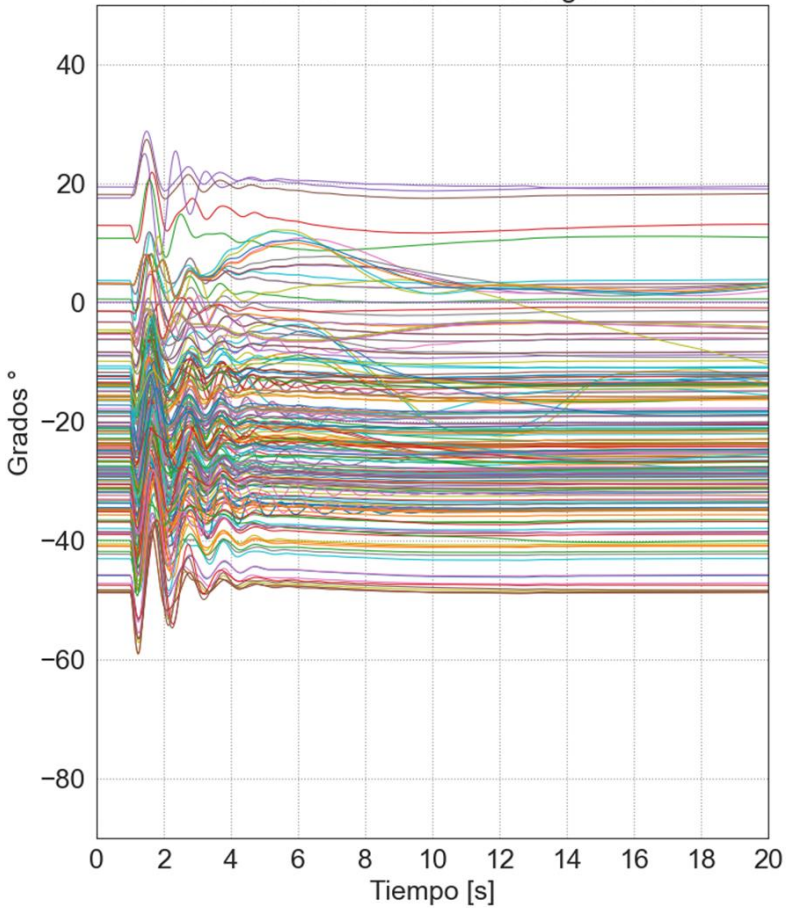
Tensión en barras de 500 kV
cortocircuito en Cerro - Sahagun 1 500

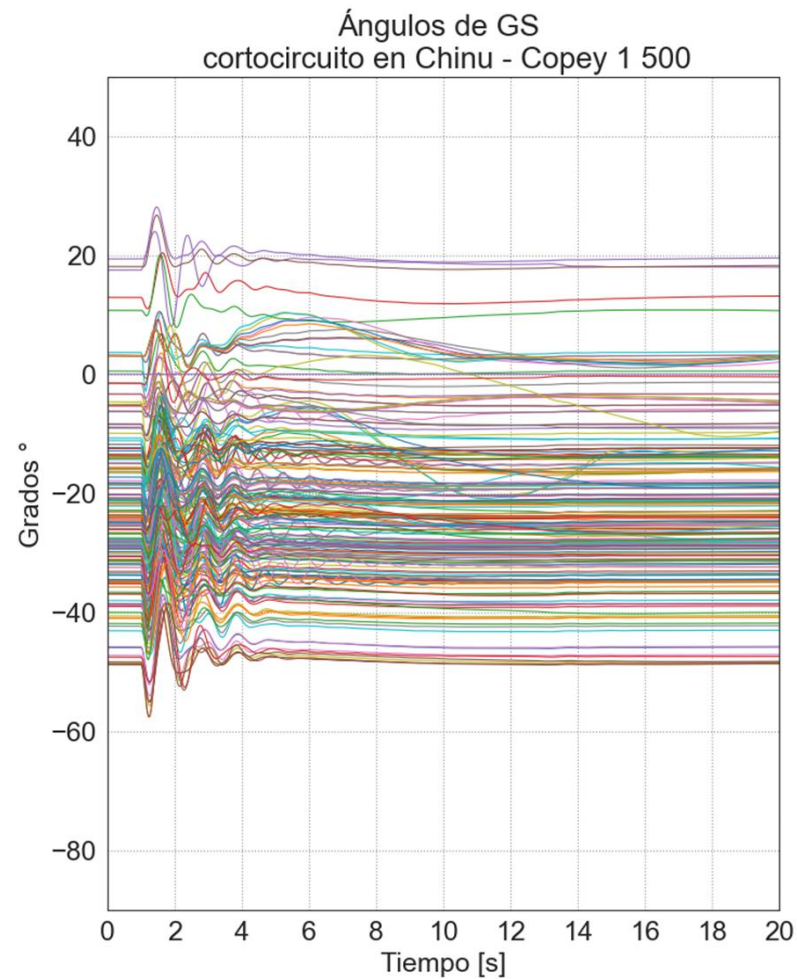
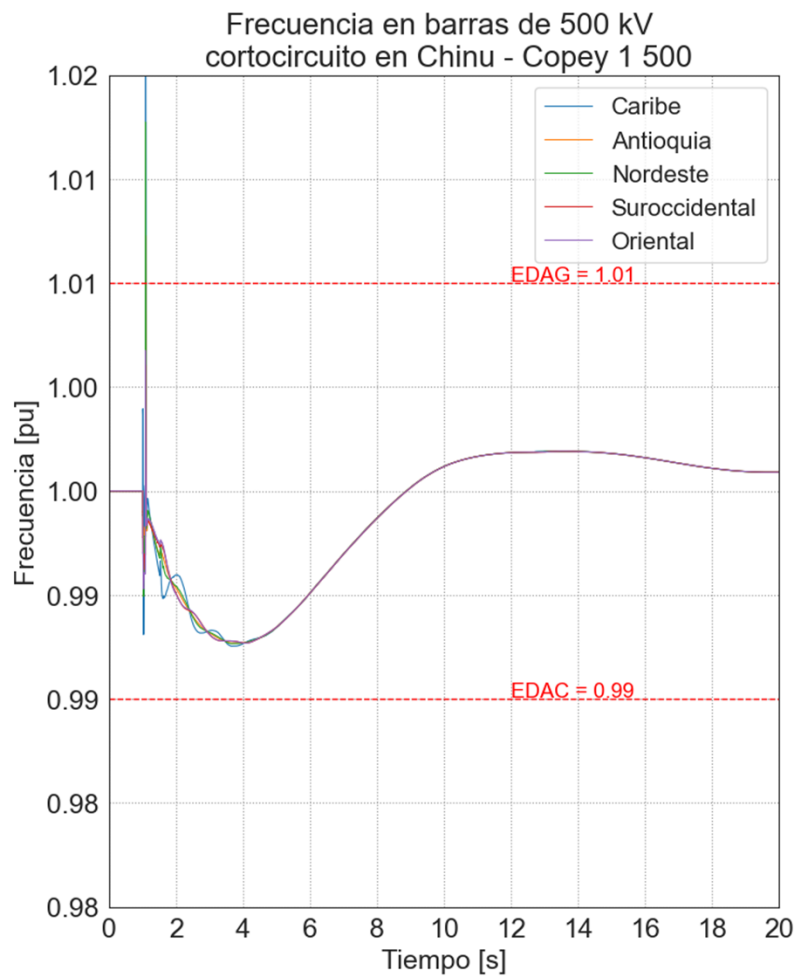
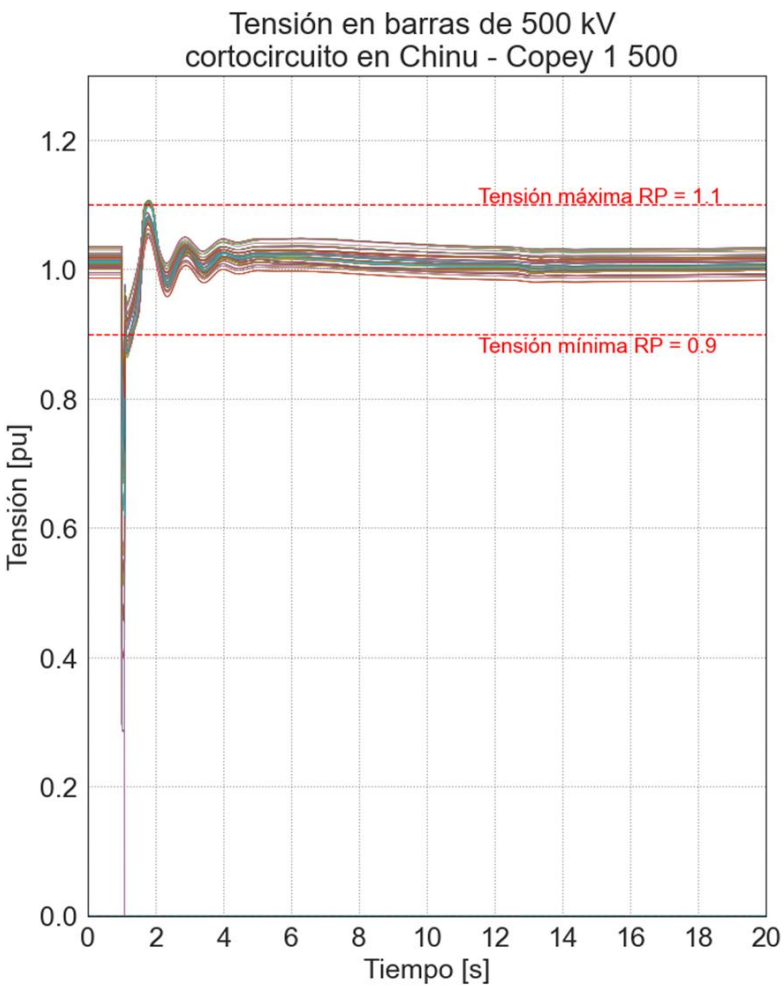


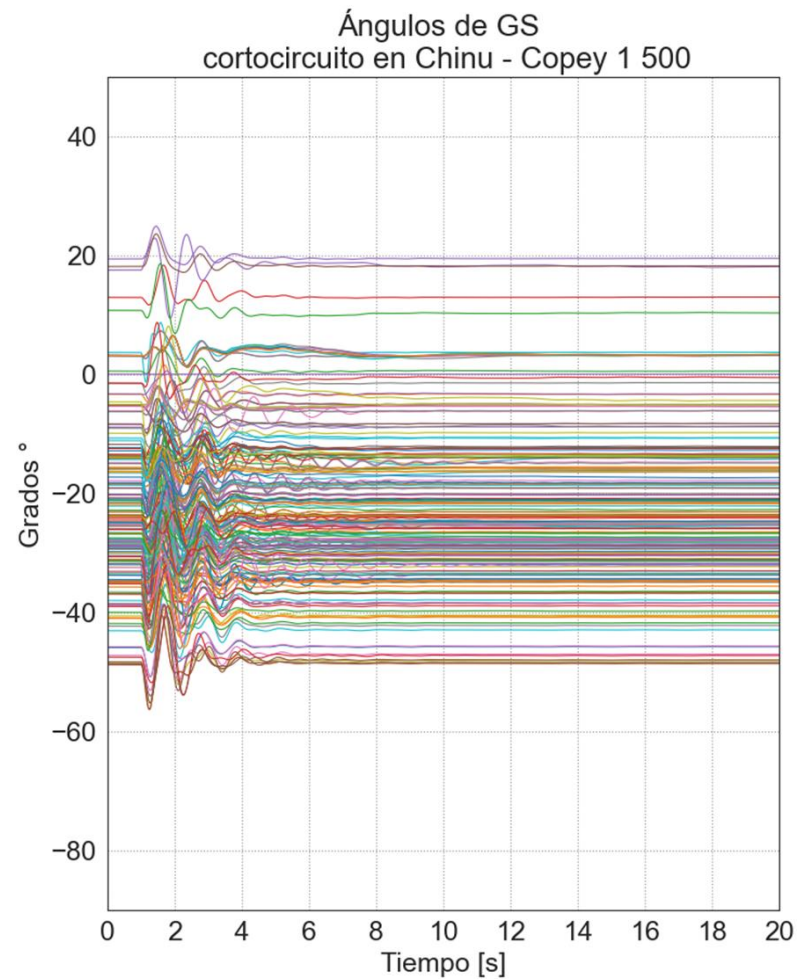
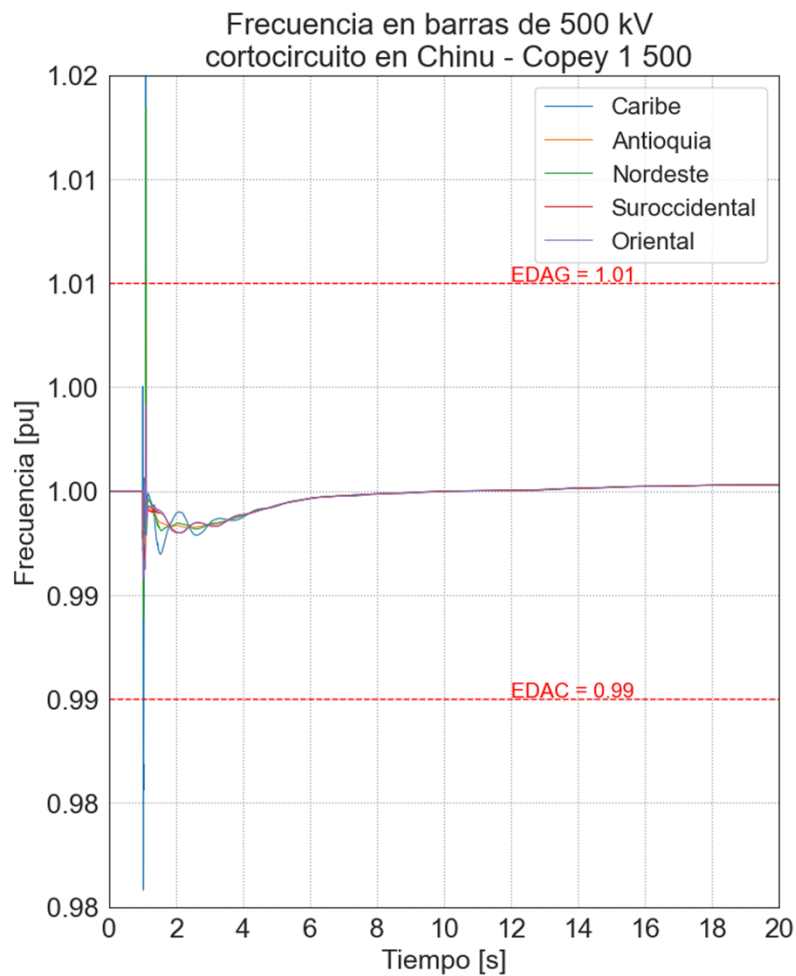
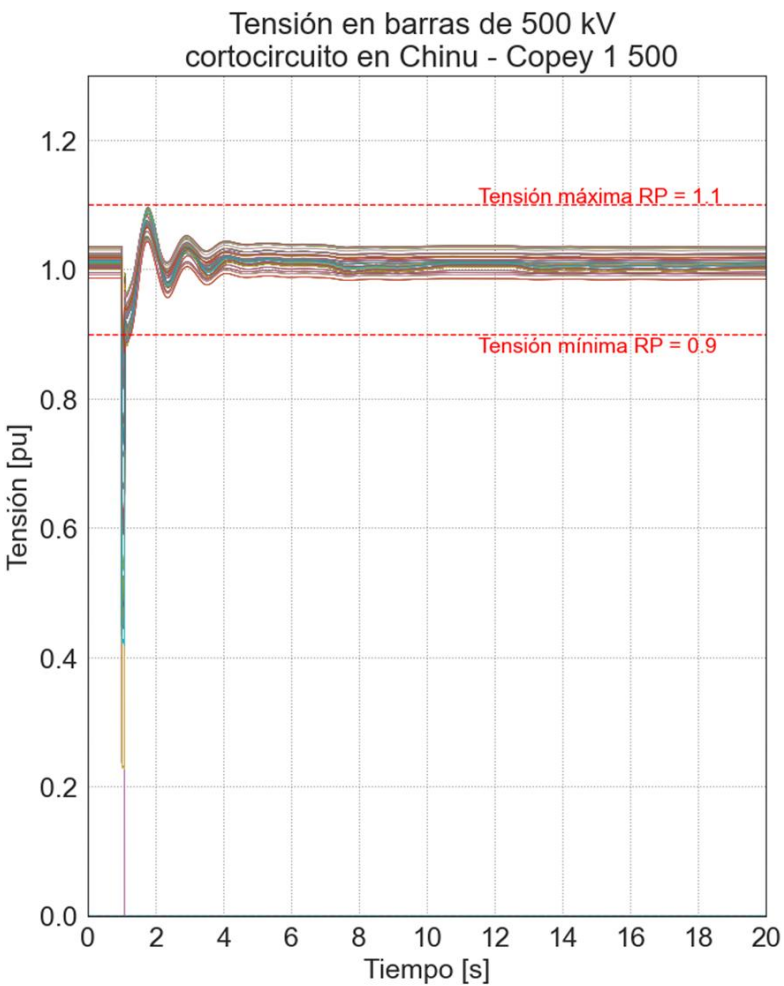
Frecuencia en barras de 500 kV
cortocircuito en Cerro - Sahagun 1 500



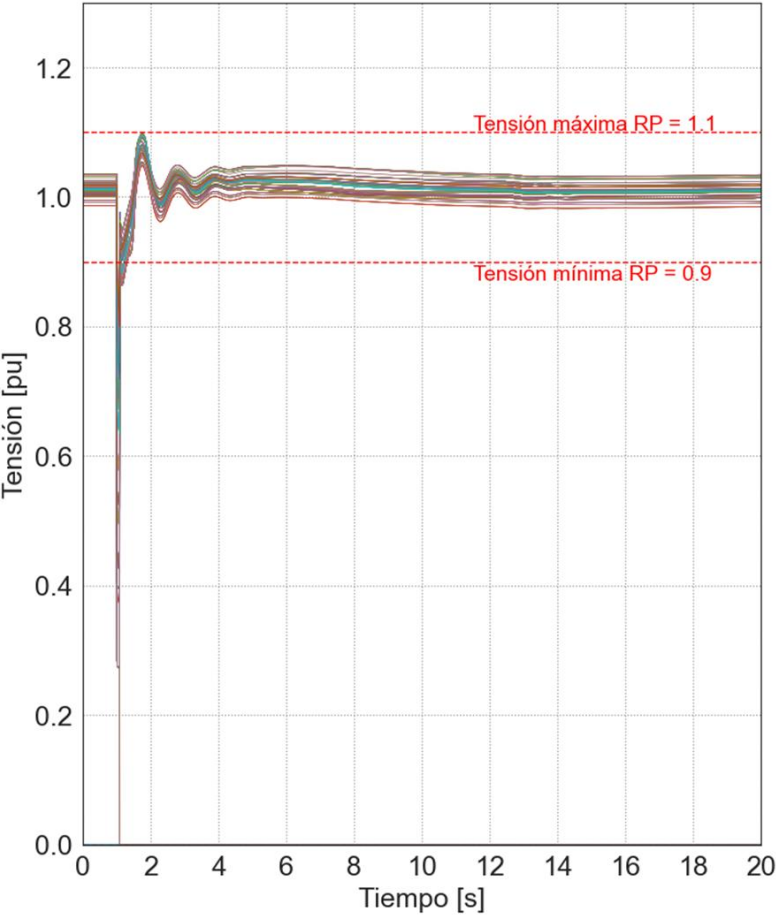
Ángulos de GS
cortocircuito en Cerro - Sahagun 1 500



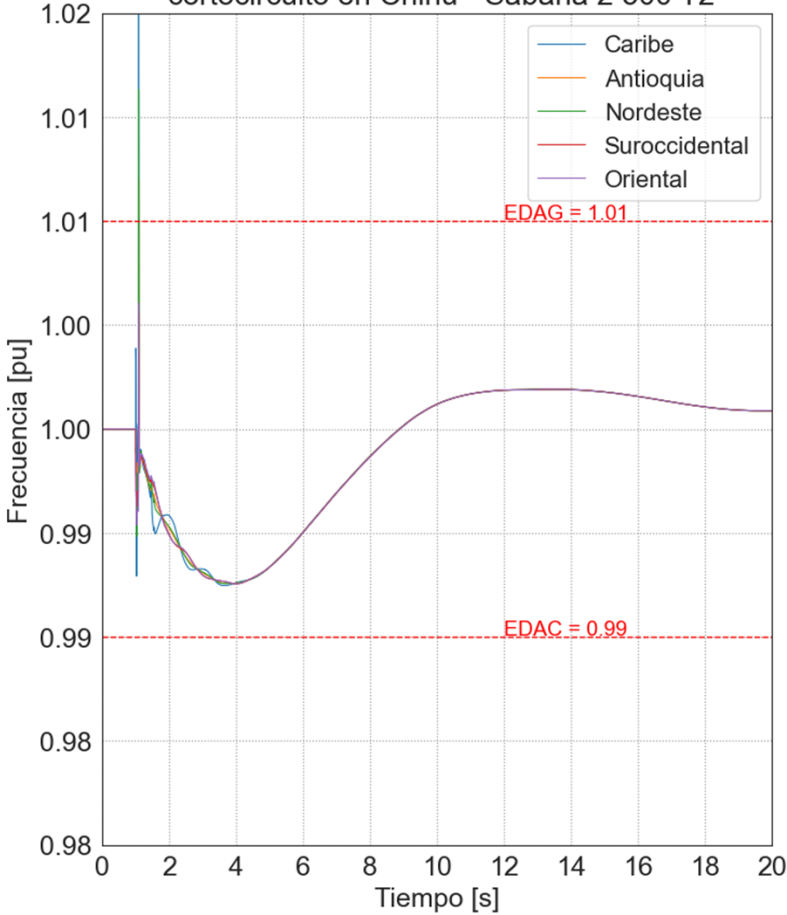




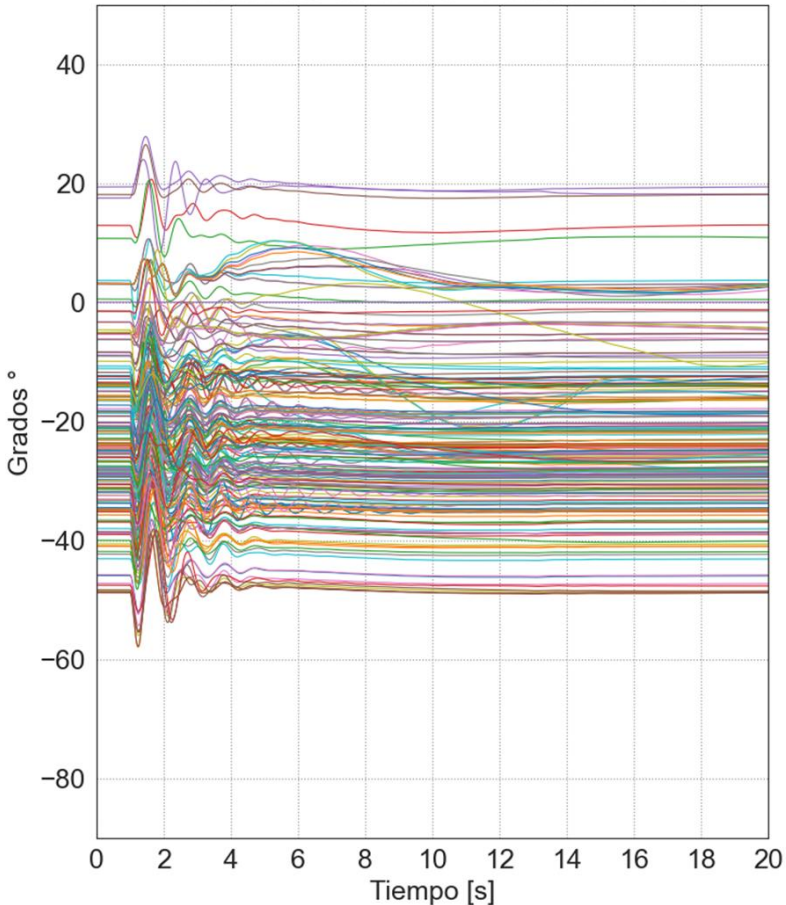
Tensión en barras de 500 kV
cortocircuito en Chinu - Sabana 2 500 T2



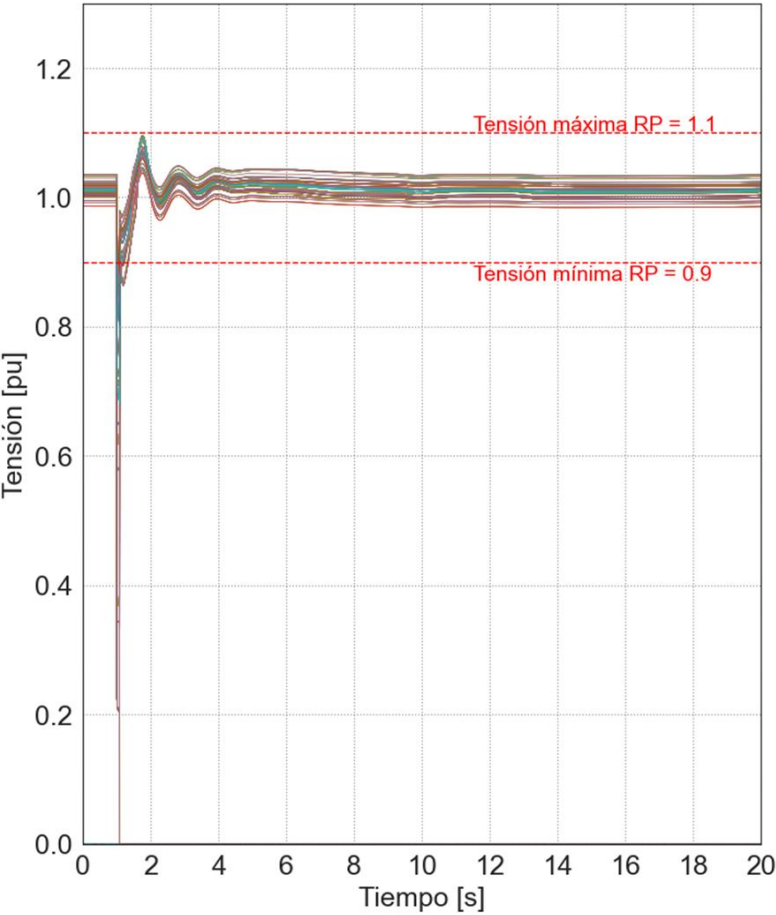
Frecuencia en barras de 500 kV
cortocircuito en Chinu - Sabana 2 500 T2



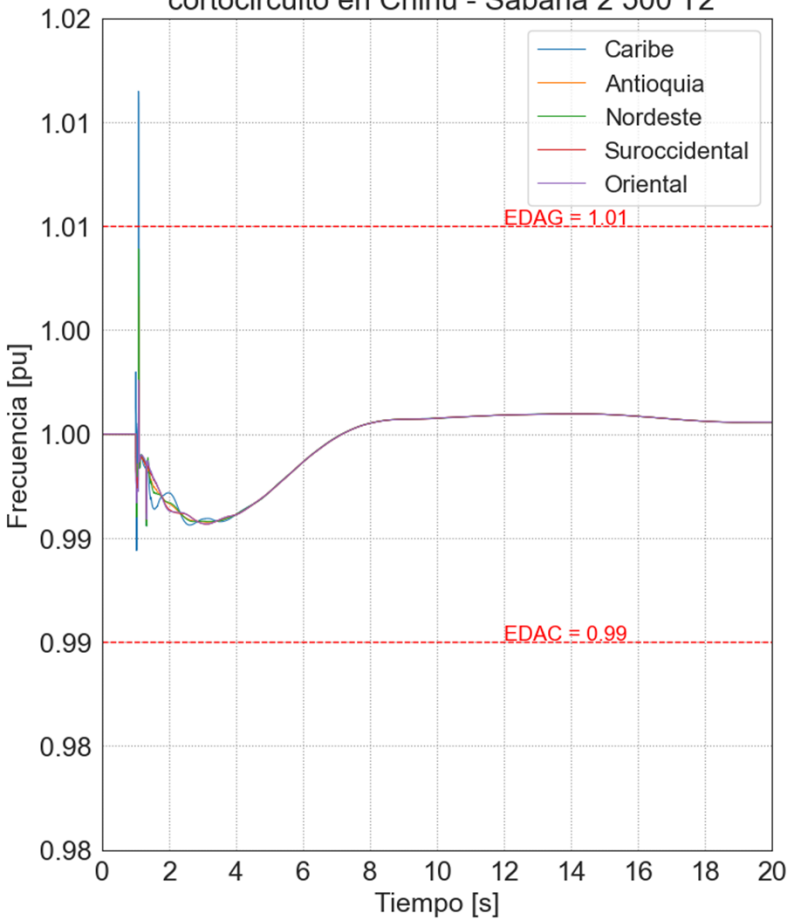
Ángulos de GS
cortocircuito en Chinu - Sabana 2 500 T2



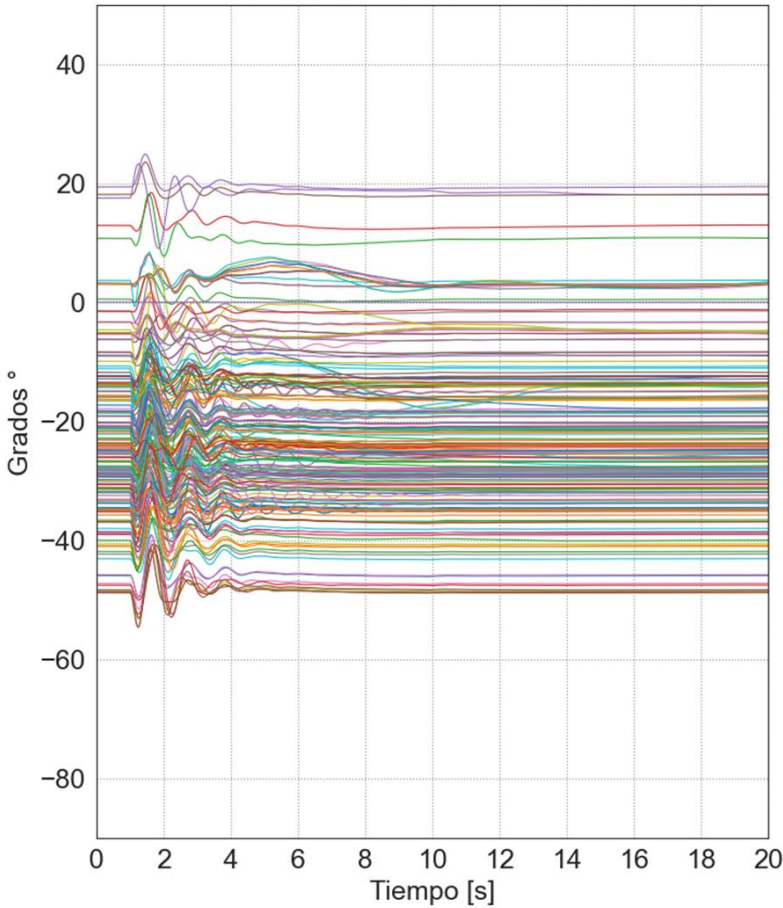
Tensión en barras de 500 kV
cortocircuito en Chinu - Sabana 2 500 T2

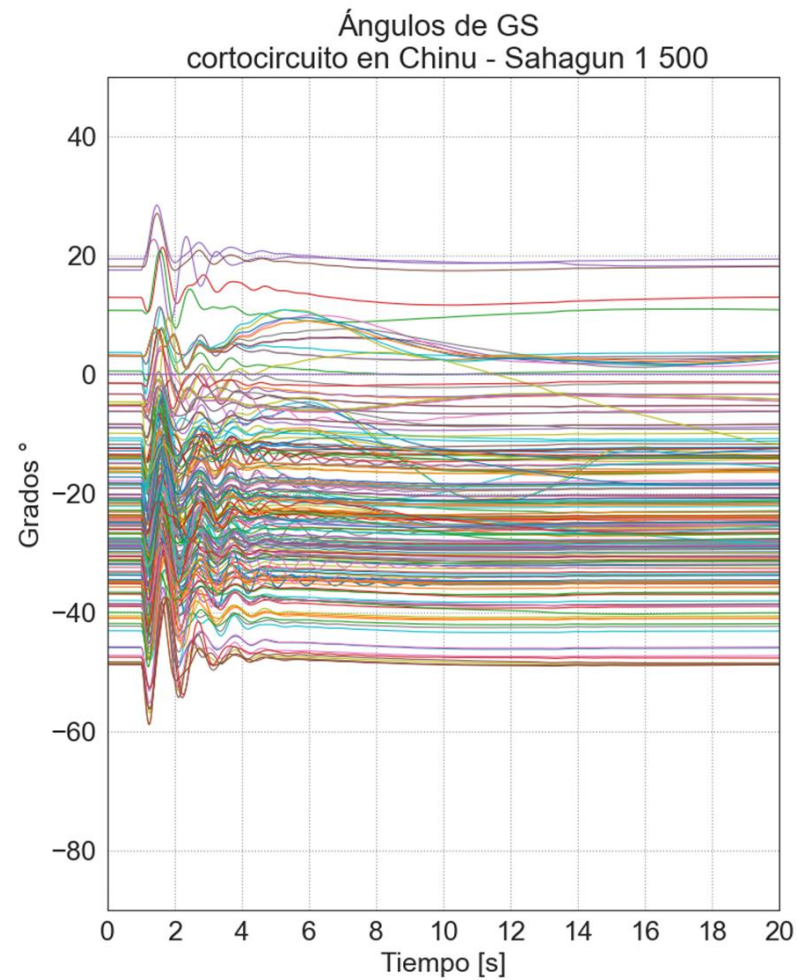
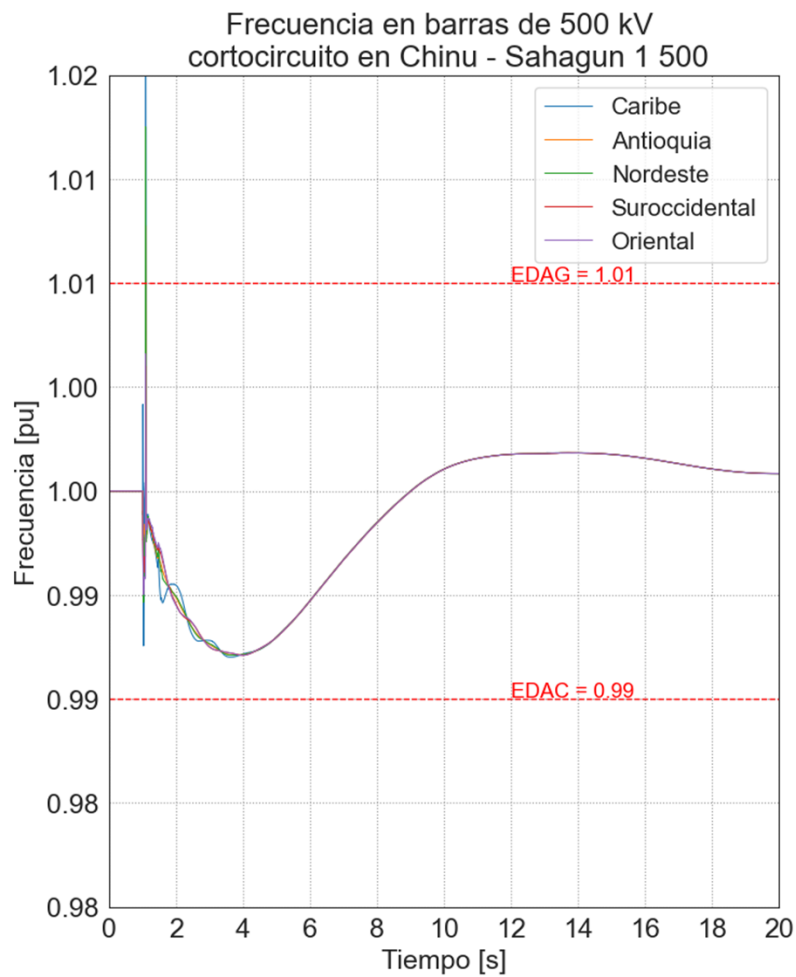
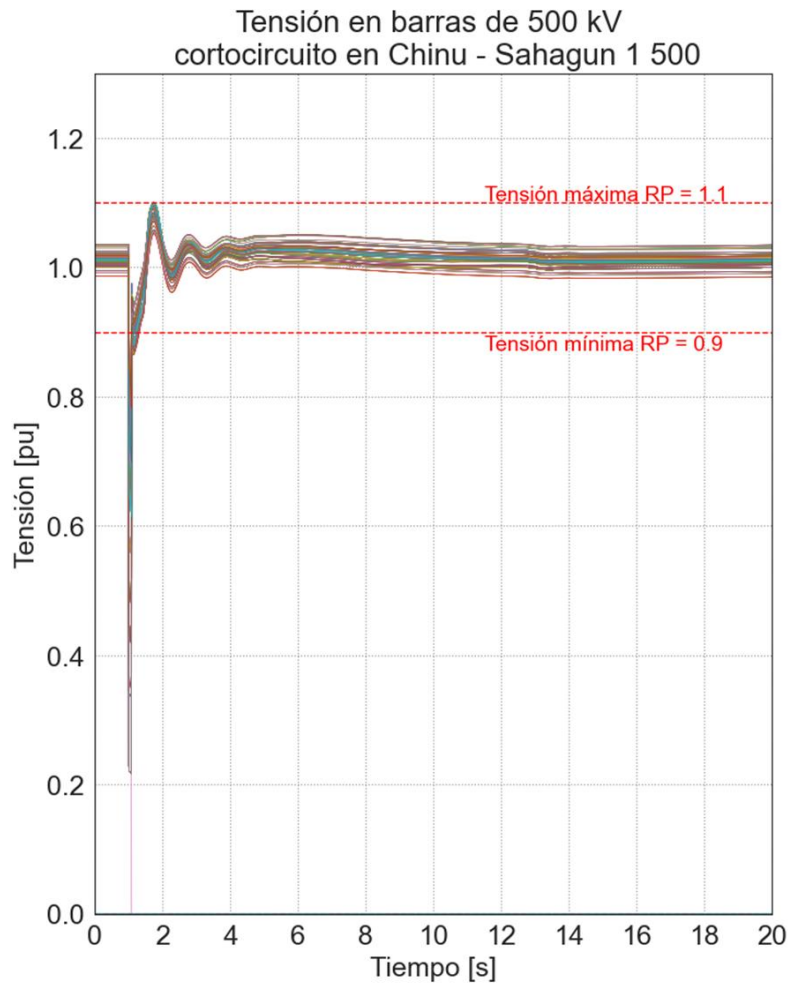


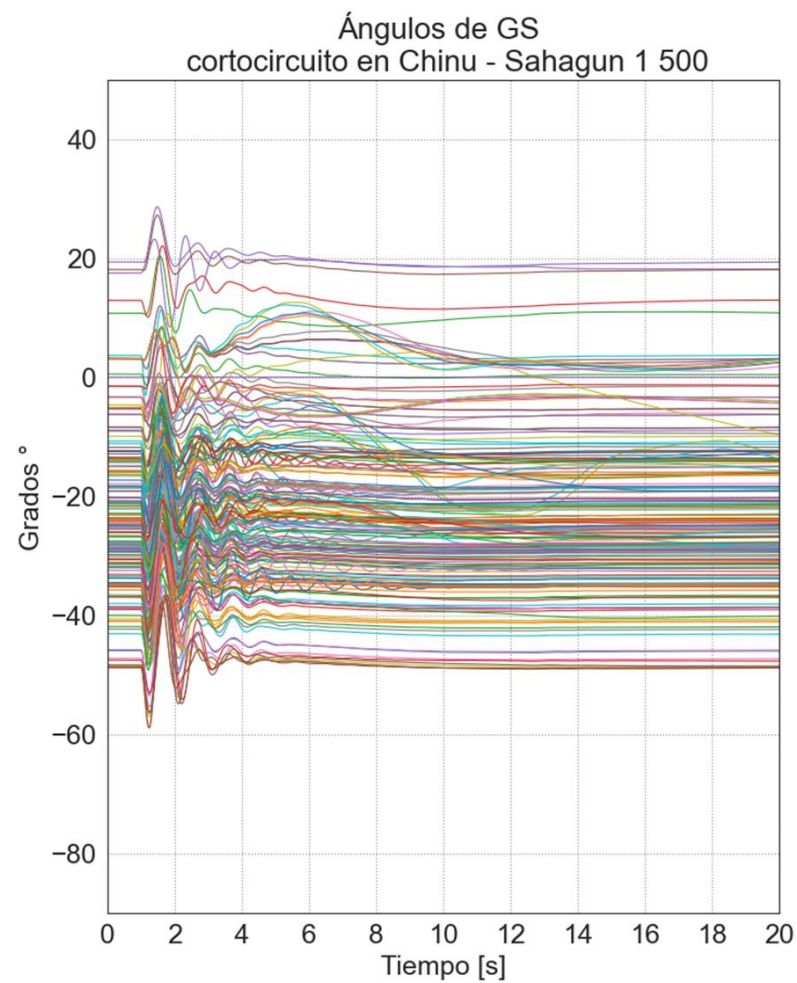
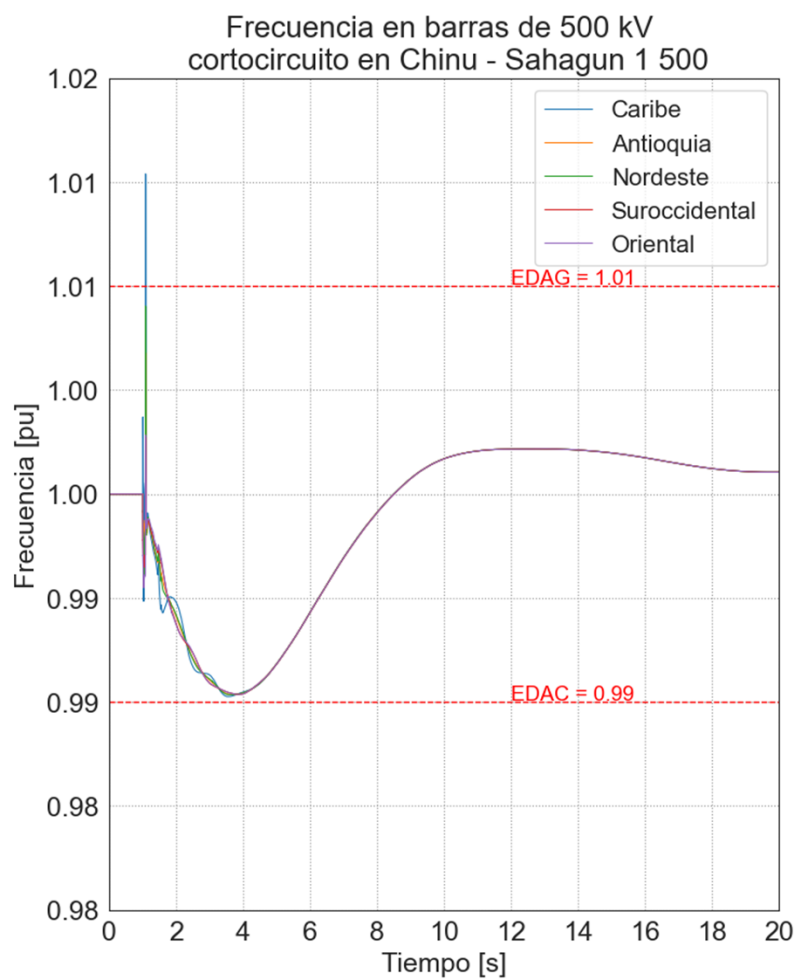
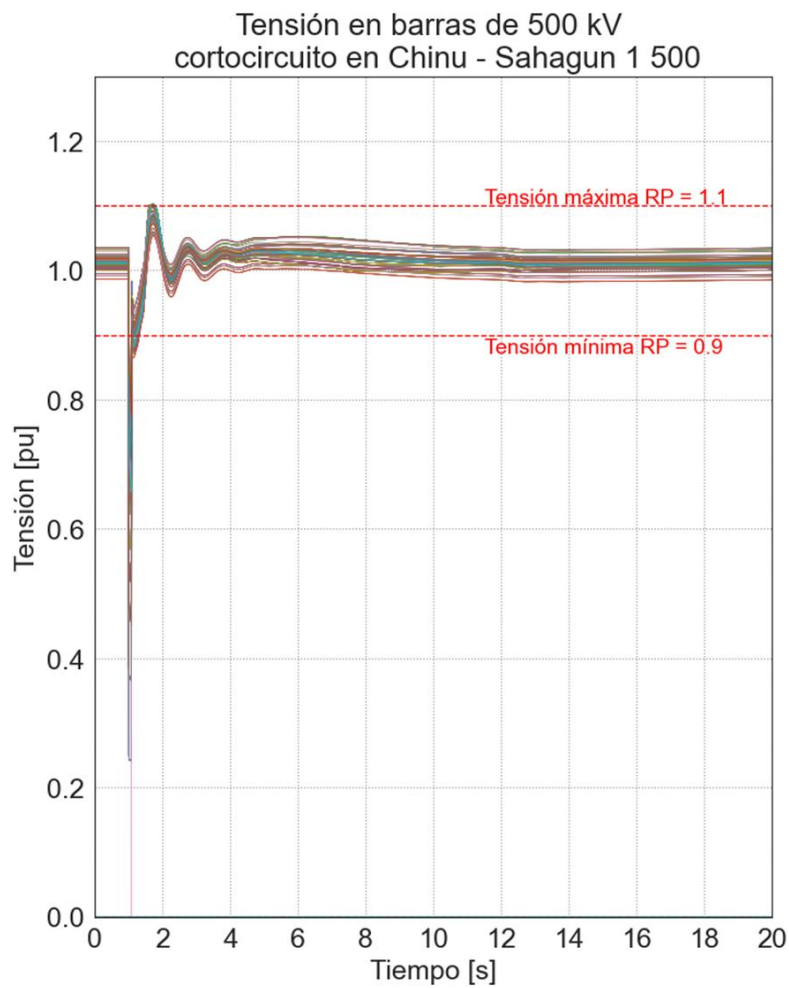
Frecuencia en barras de 500 kV
cortocircuito en Chinu - Sabana 2 500 T2

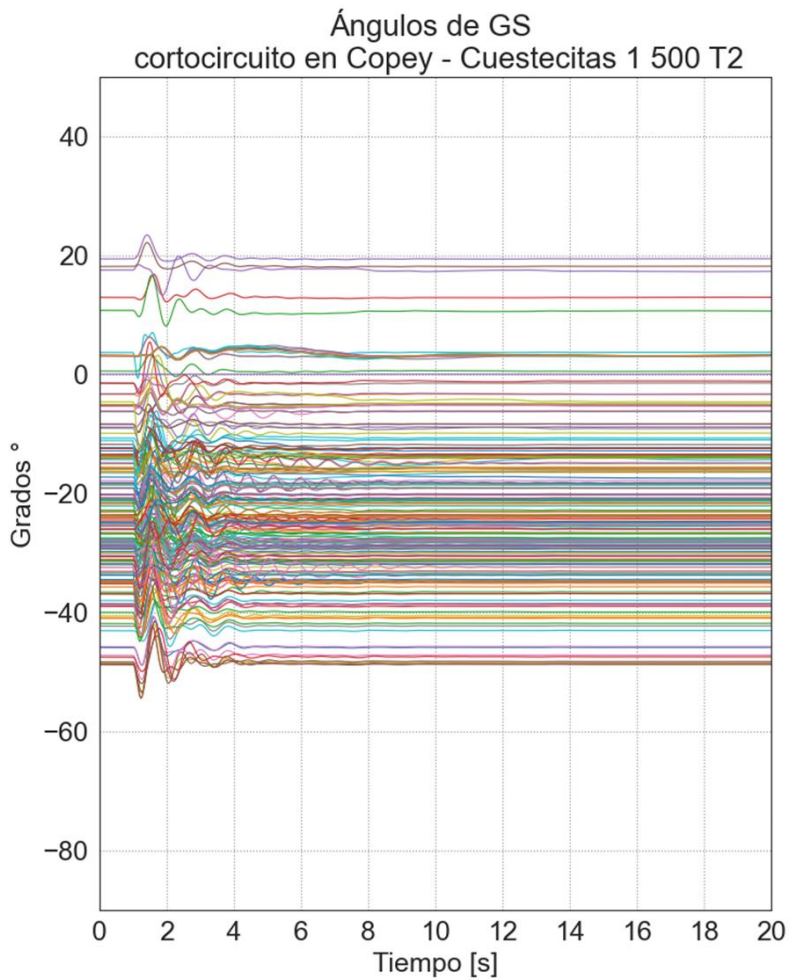
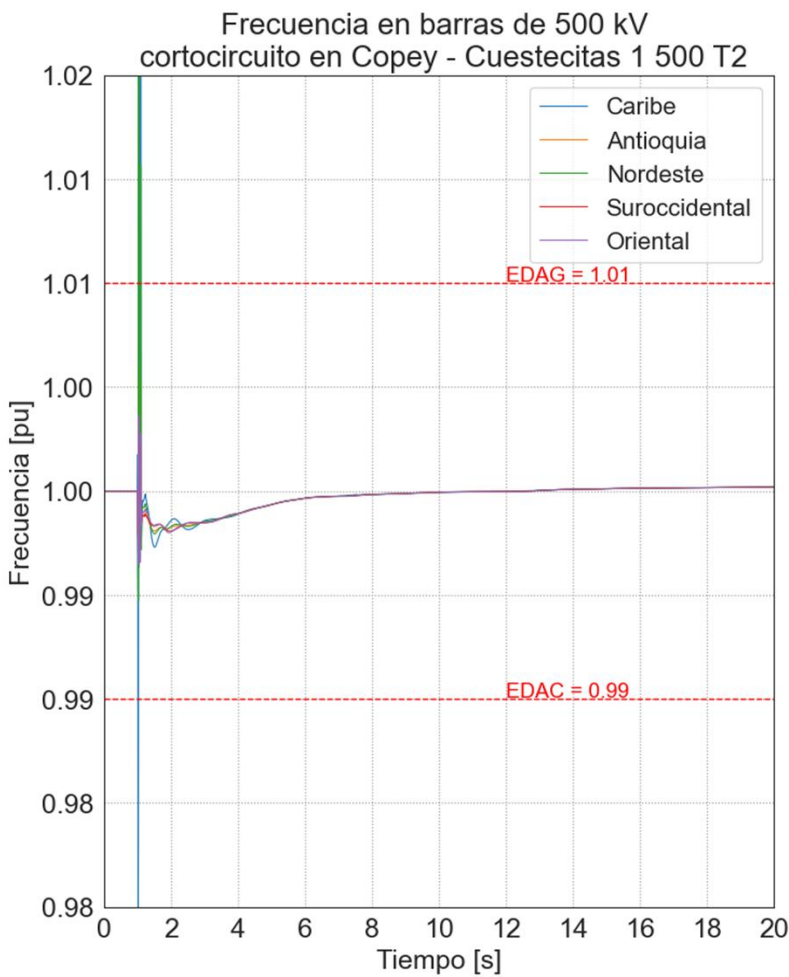
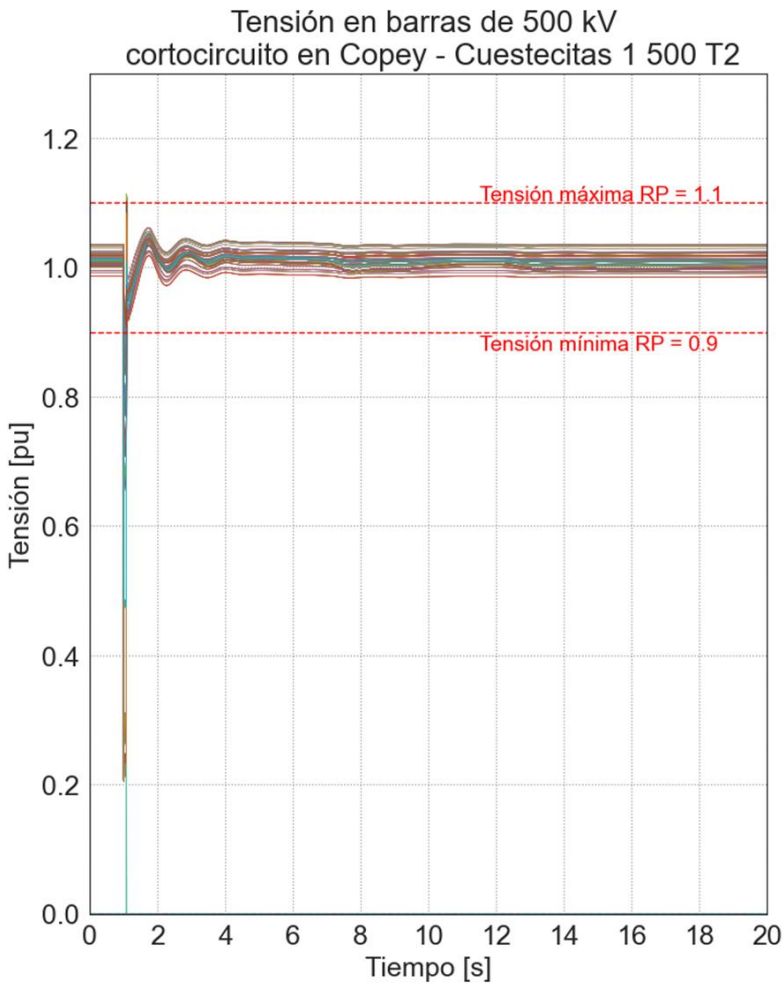


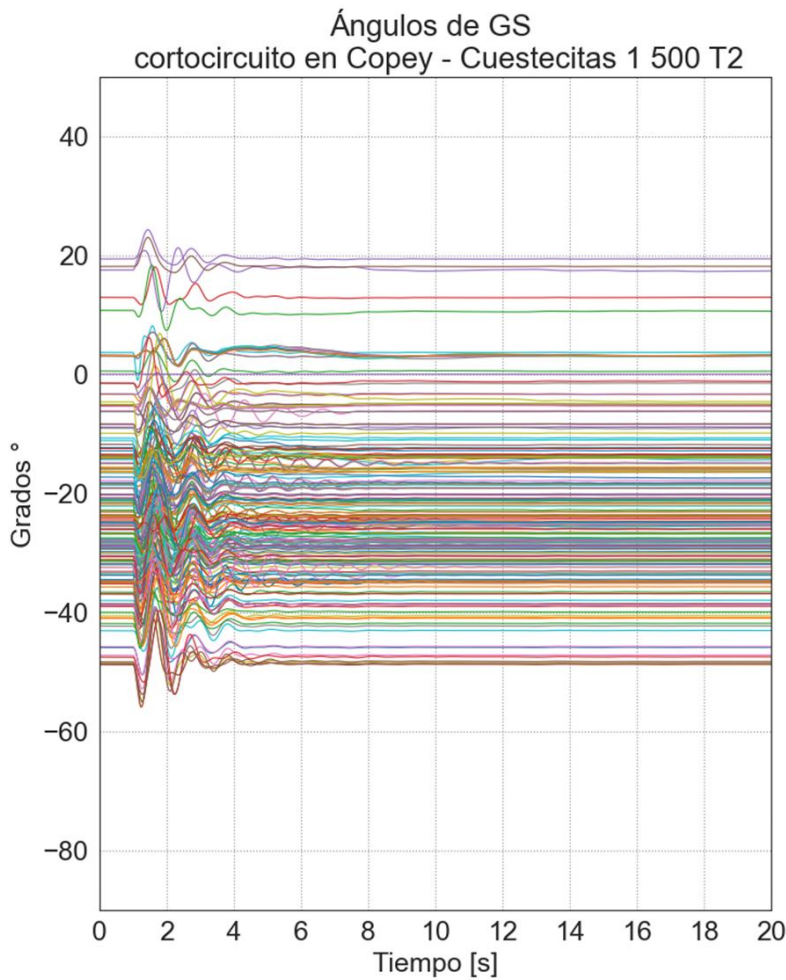
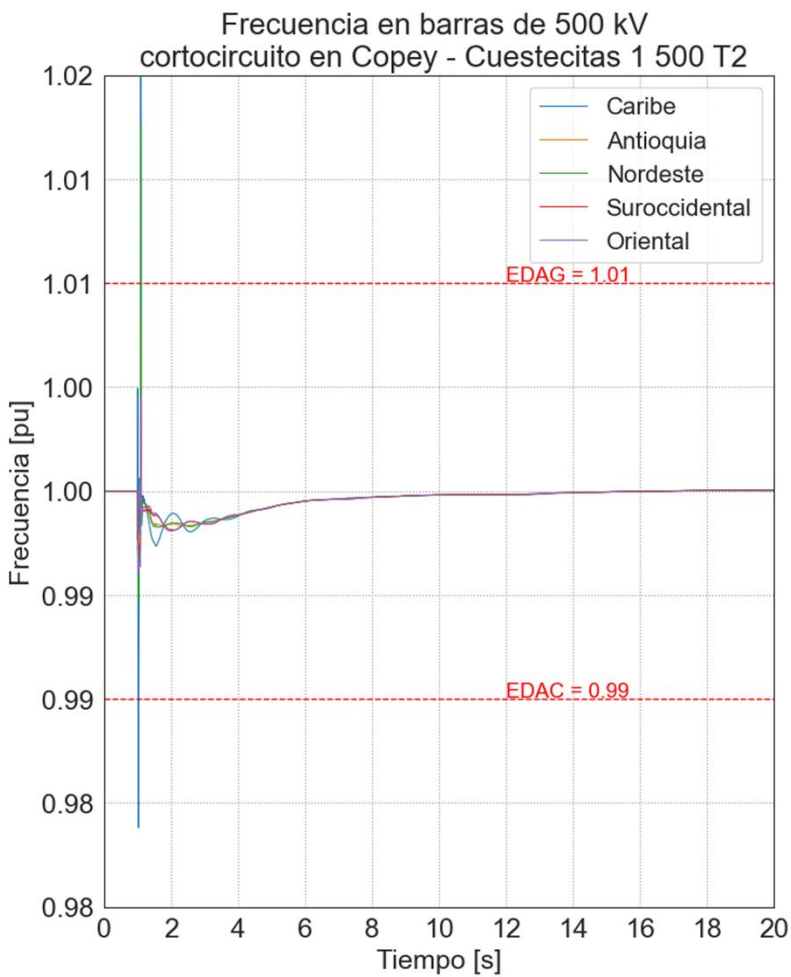
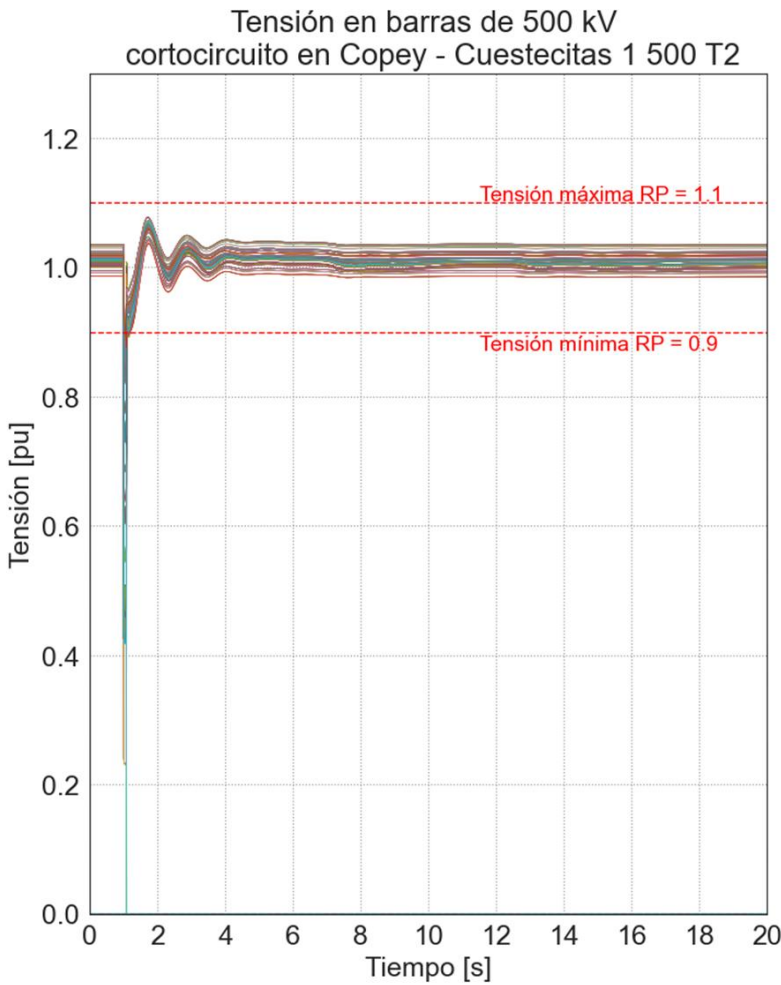
Ángulos de GS
cortocircuito en Chinu - Sabana 2 500 T2

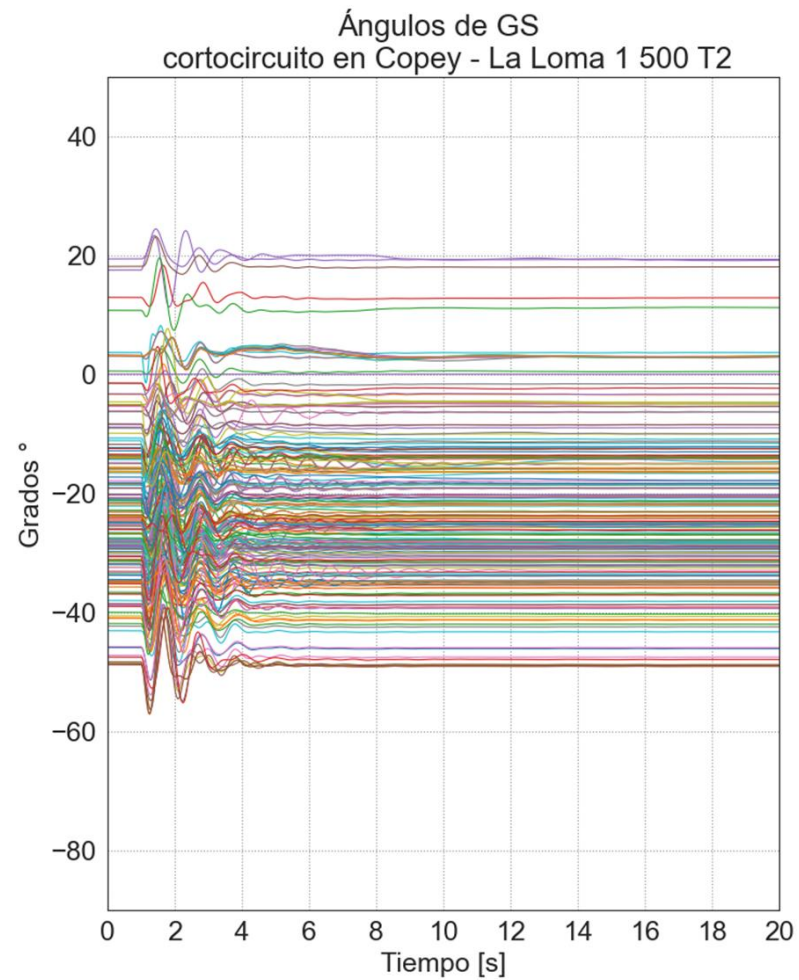
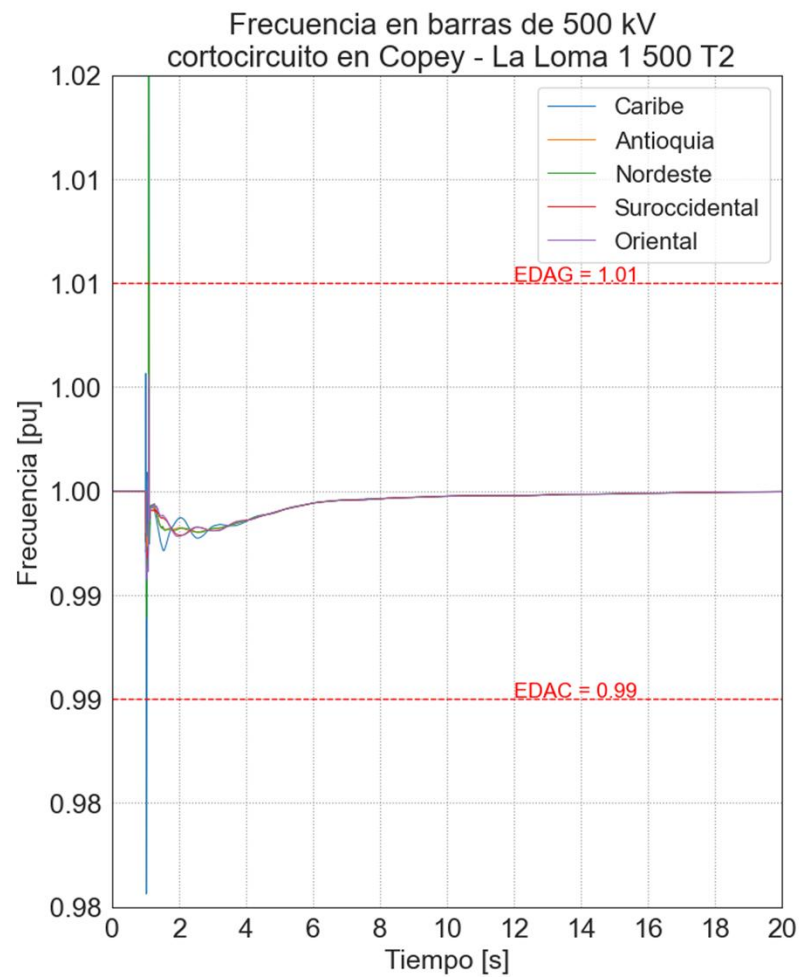
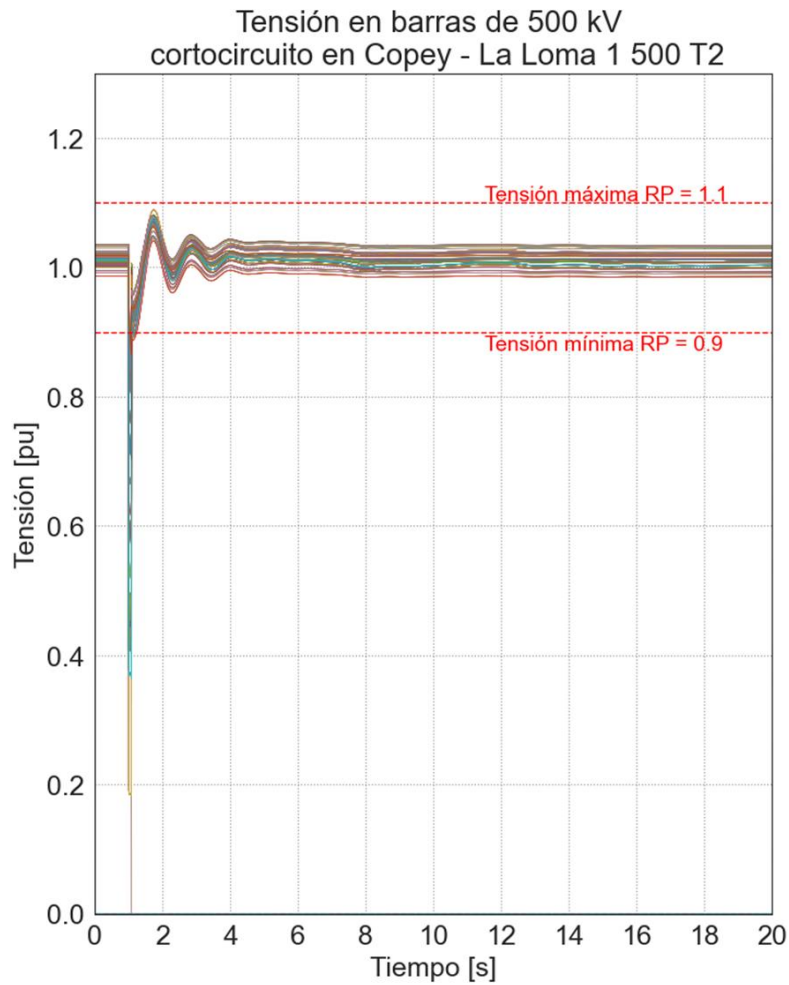


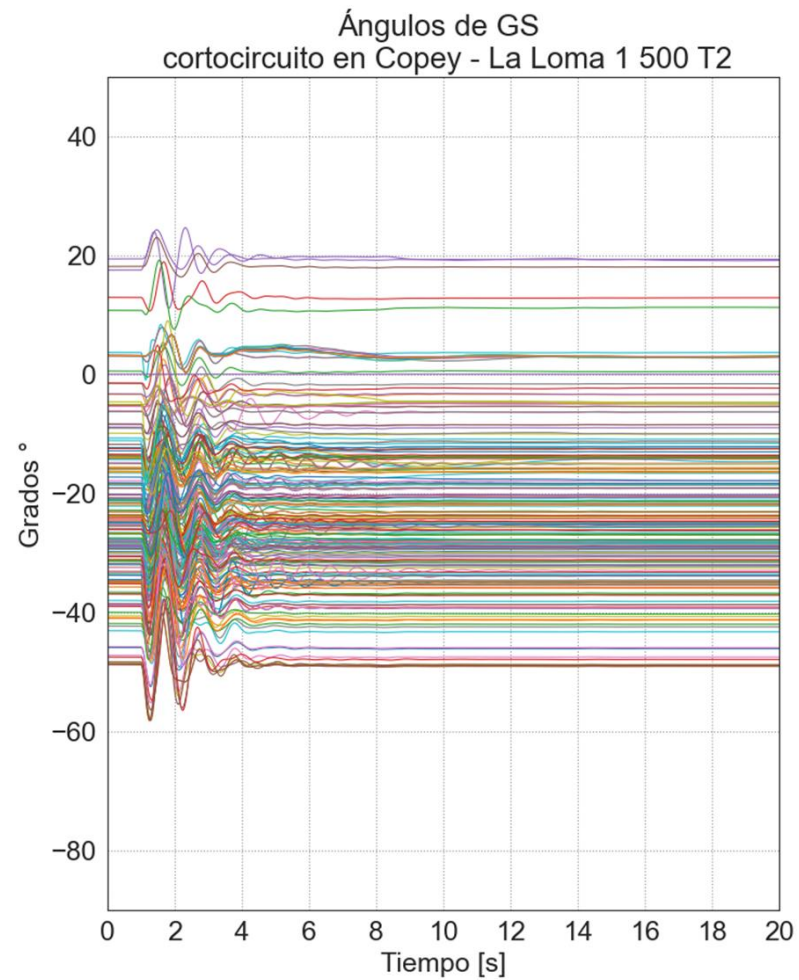
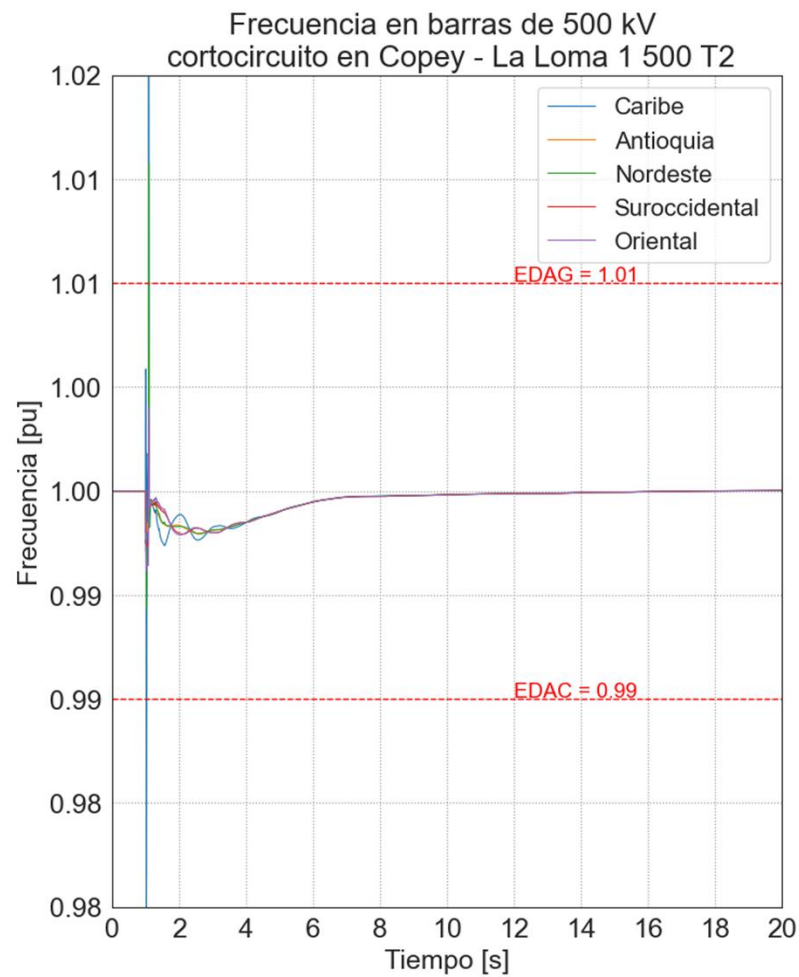
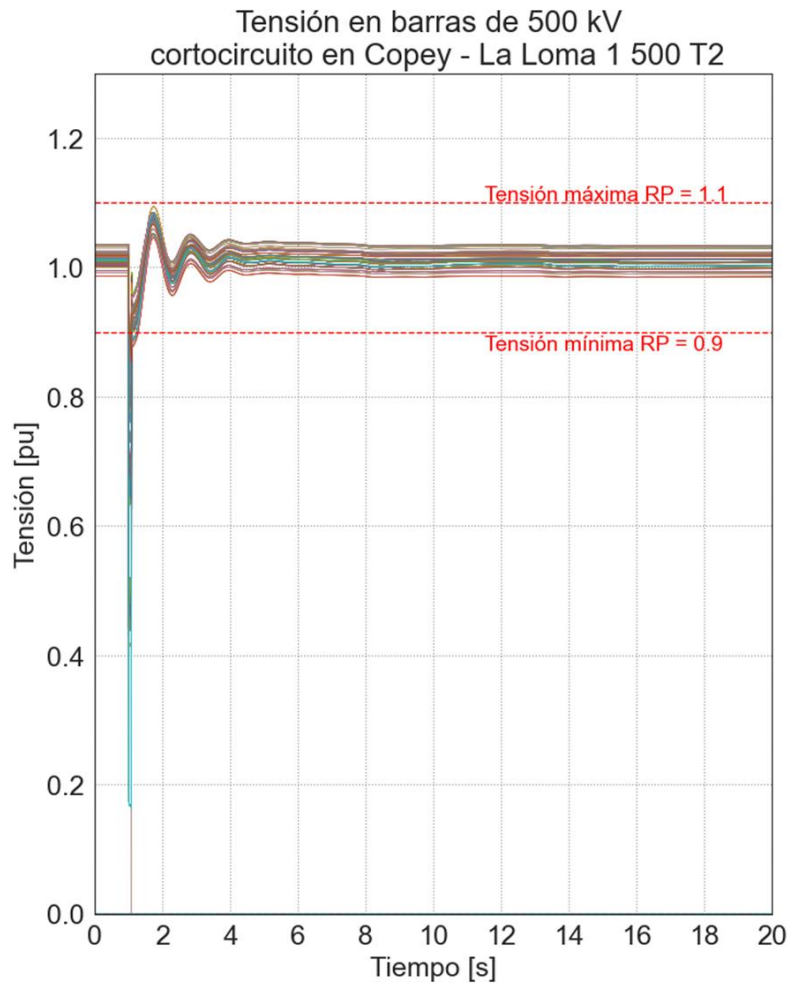


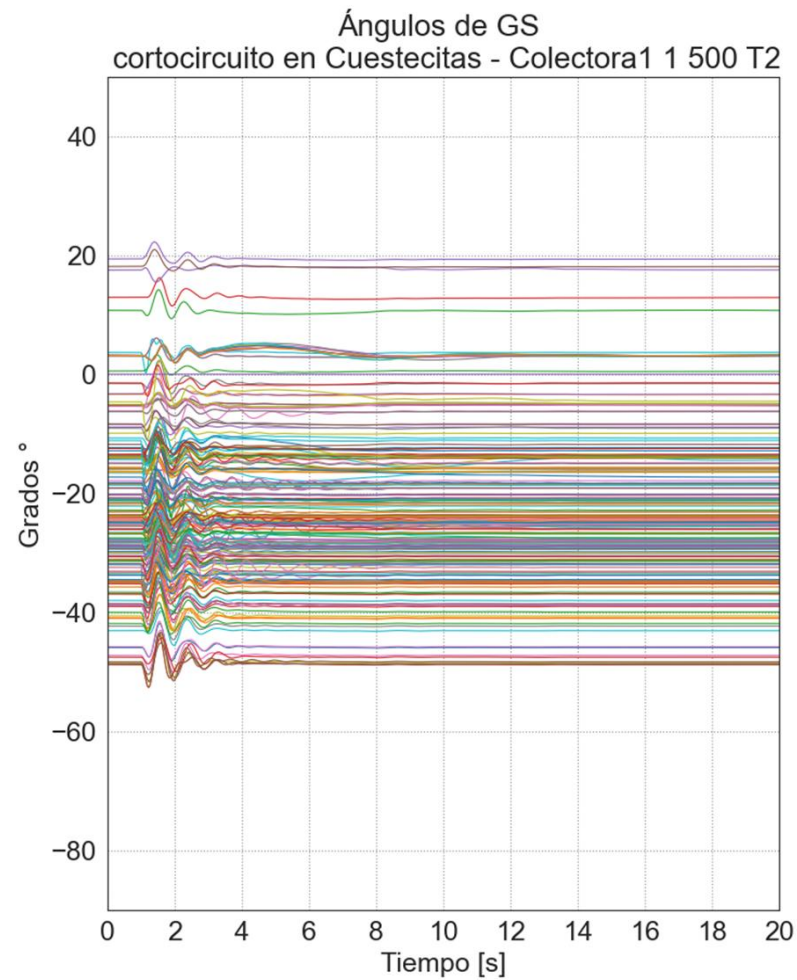
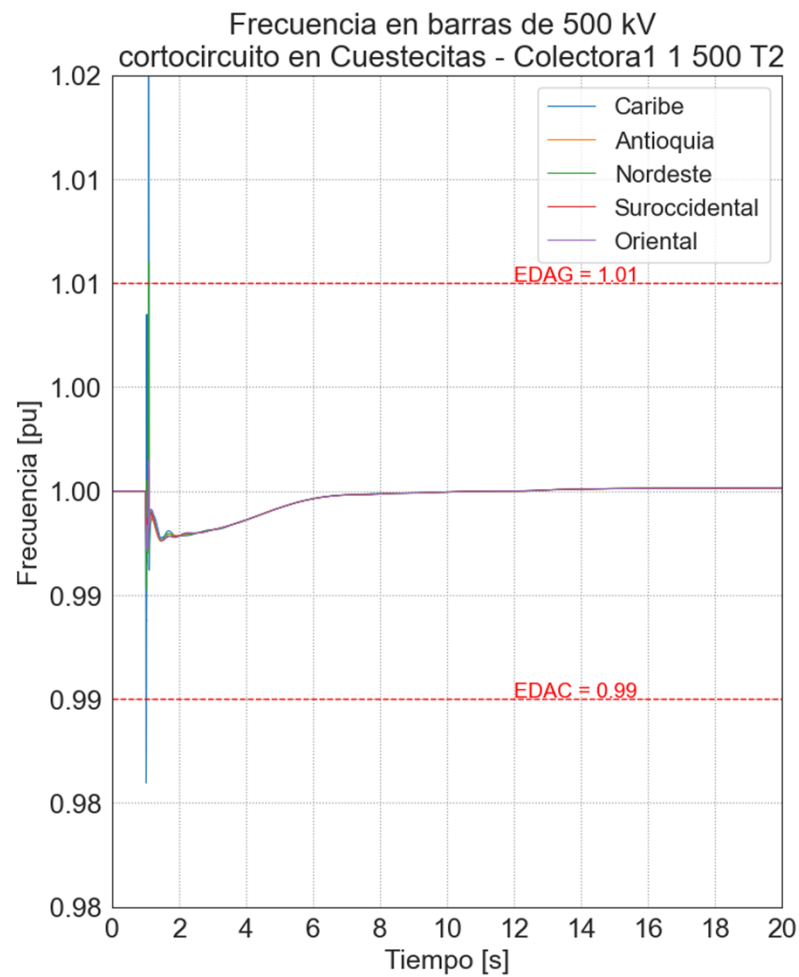
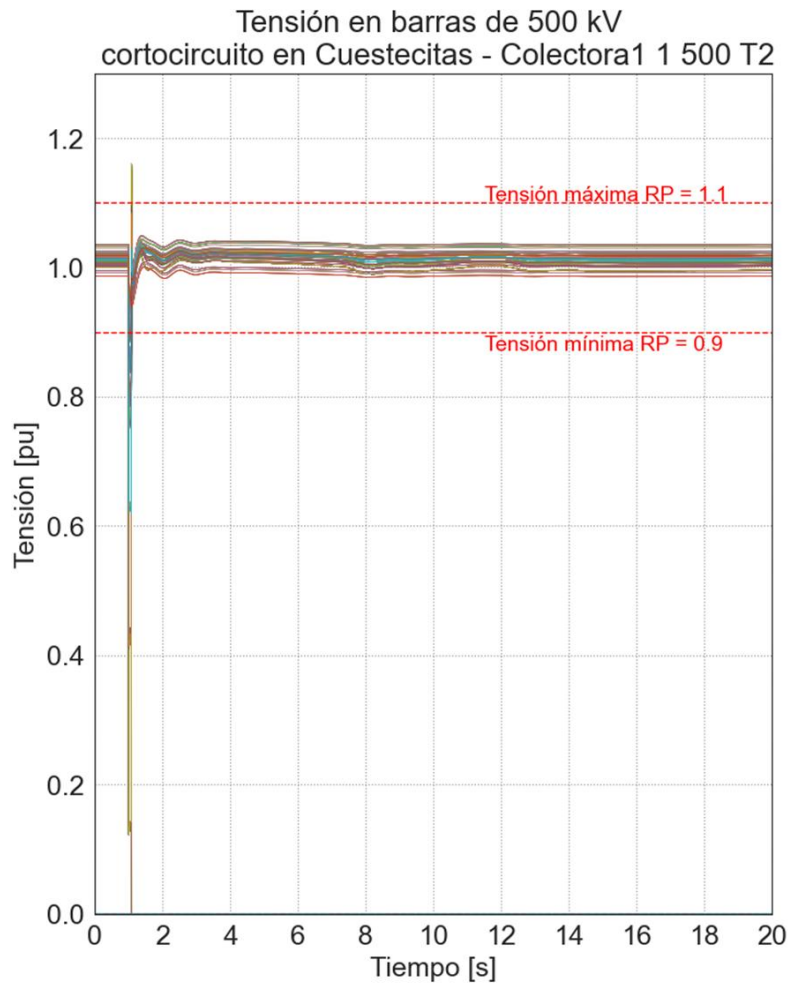


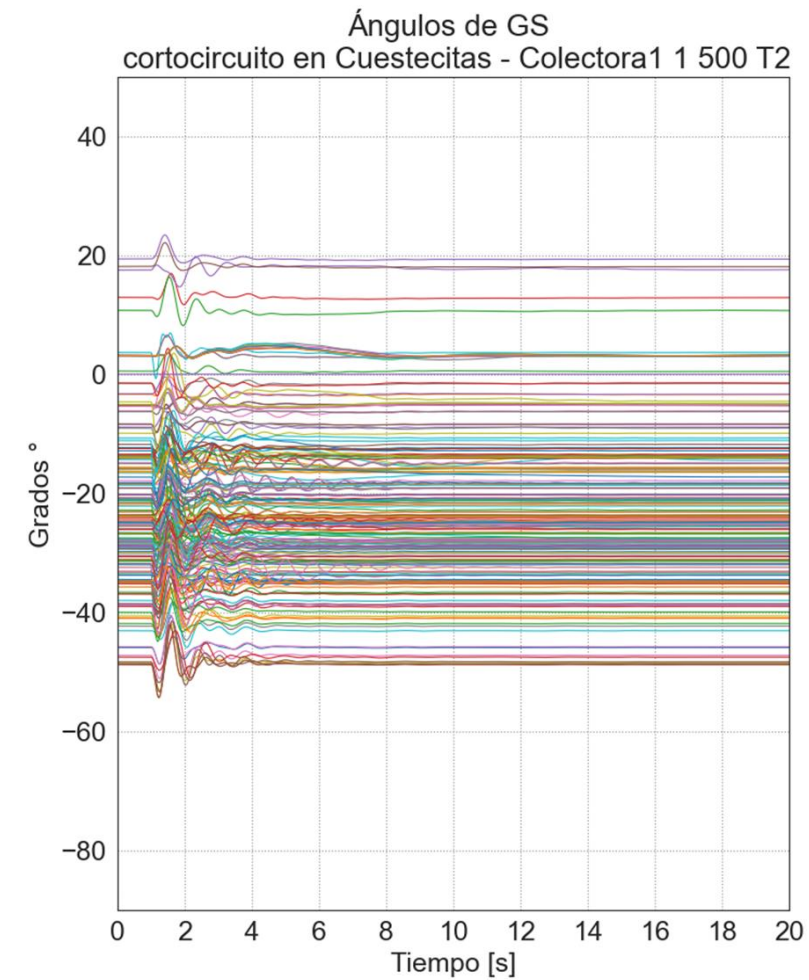
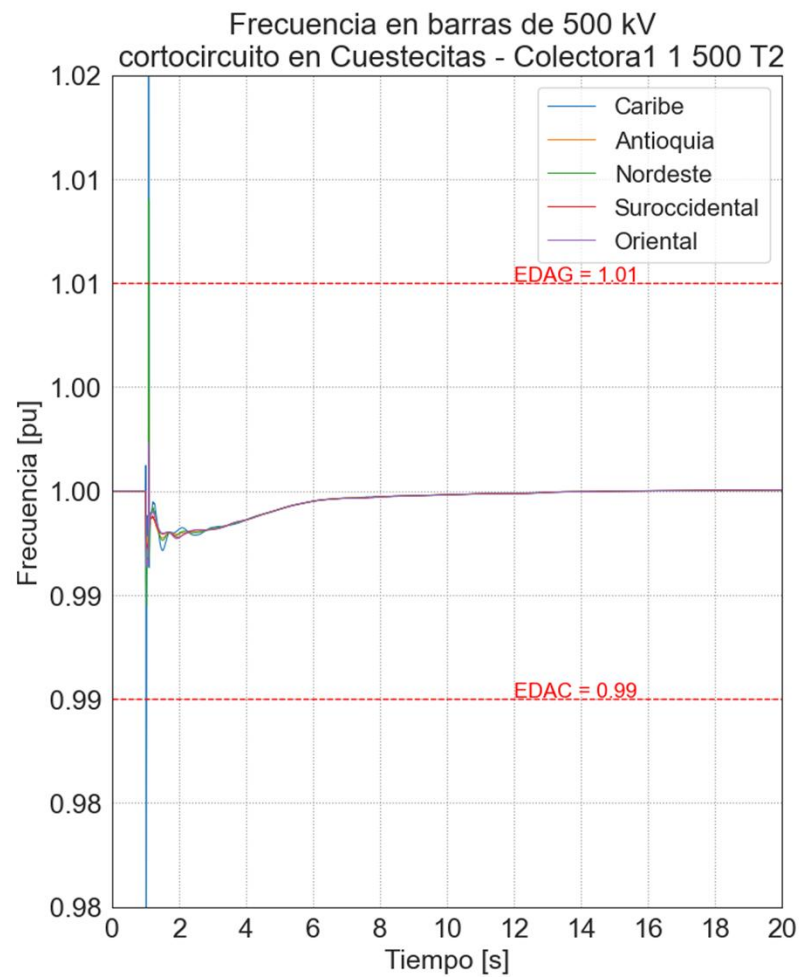
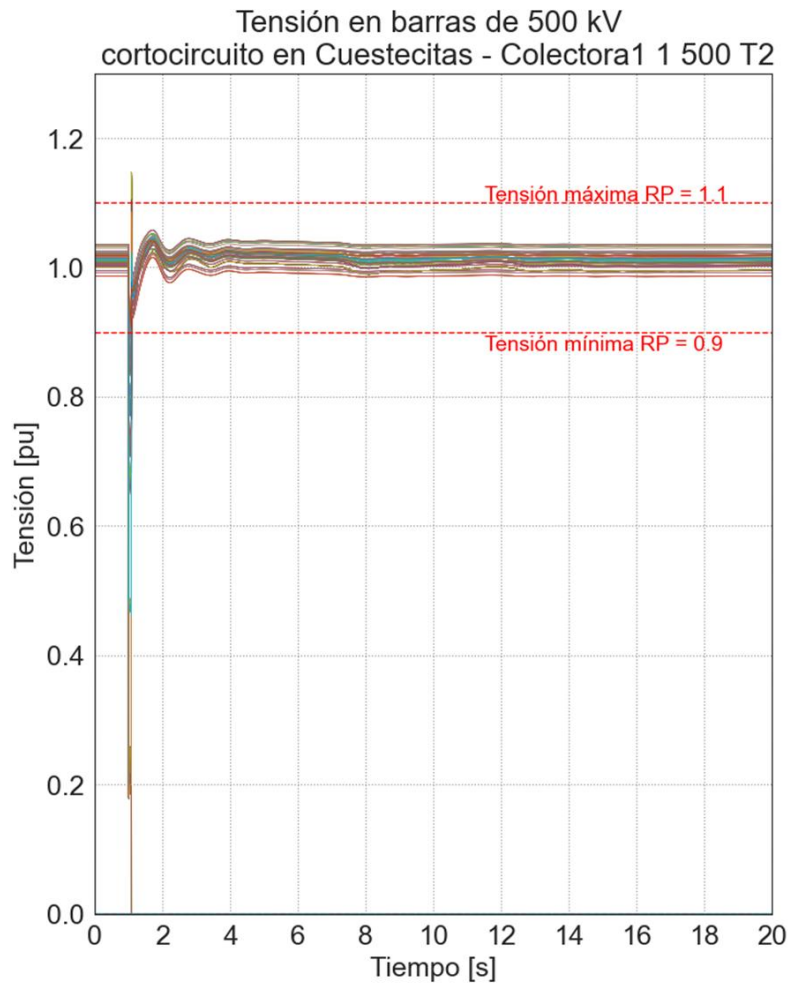


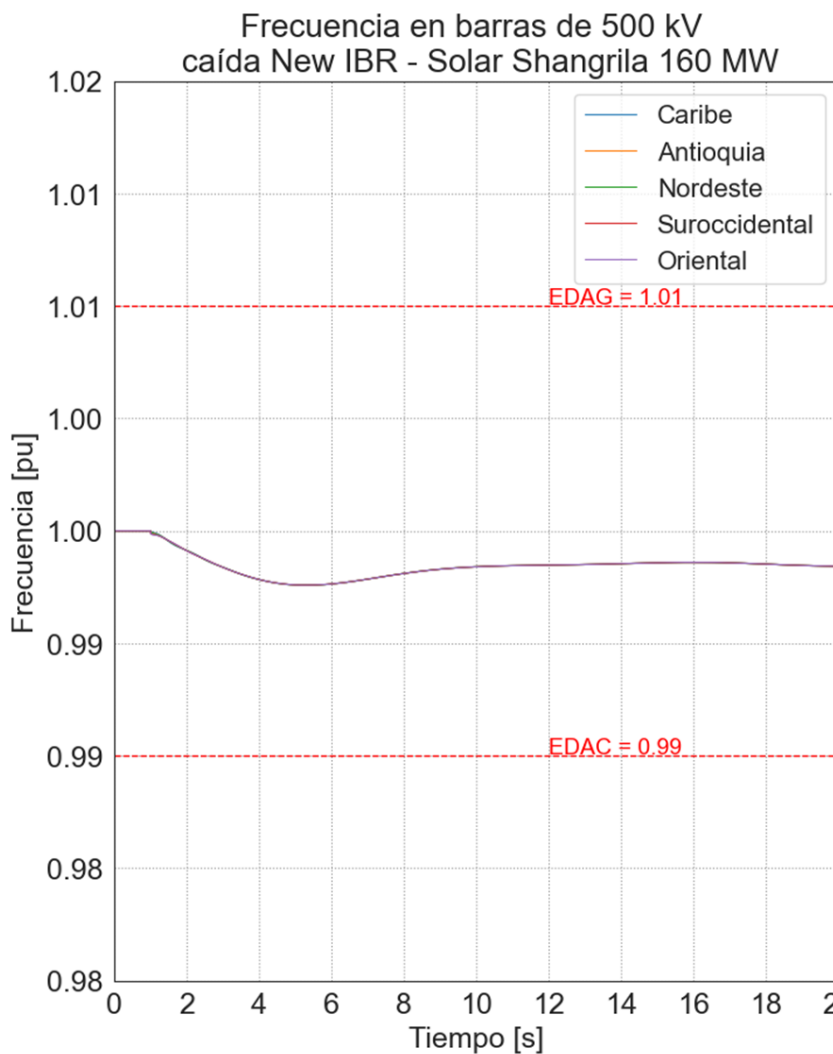
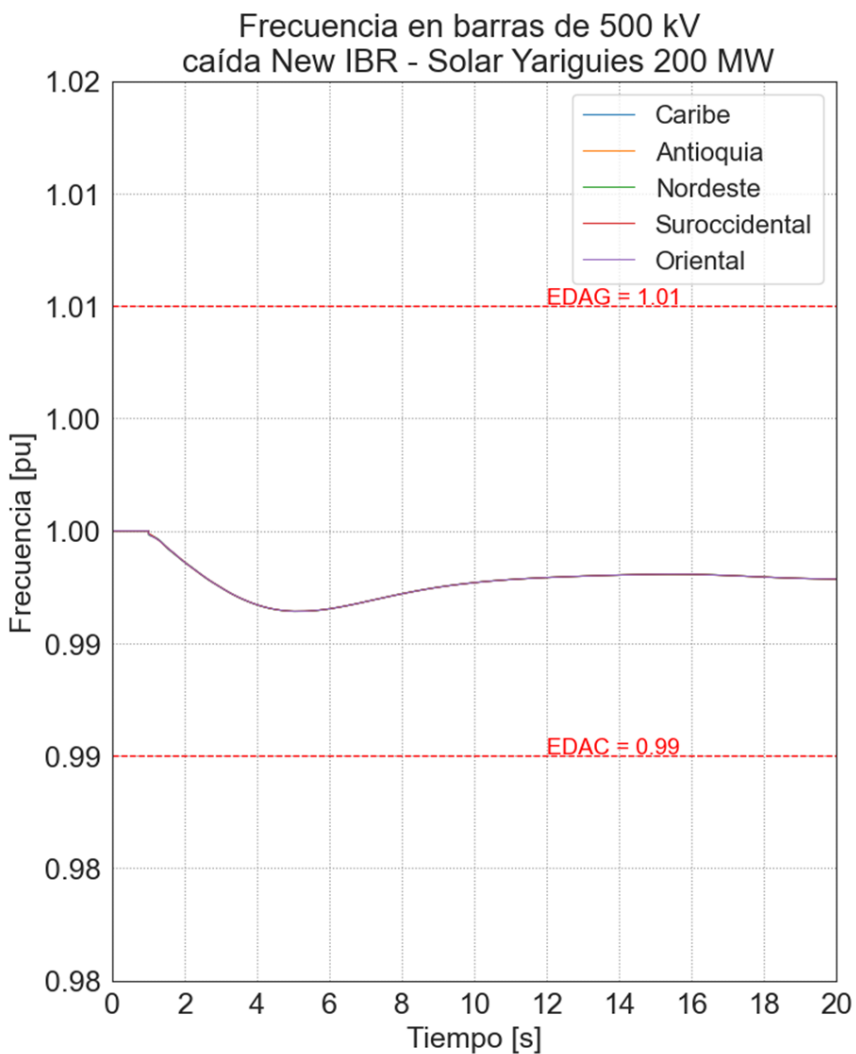
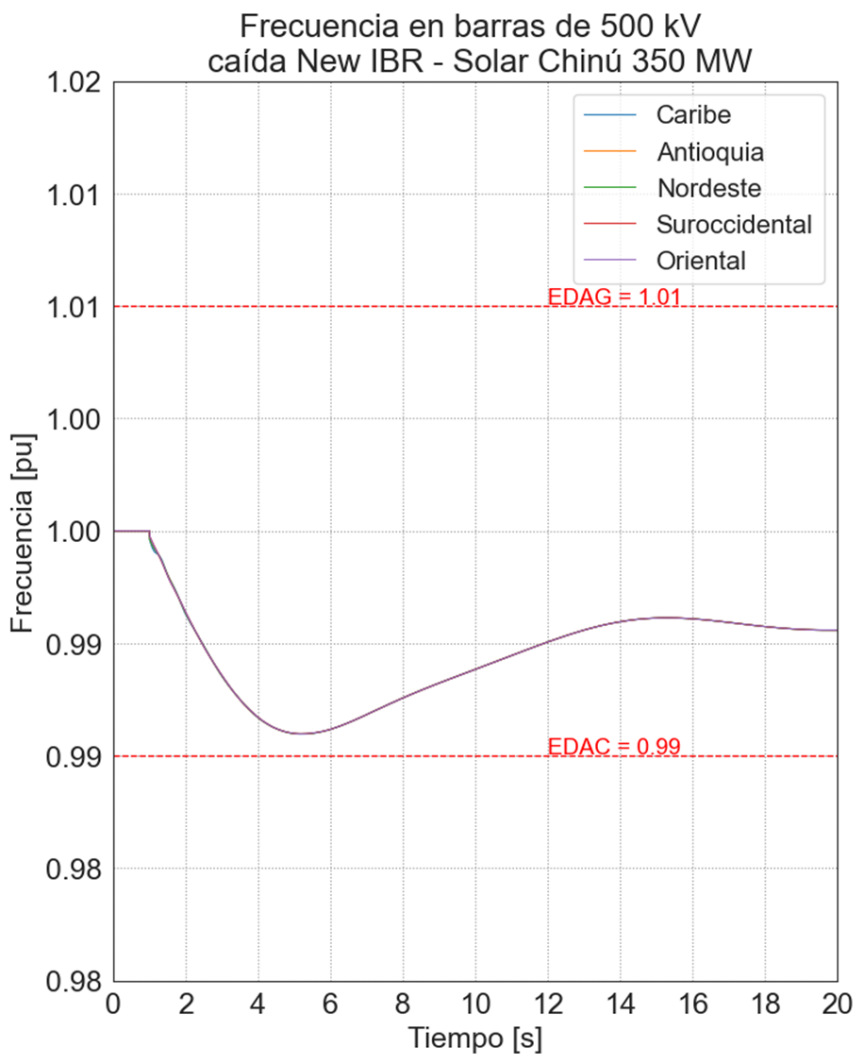


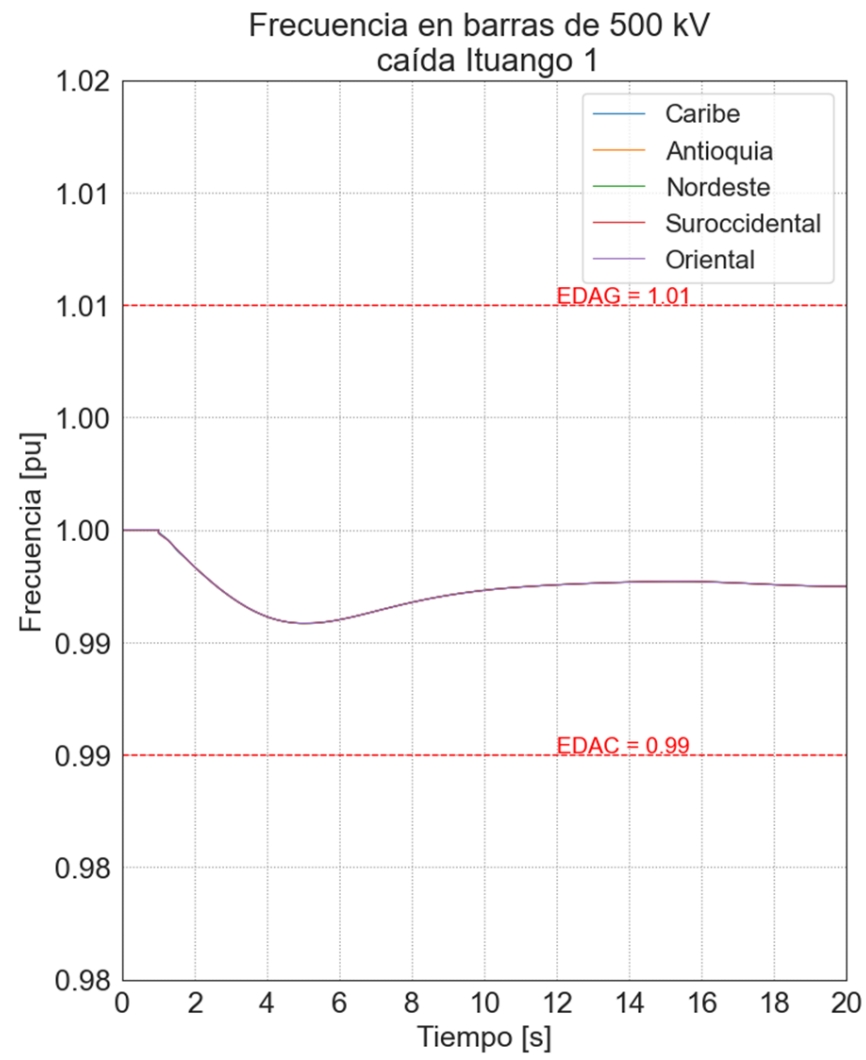
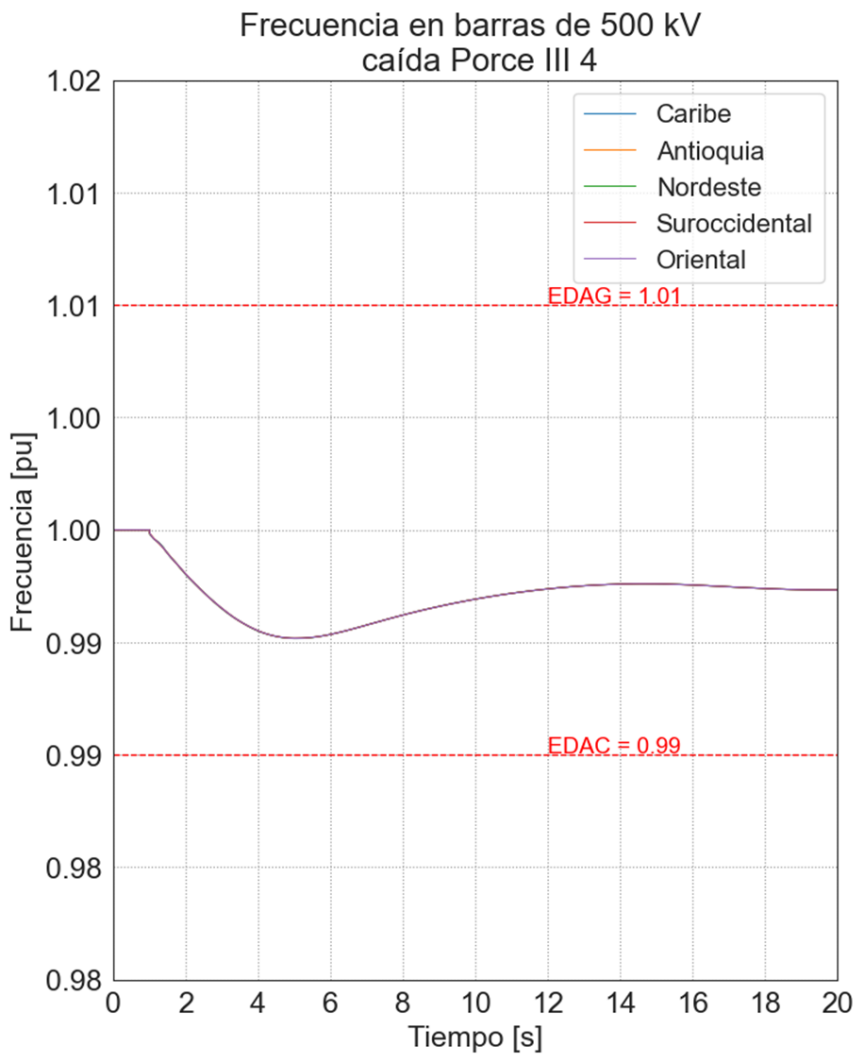






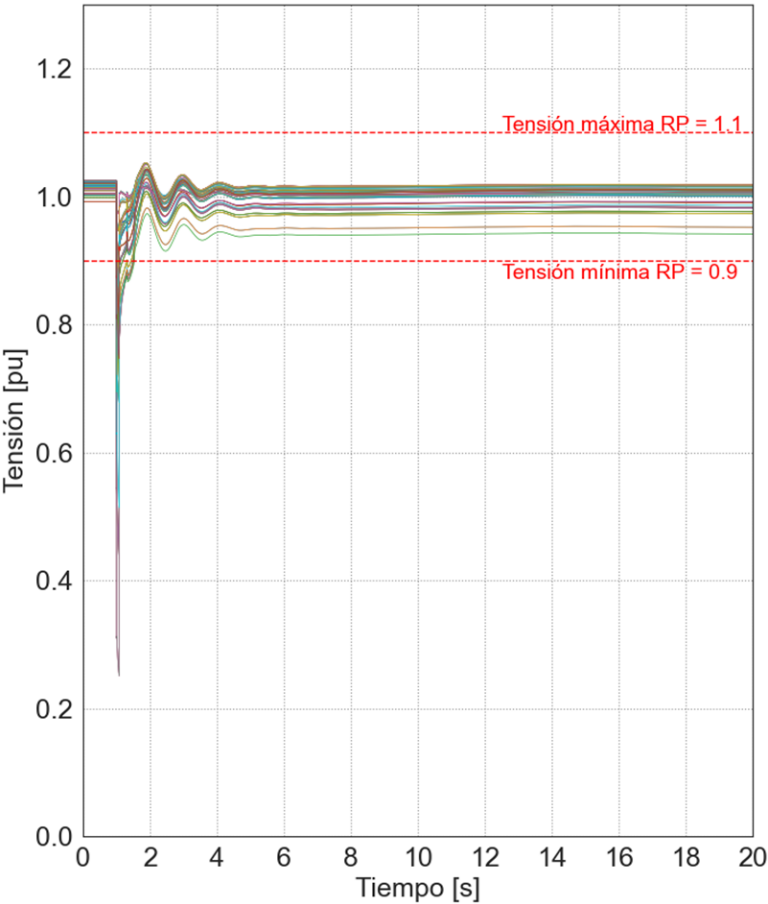




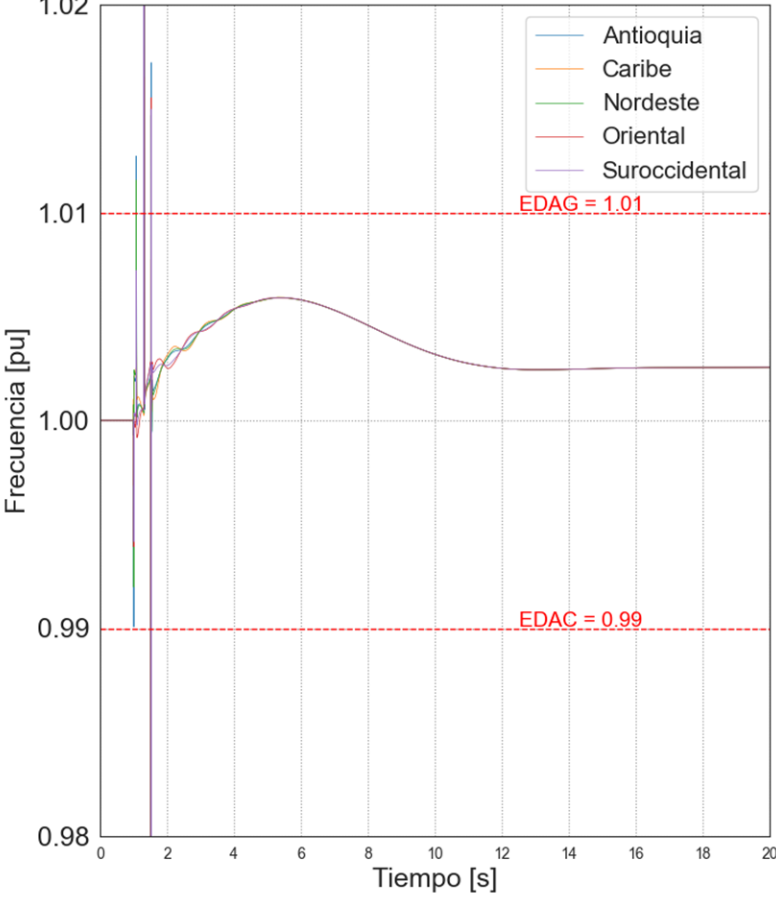


Resultados inercia mínima en Caribe 2037

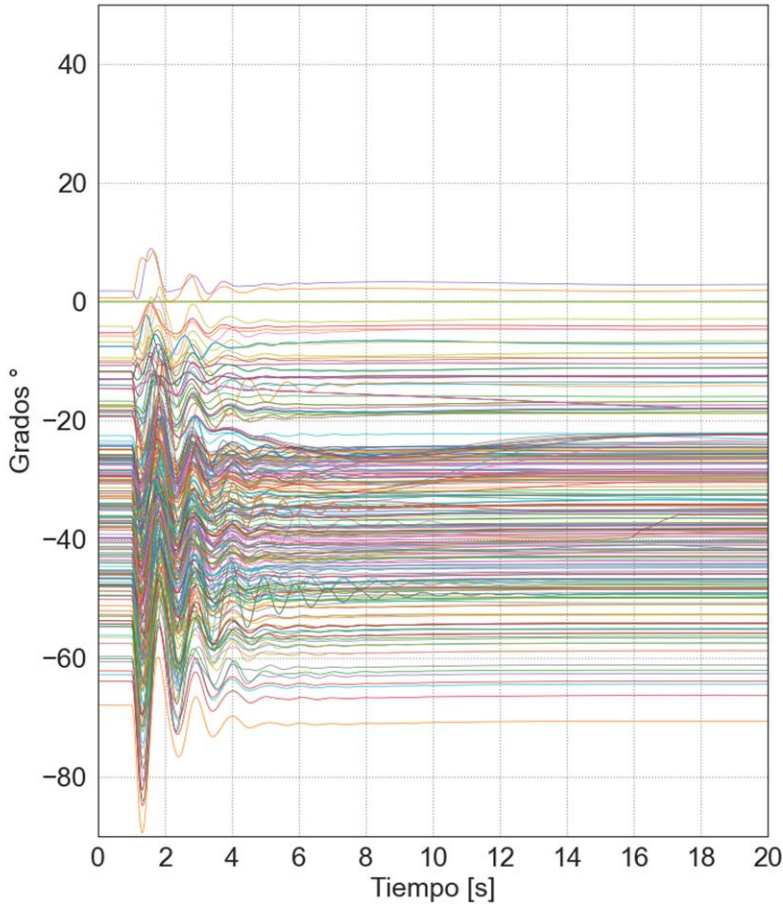
Tensión en barras de 500 kV
cortocircuito en Bacata - Primavera 1 500 T2

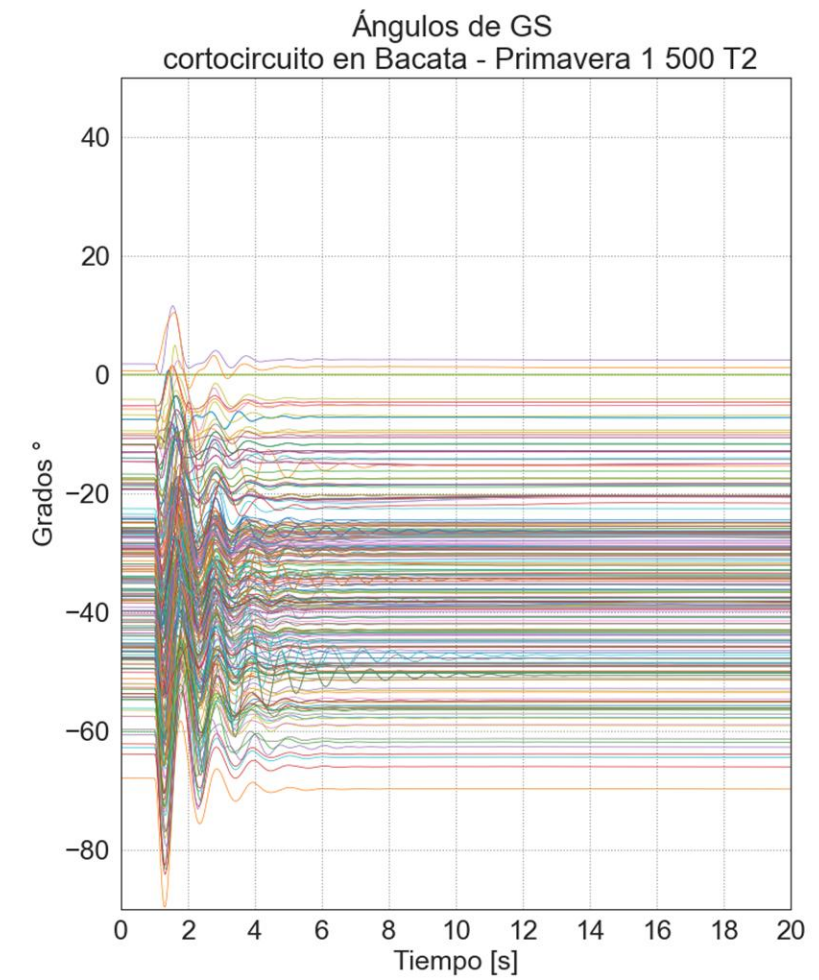
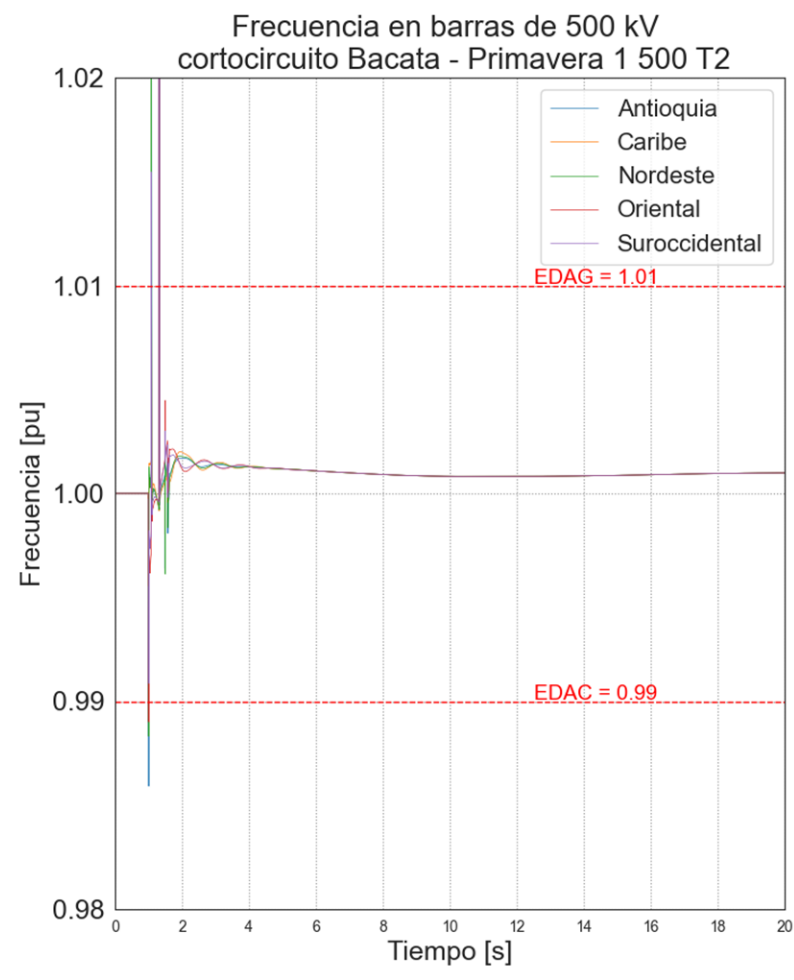
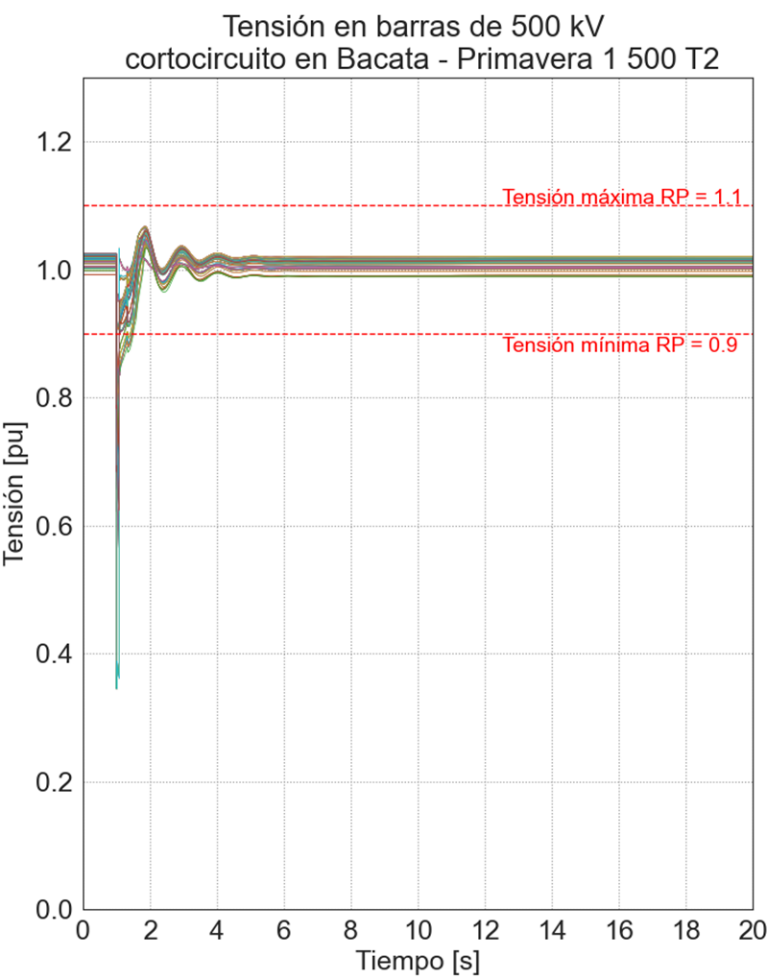


Frecuencia en barras de 500 kV
cortocircuito Bacata - Primavera 1 500 T2

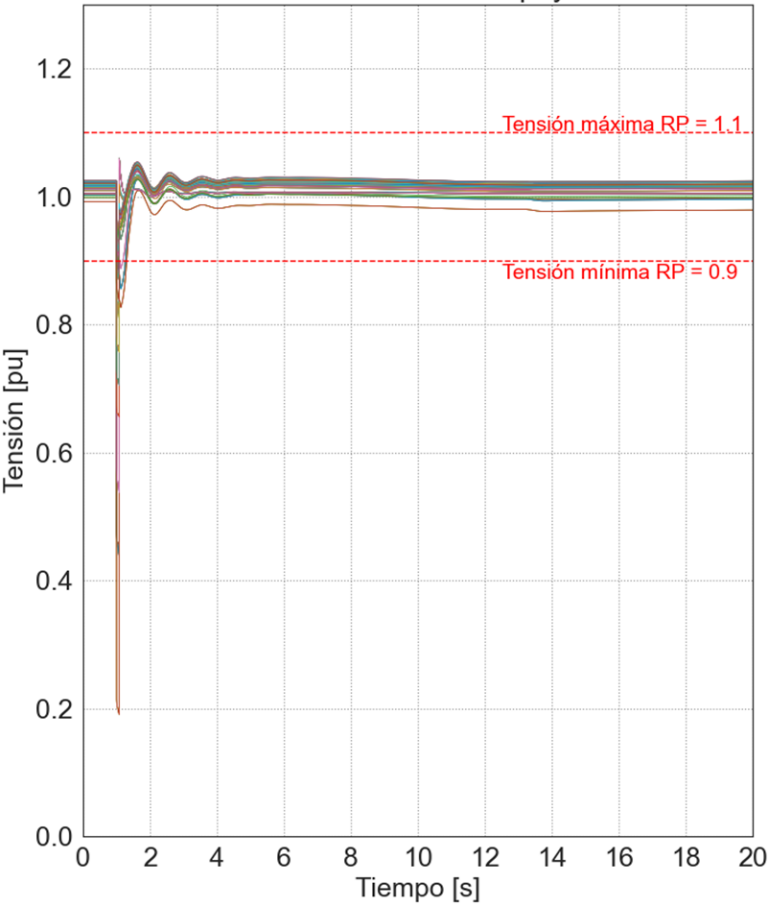


Ángulos de GS
cortocircuito en Bacata - Primavera 1 500 T2

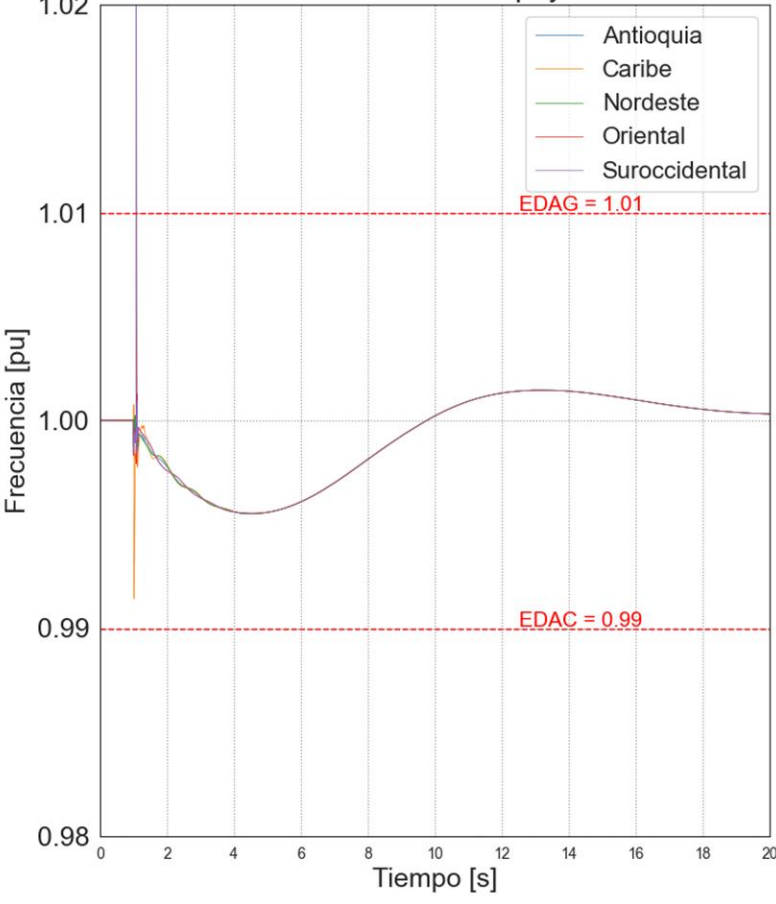




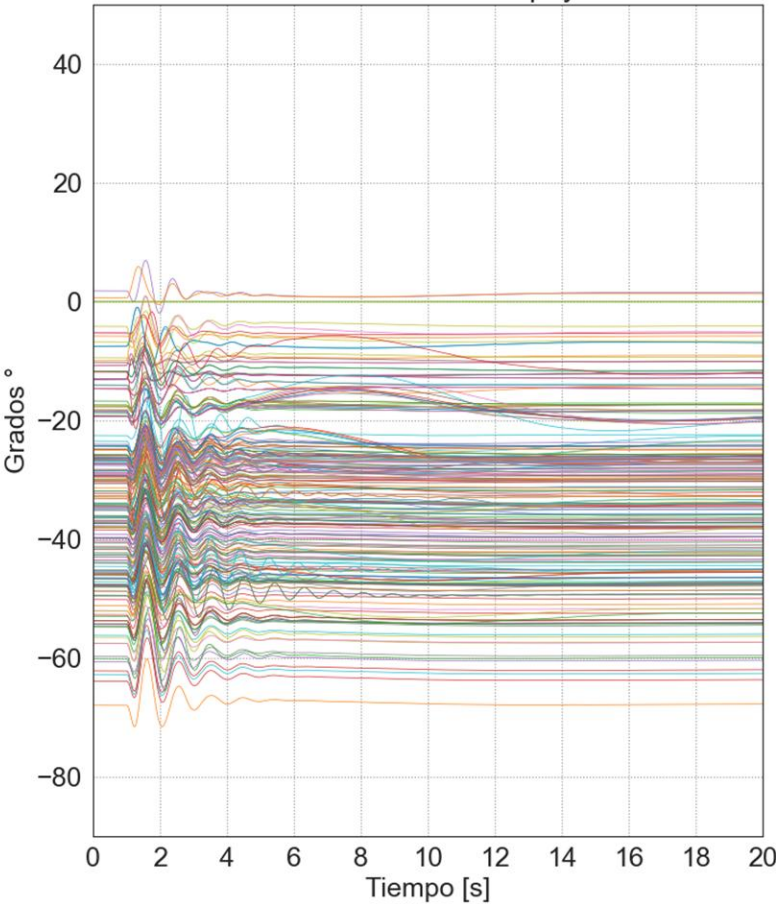
Tensión en barras de 500 kV
cortocircuito en Bolivar - Copey 1 500 T2



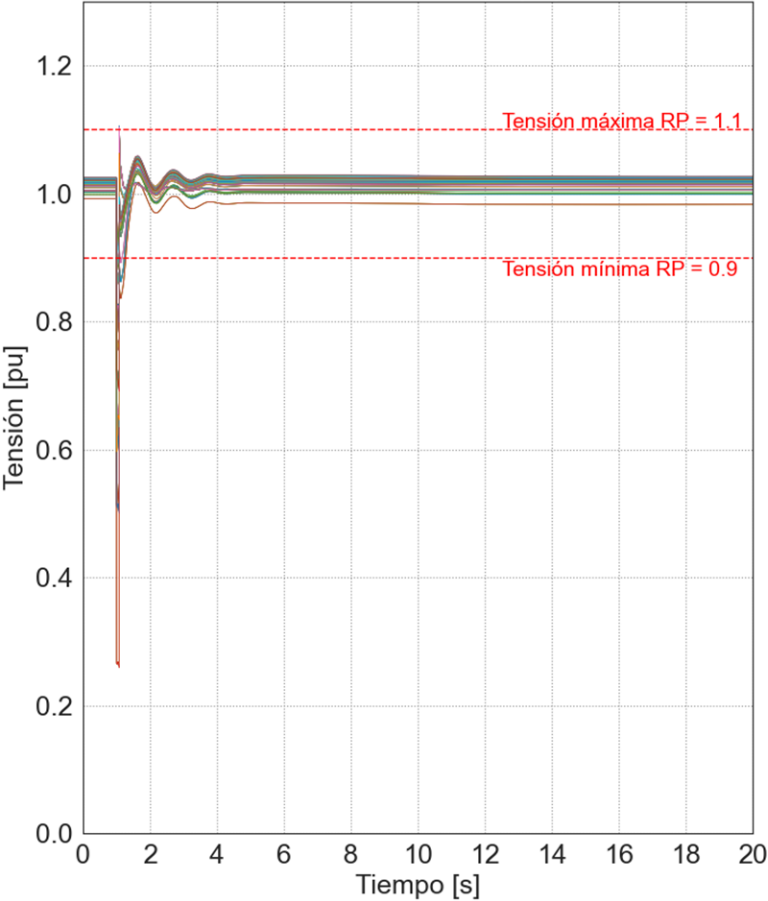
Frecuencia en barras de 500 kV
cortocircuito Bolivar - Copey 1 500 T2



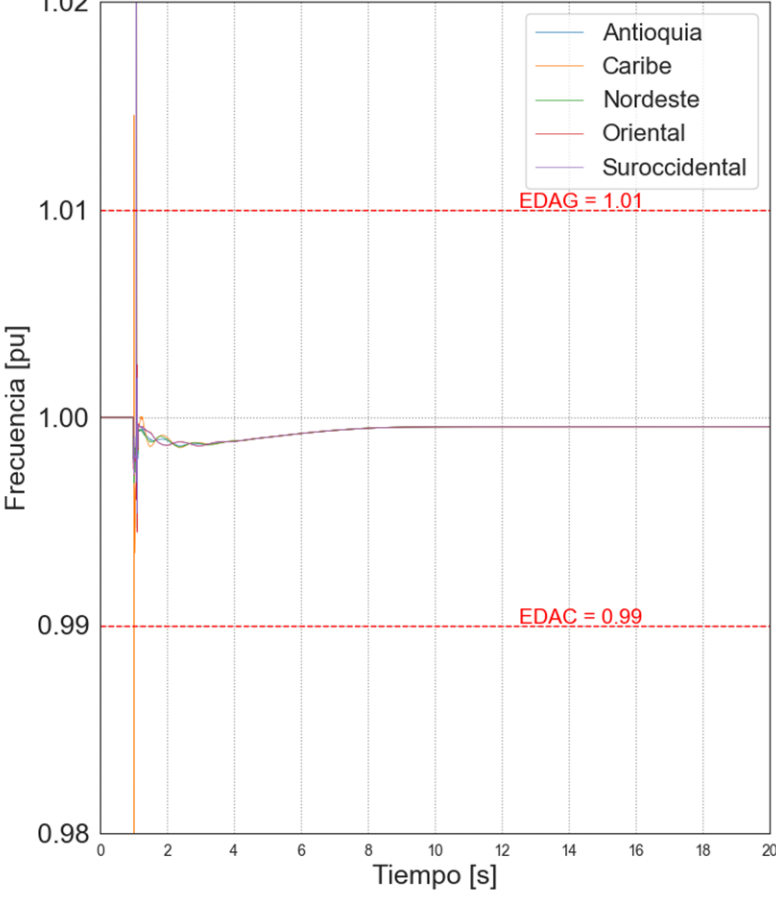
Ángulos de GS
cortocircuito en Bolivar - Copey 1 500 T2



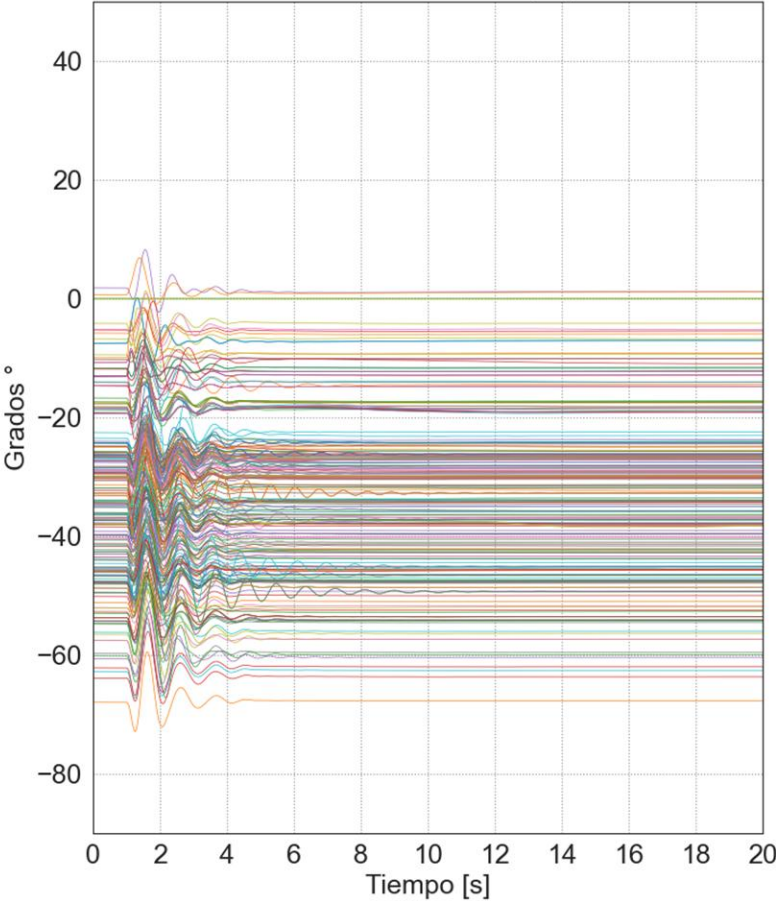
Tensión en barras de 500 kV
cortocircuito en Bolivar - Copey 1 500 T2



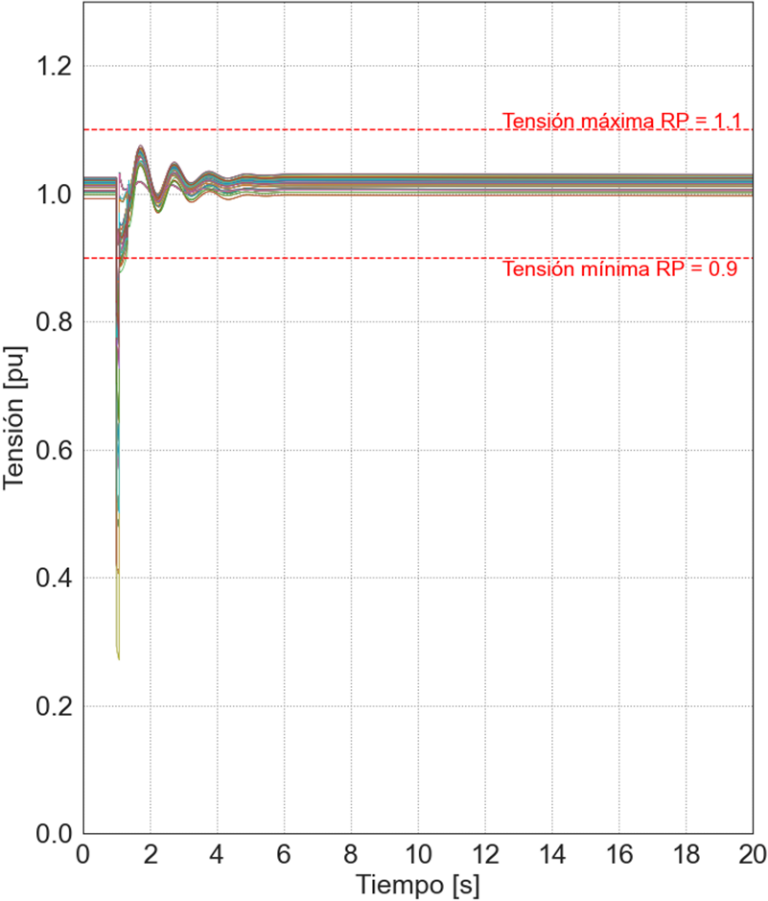
Frecuencia en barras de 500 kV
cortocircuito Bolivar - Copey 1 500 T2



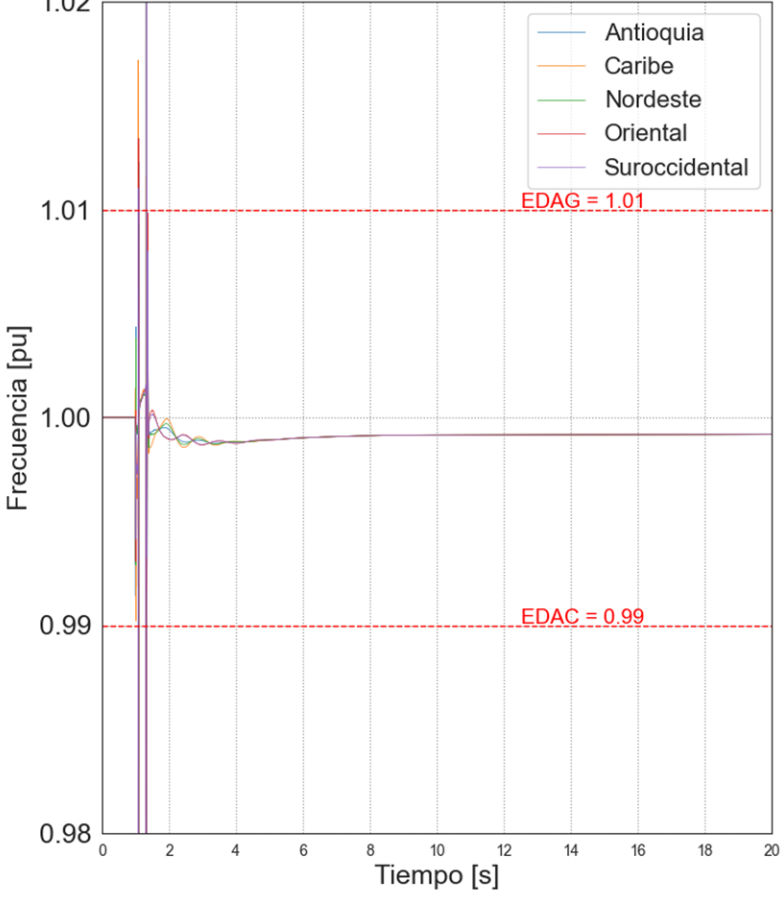
Ángulos de GS
cortocircuito en Bolivar - Copey 1 500 T2



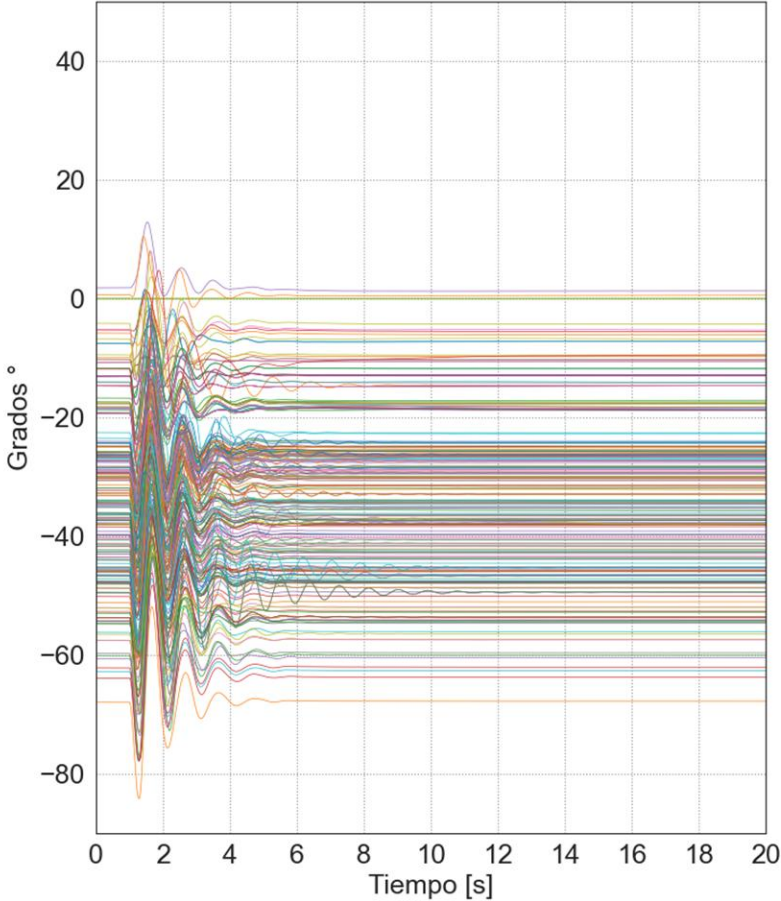
Tensión en barras de 500 kV
cortocircuito en Cerro - Sahagun 1 500



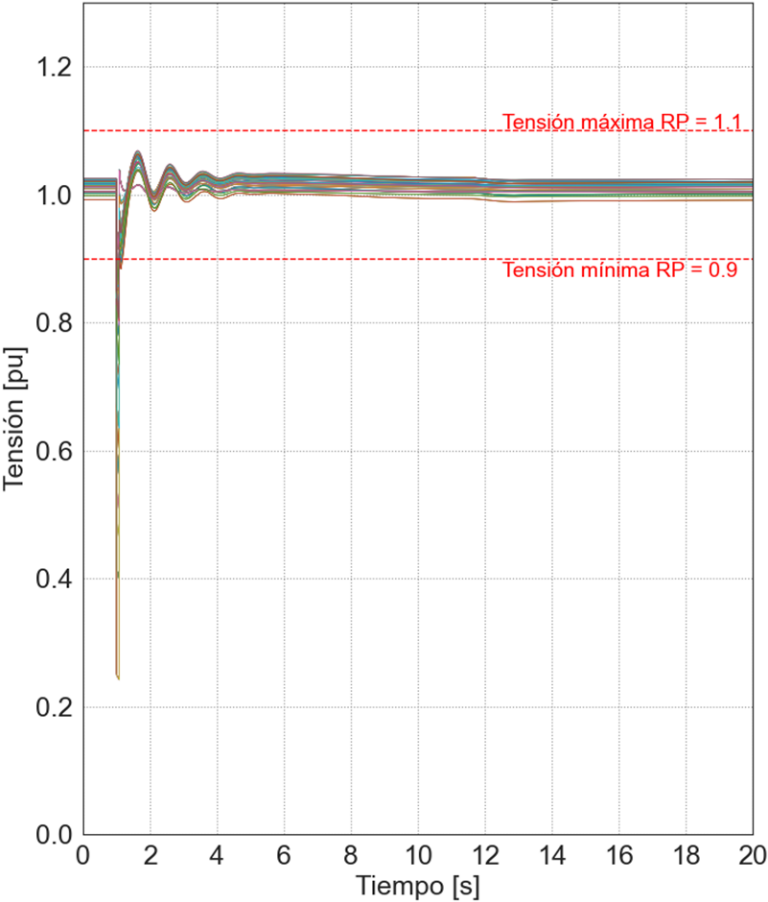
Frecuencia en barras de 500 kV
cortocircuito Cerro - Sahagun 1 500



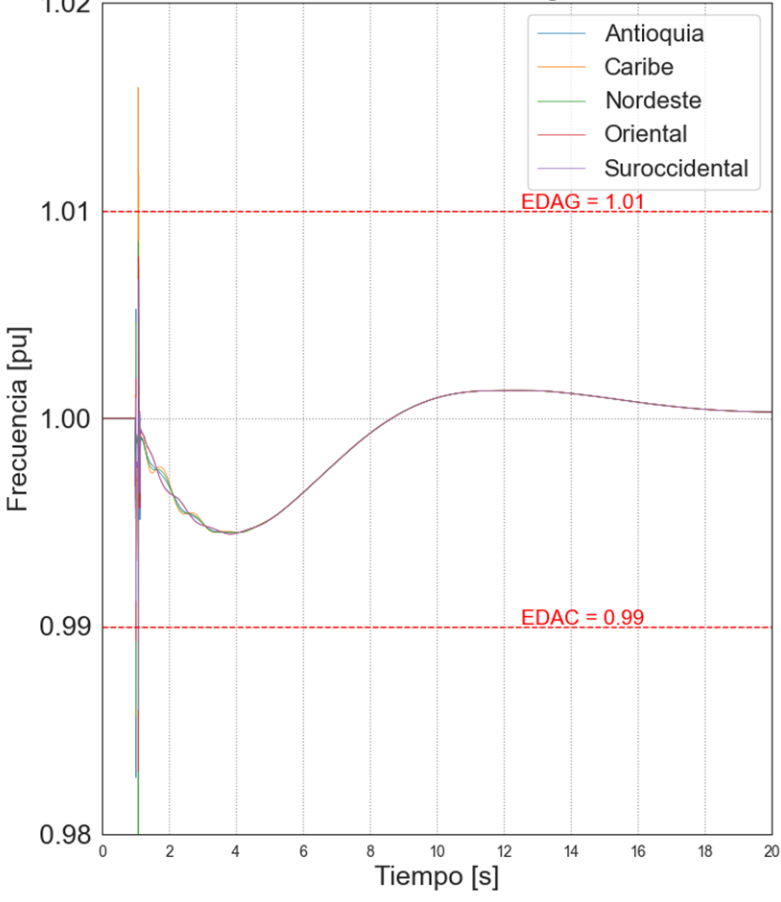
Ángulos de GS
cortocircuito en Cerro - Sahagun 1 500



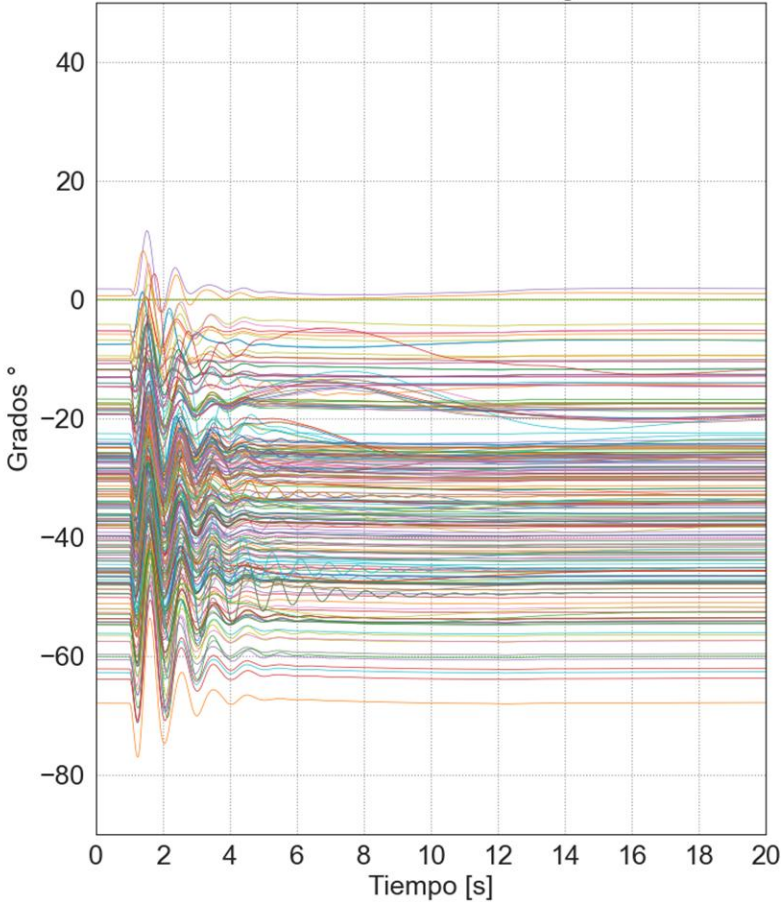
Tensión en barras de 500 kV
cortocircuito en Cerro - Sahagun 1 500



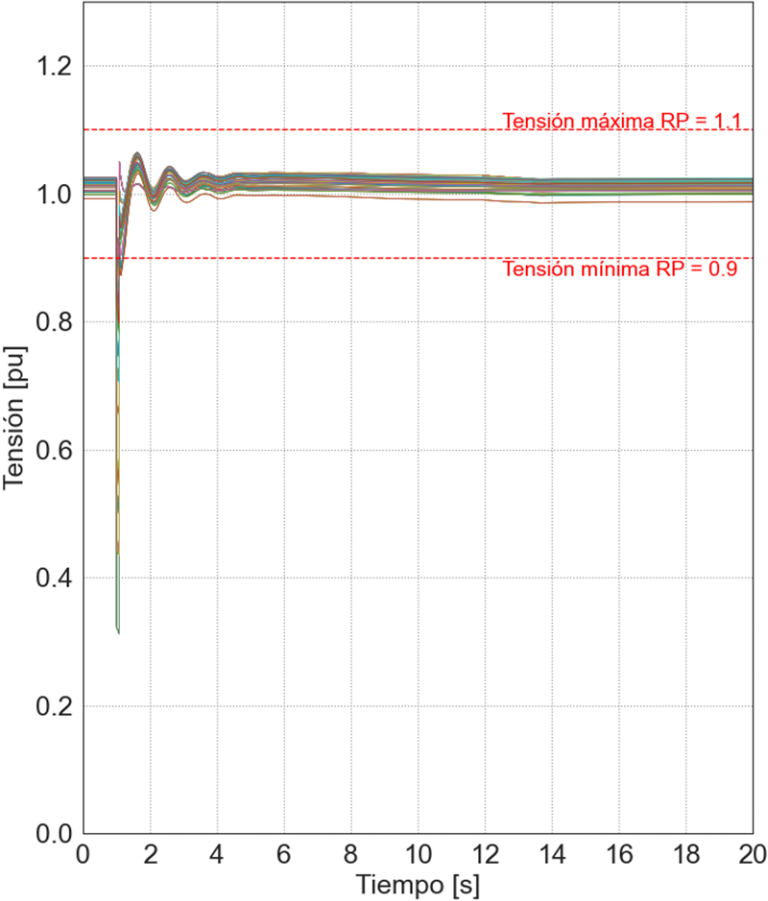
Frecuencia en barras de 500 kV
cortocircuito Cerro - Sahagun 1 500



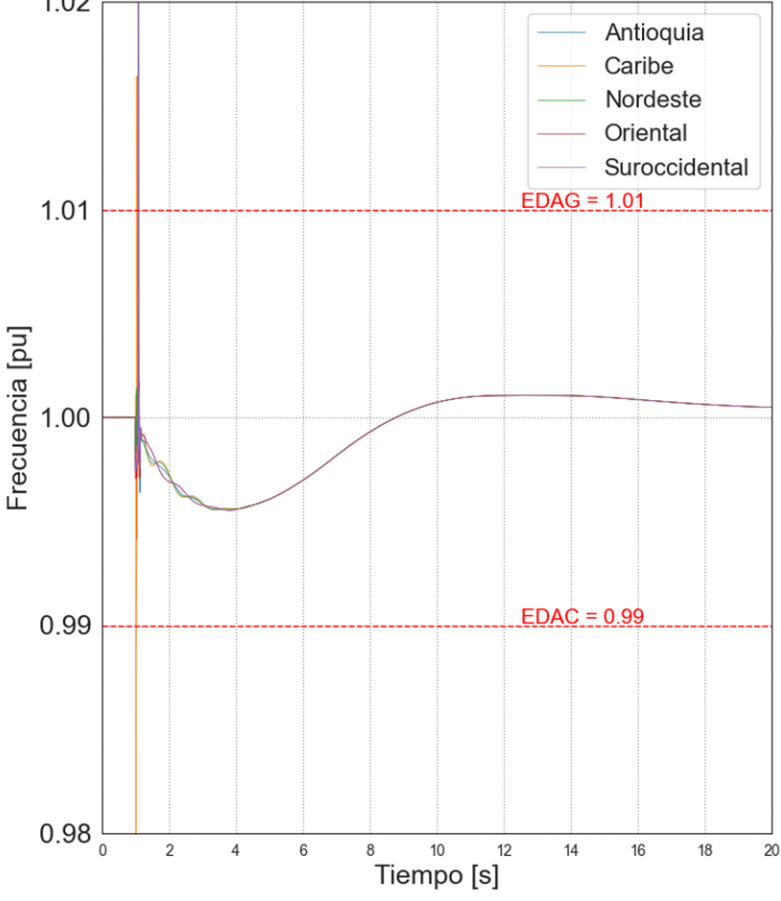
Ángulos de GS
cortocircuito en Cerro - Sahagun 1 500



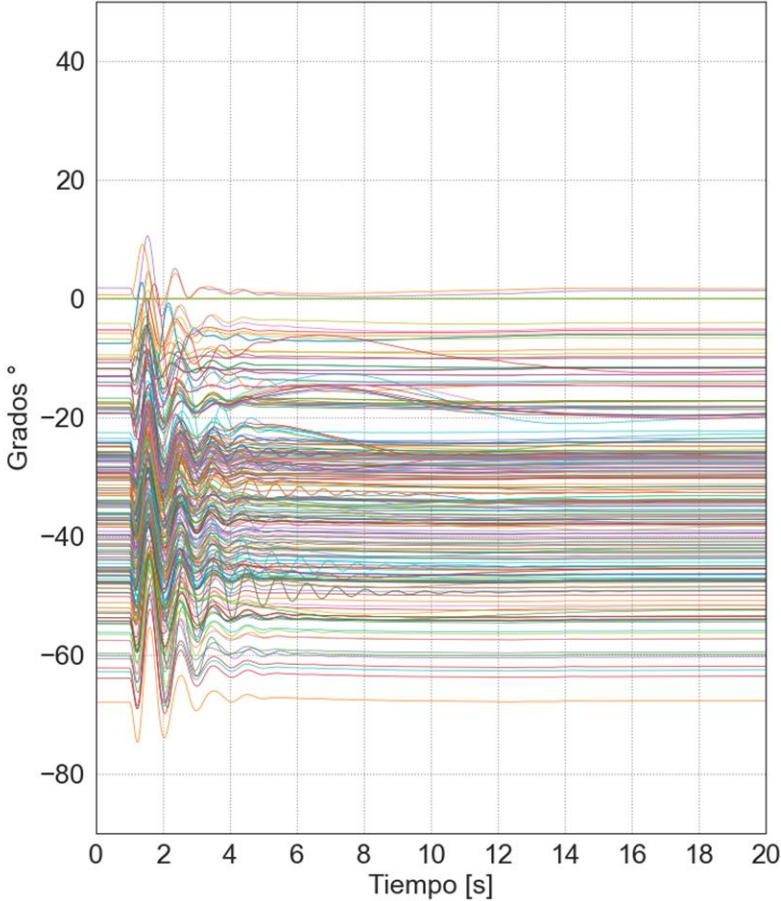
Tensión en barras de 500 kV
cortocircuito en Chinu - Copey 1 500

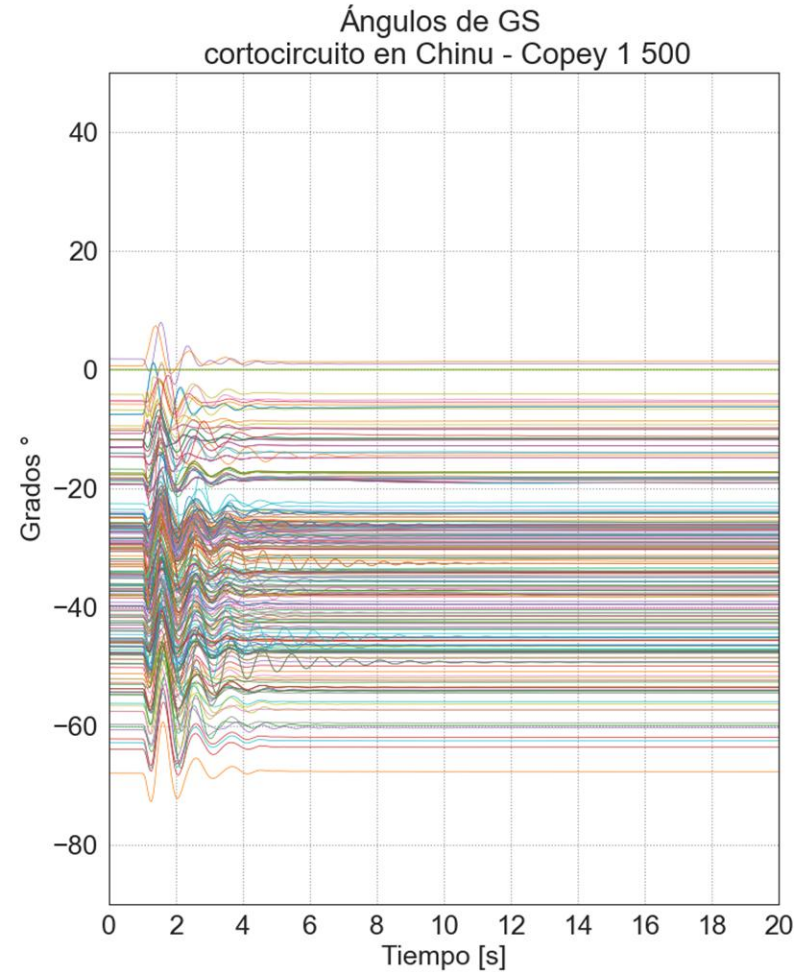
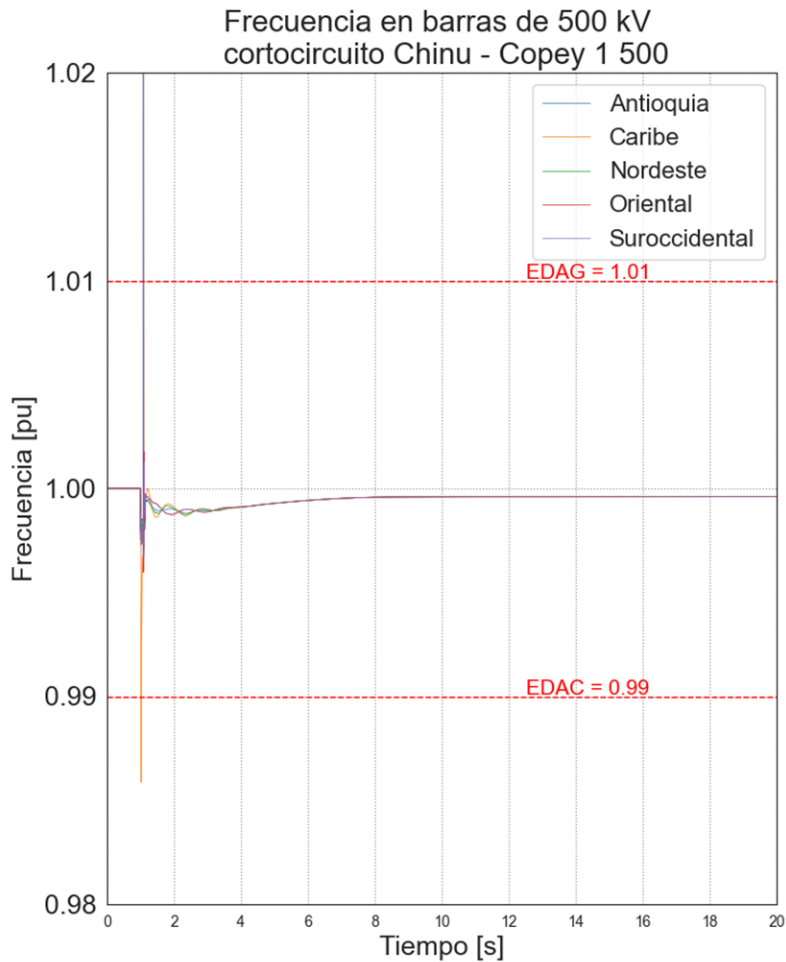
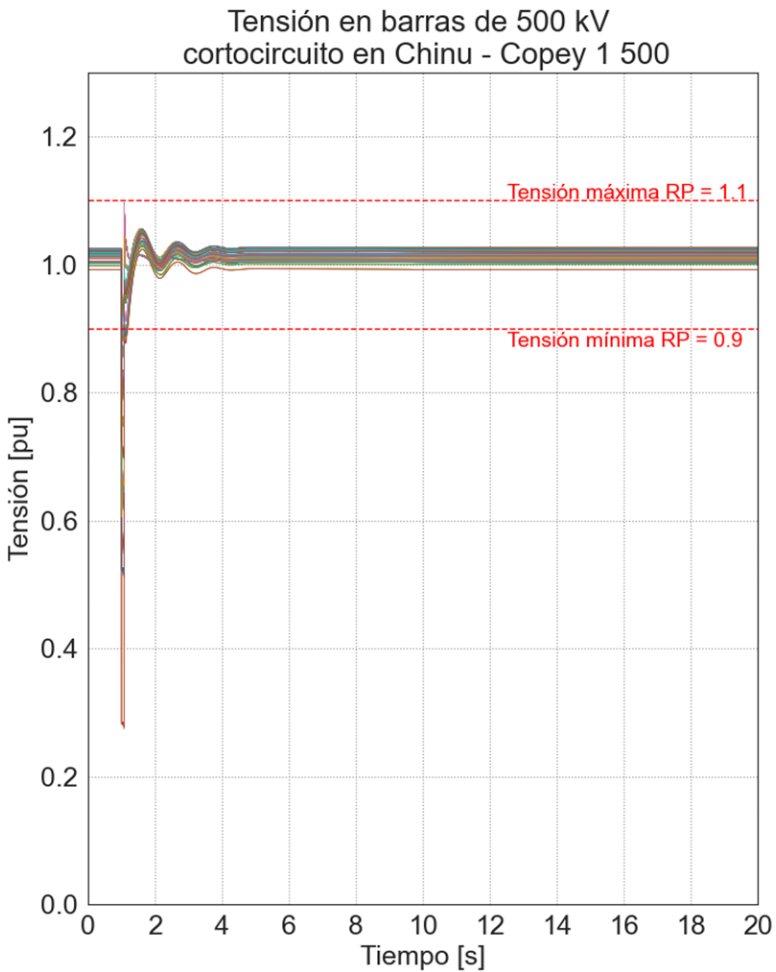


Frecuencia en barras de 500 kV
cortocircuito Chinu - Copey 1 500

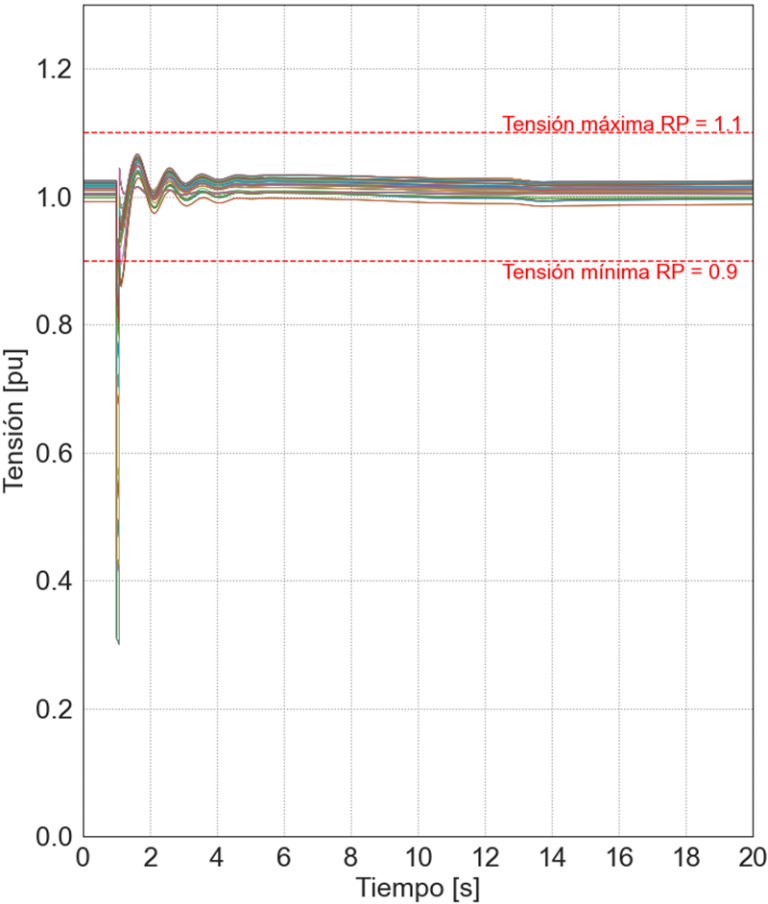


Ángulos de GS
cortocircuito en Chinu - Copey 1 500

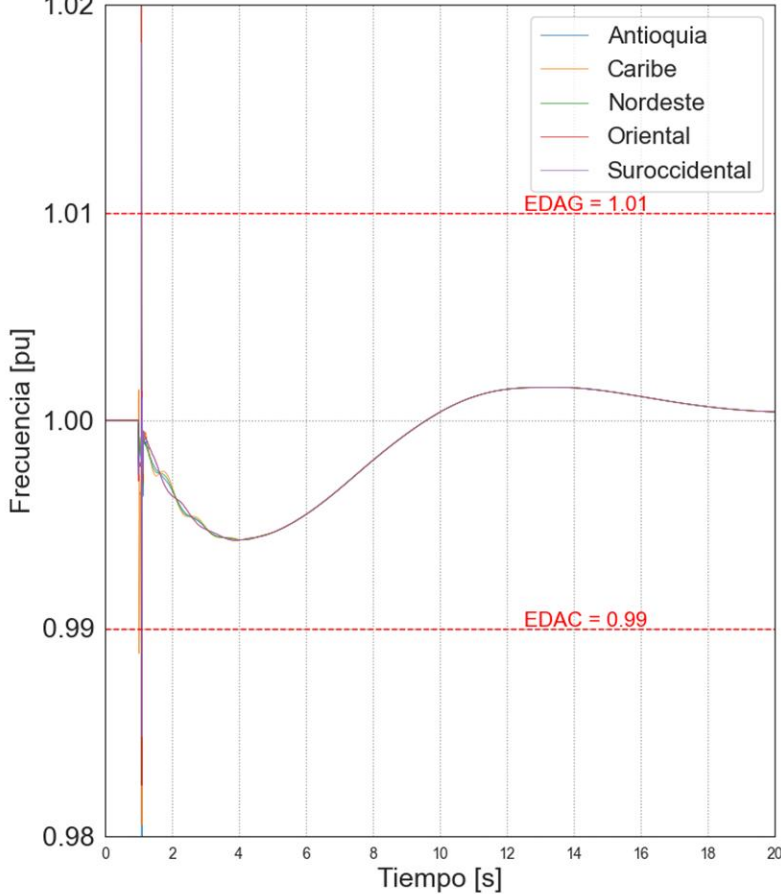




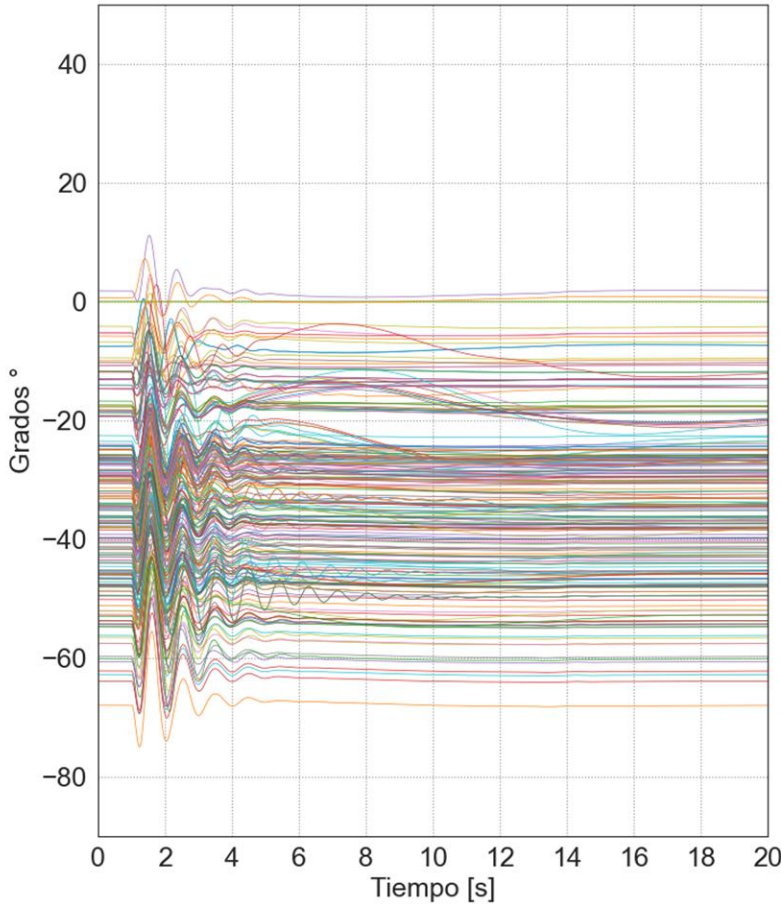
Tensión en barras de 500 kV
cortocircuito en Chinu - Sabana 2 500 T2

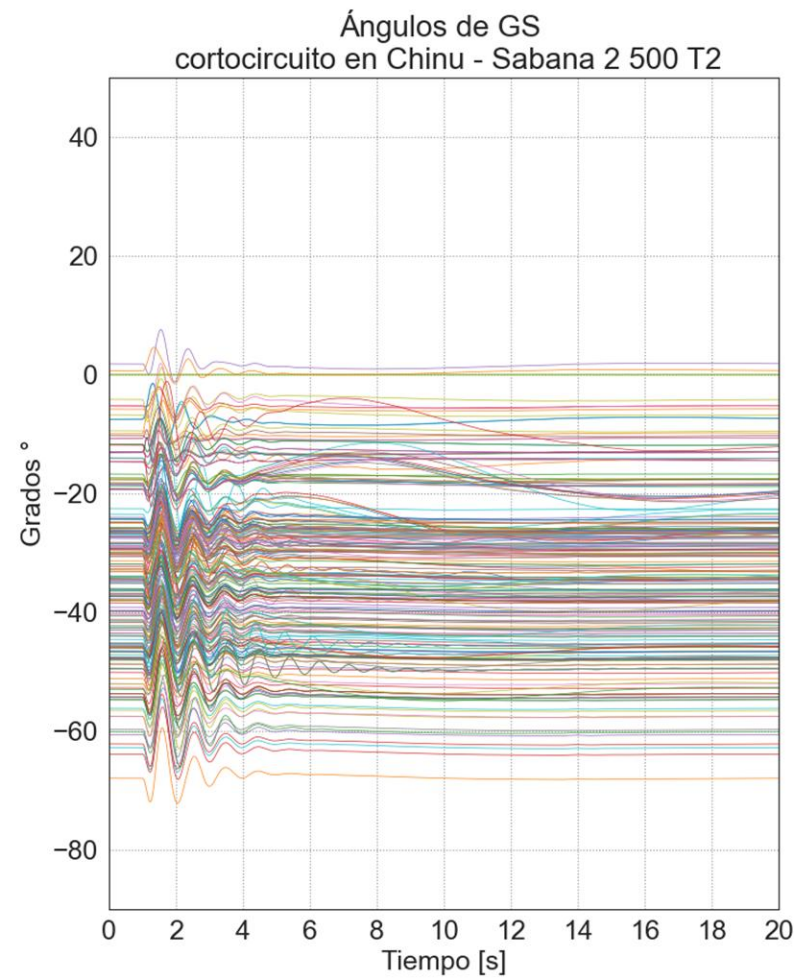
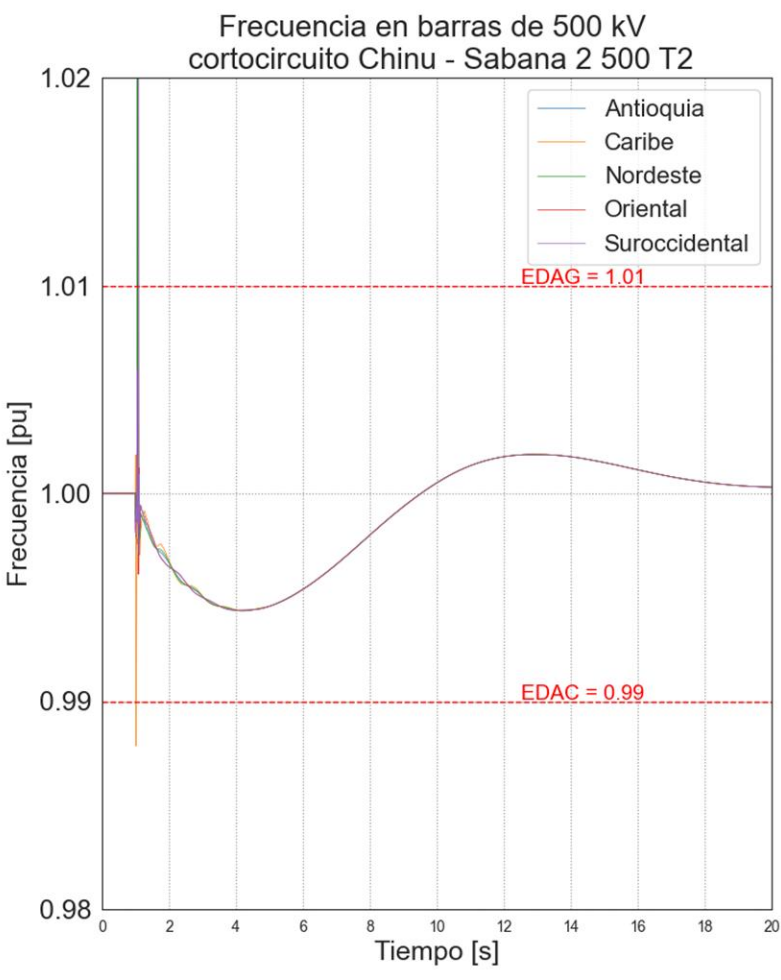
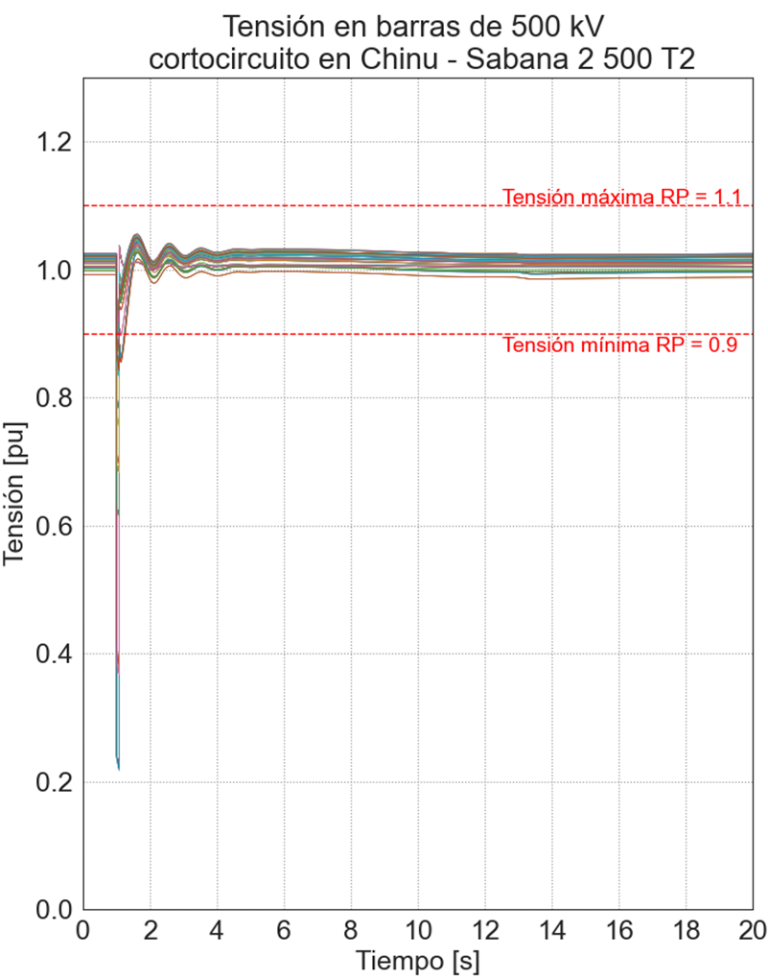


Frecuencia en barras de 500 kV
cortocircuito Chinu - Sabana 2 500 T2

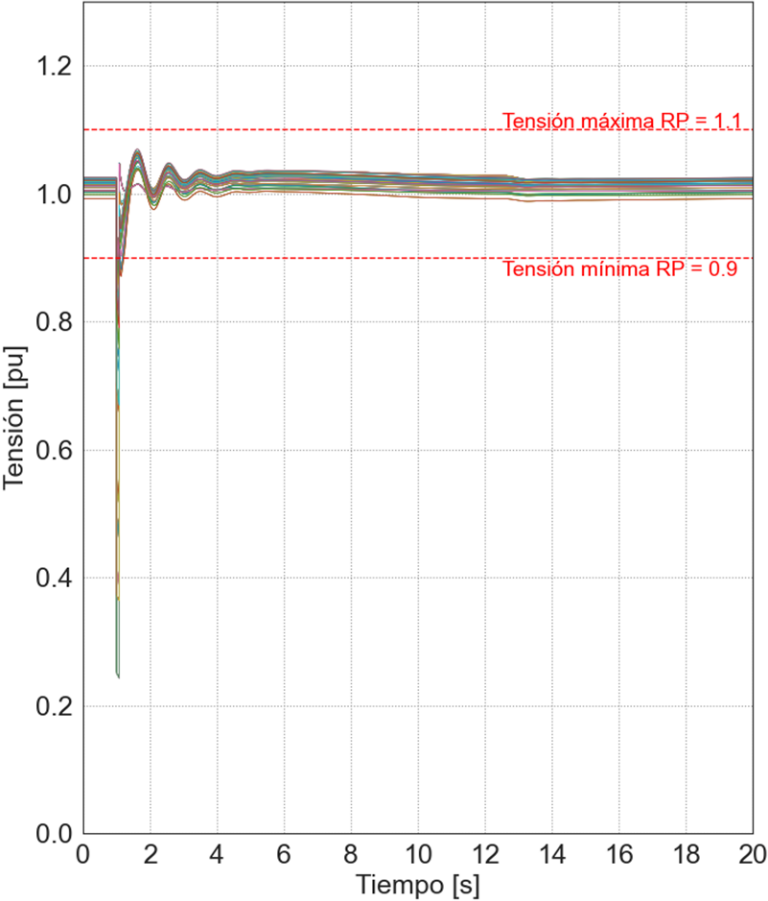


Ángulos de GS
cortocircuito en Chinu - Sabana 2 500 T2

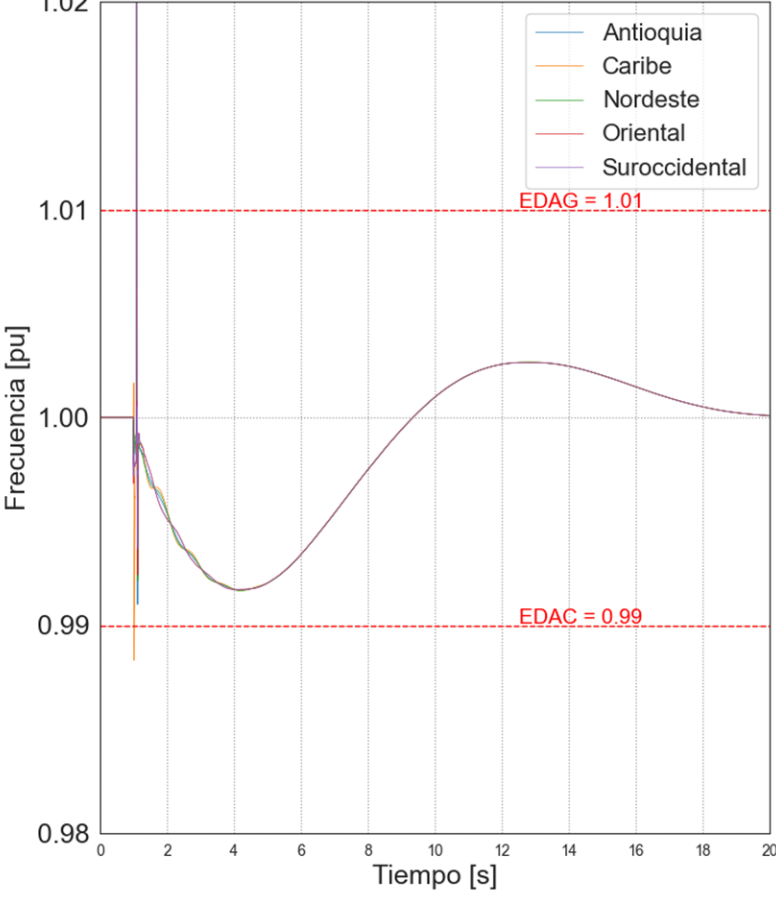




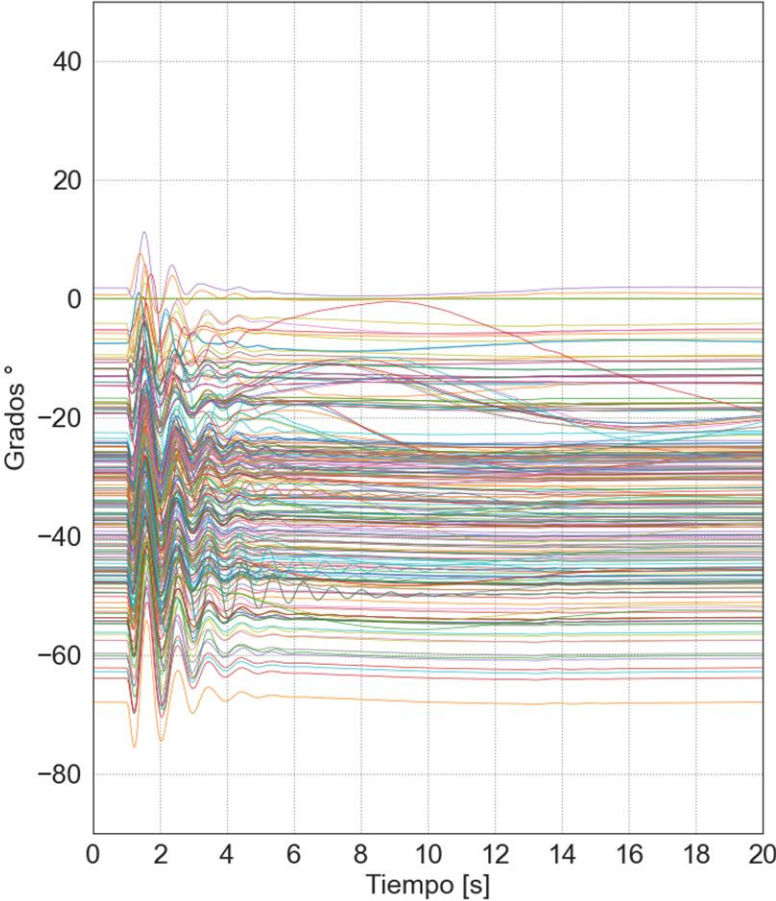
Tensión en barras de 500 kV
cortocircuito en Chinu - Sahagun 1 500



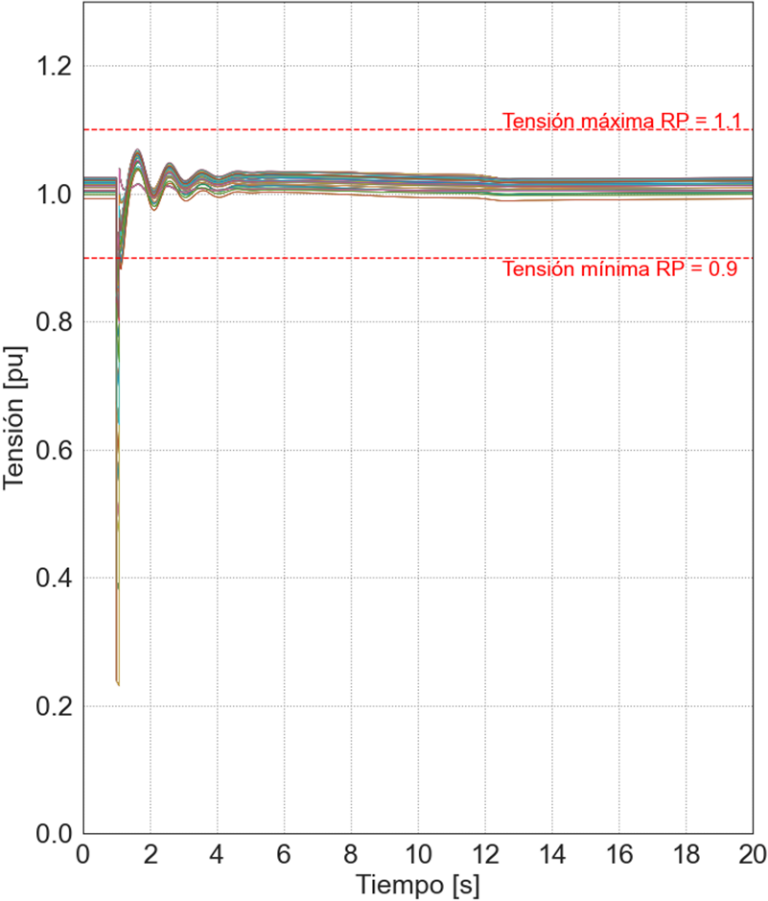
Frecuencia en barras de 500 kV
cortocircuito Chinu - Sahagun 1 500



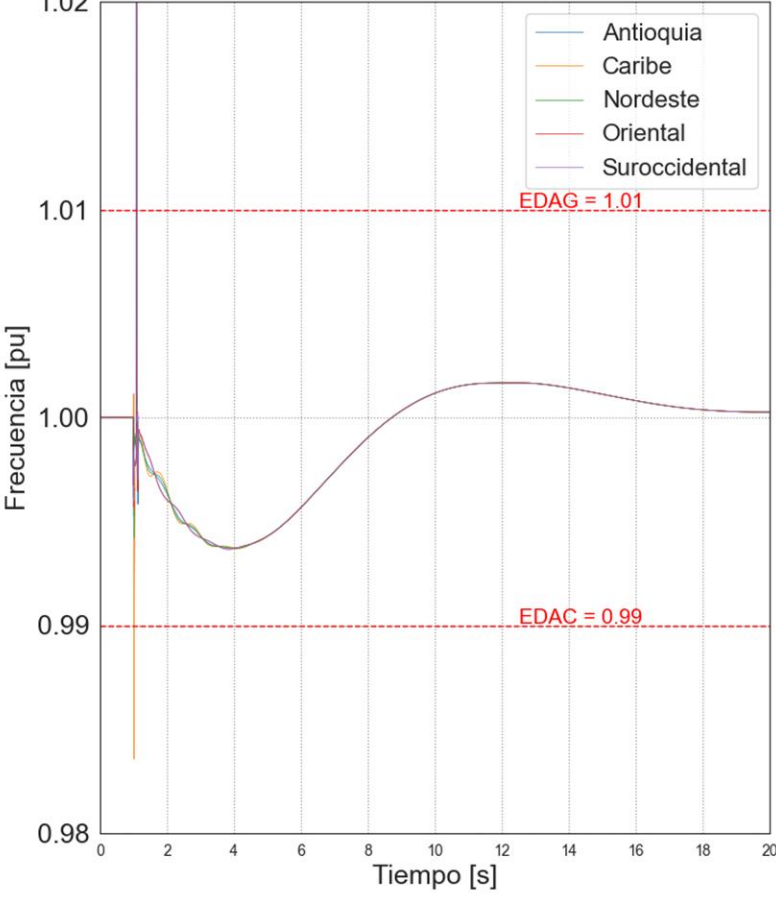
Ángulos de GS
cortocircuito en Chinu - Sahagun 1 500



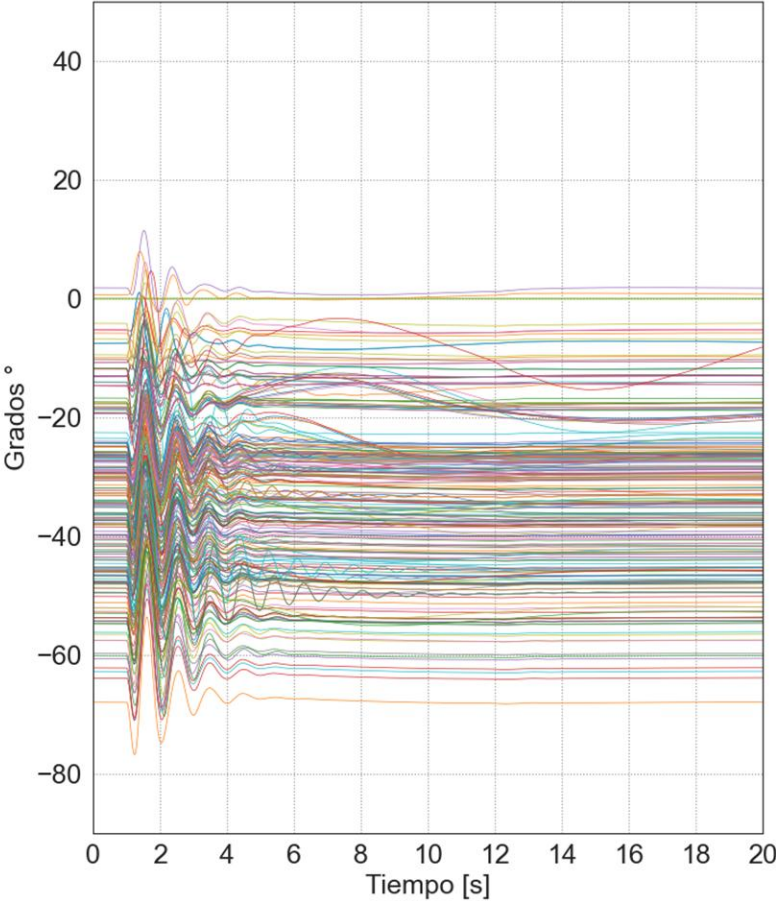
Tensión en barras de 500 kV
cortocircuito en Chinu - Sahagun 1 500



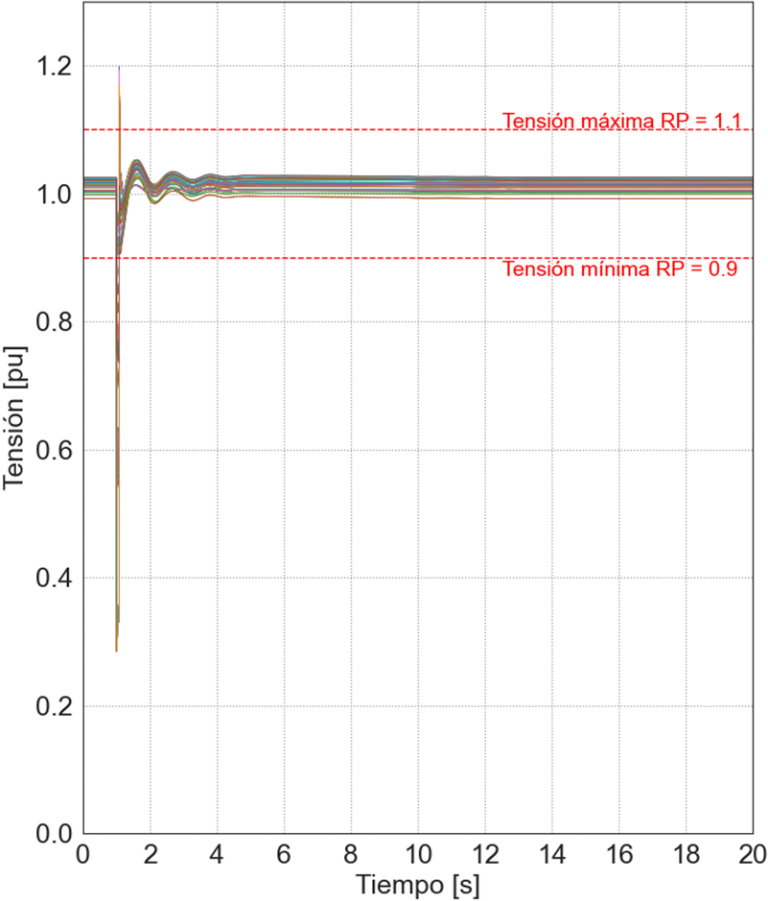
Frecuencia en barras de 500 kV
cortocircuito Chinu - Sahagun 1 500



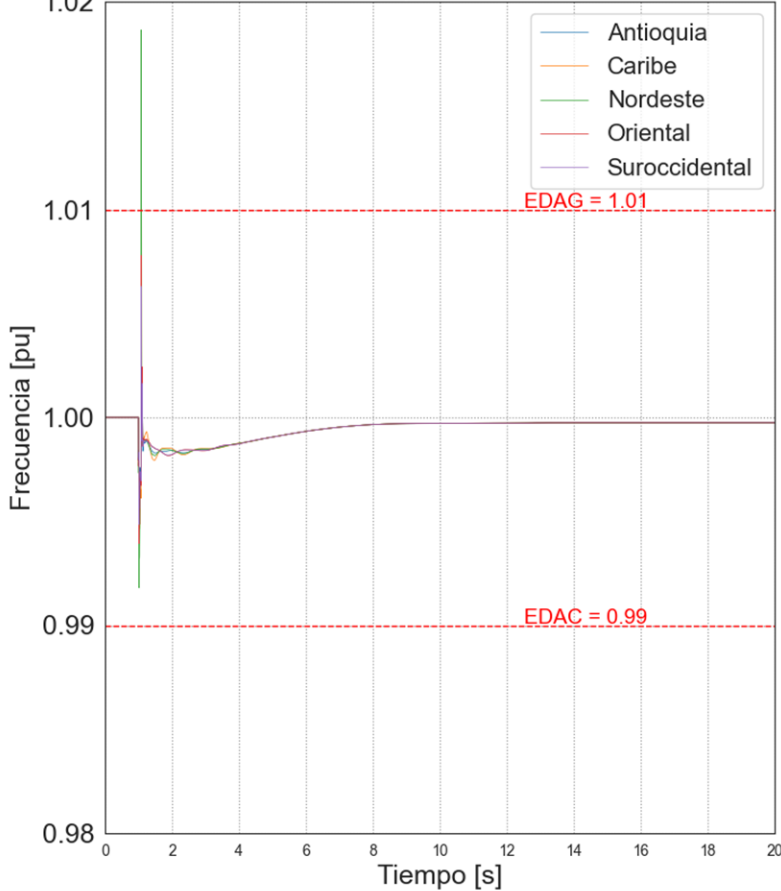
Ángulos de GS
cortocircuito en Chinu - Sahagun 1 500



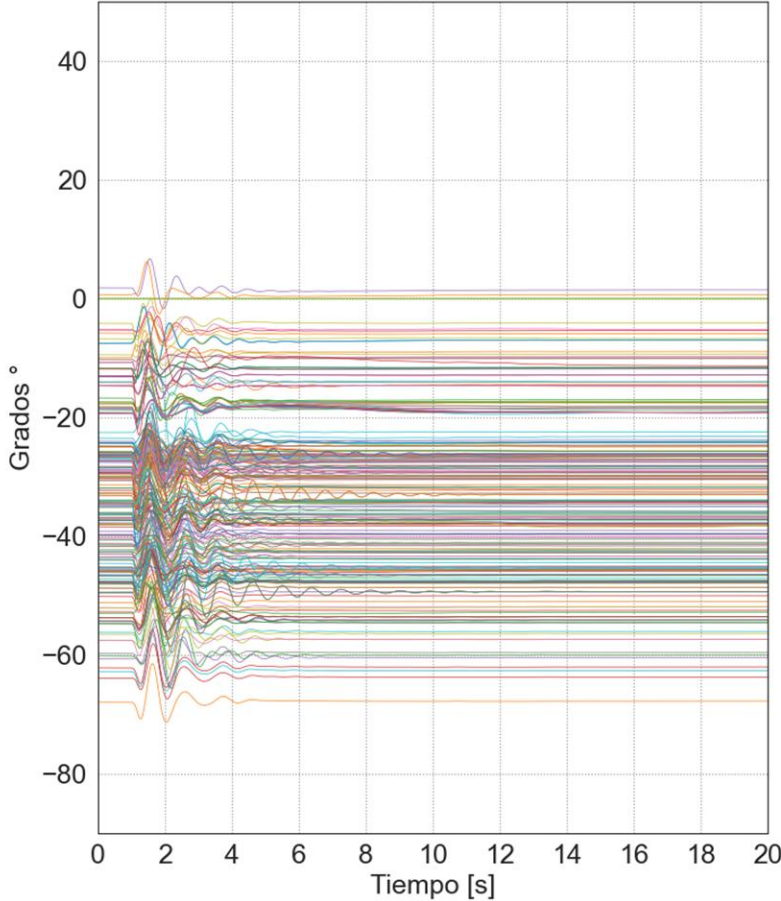
Tensión en barras de 500 kV
cortocircuito en Copey - Cuestecitas 1 500 T2



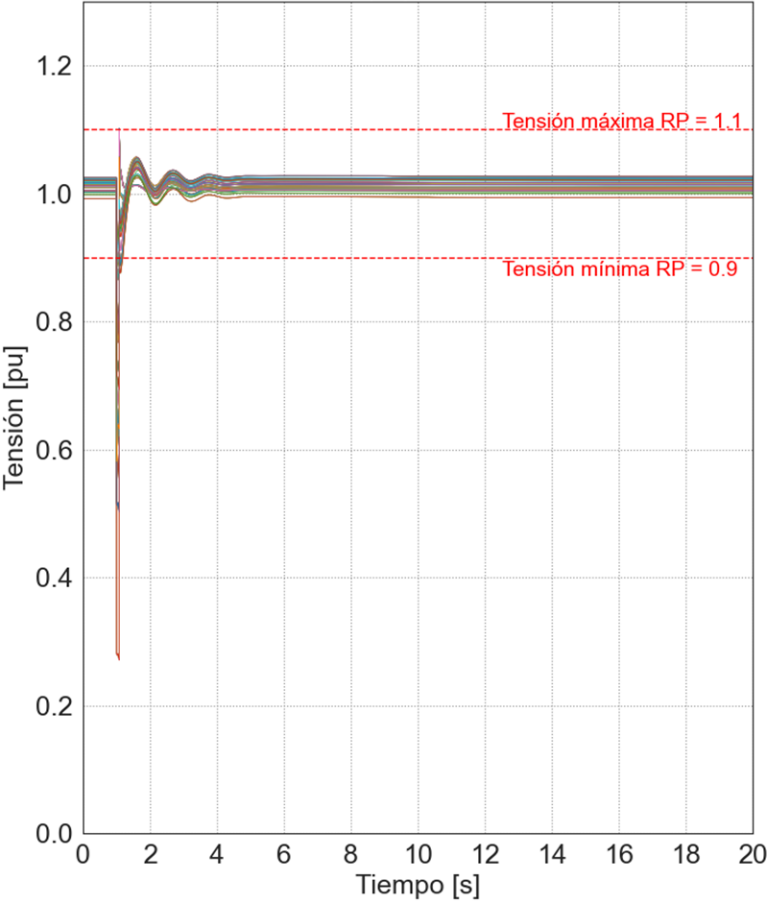
Frecuencia en barras de 500 kV
cortocircuito Copey - Cuestecitas 1 500 T2



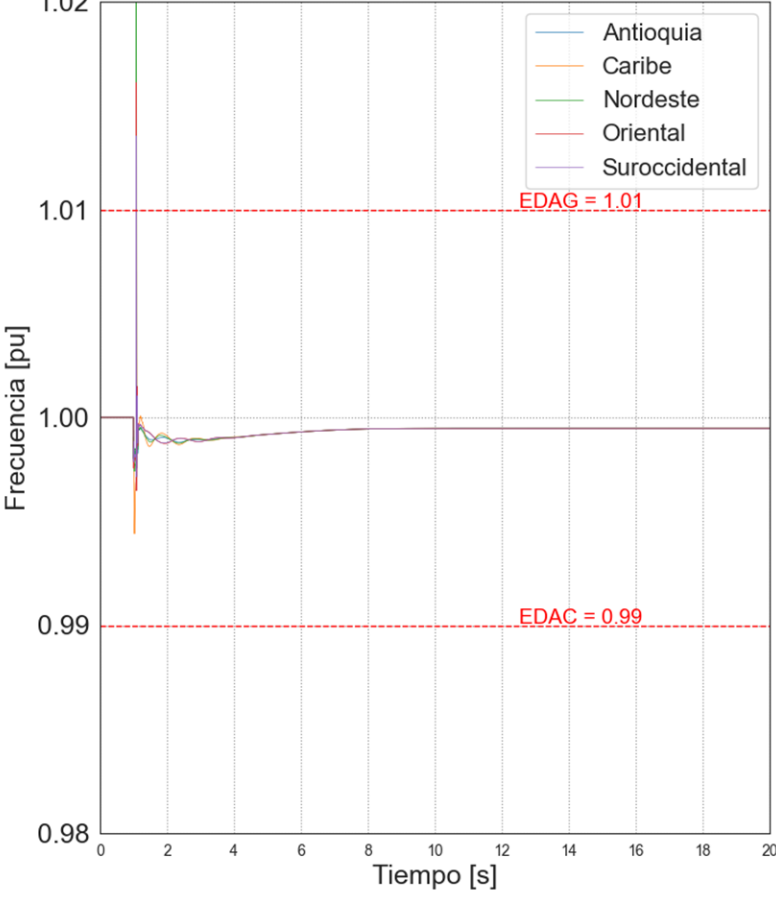
Ángulos de GS
cortocircuito en Copey - Cuestecitas 1 500 T2



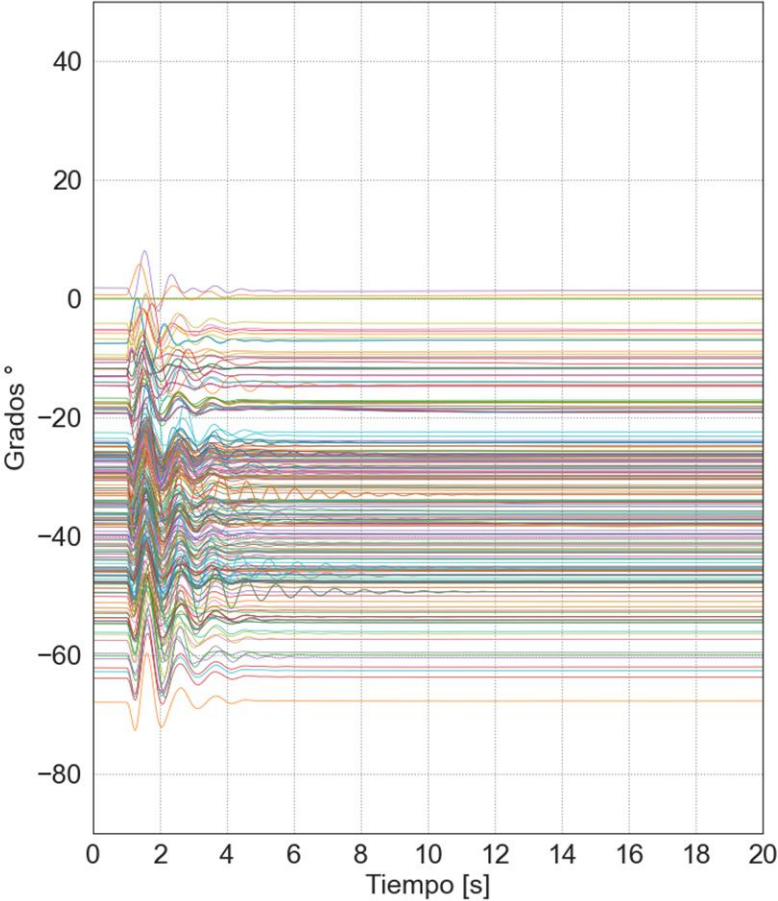
Tensión en barras de 500 kV
cortocircuito en Copey - Cuestecitas 1 500 T2



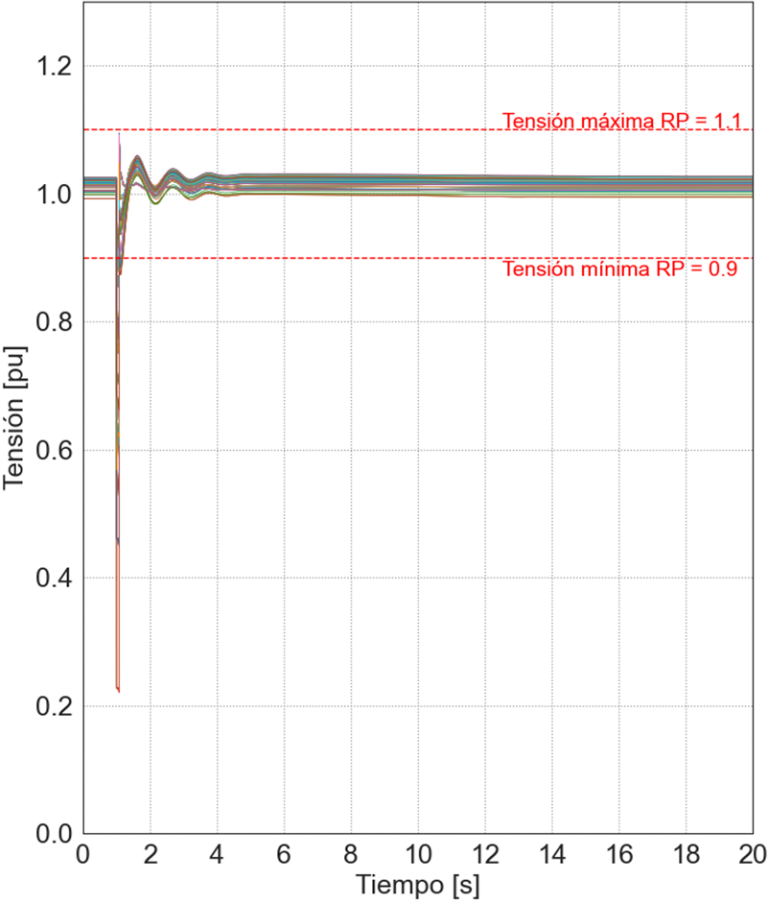
Frecuencia en barras de 500 kV
cortocircuito Copey - Cuestecitas 1 500 T2



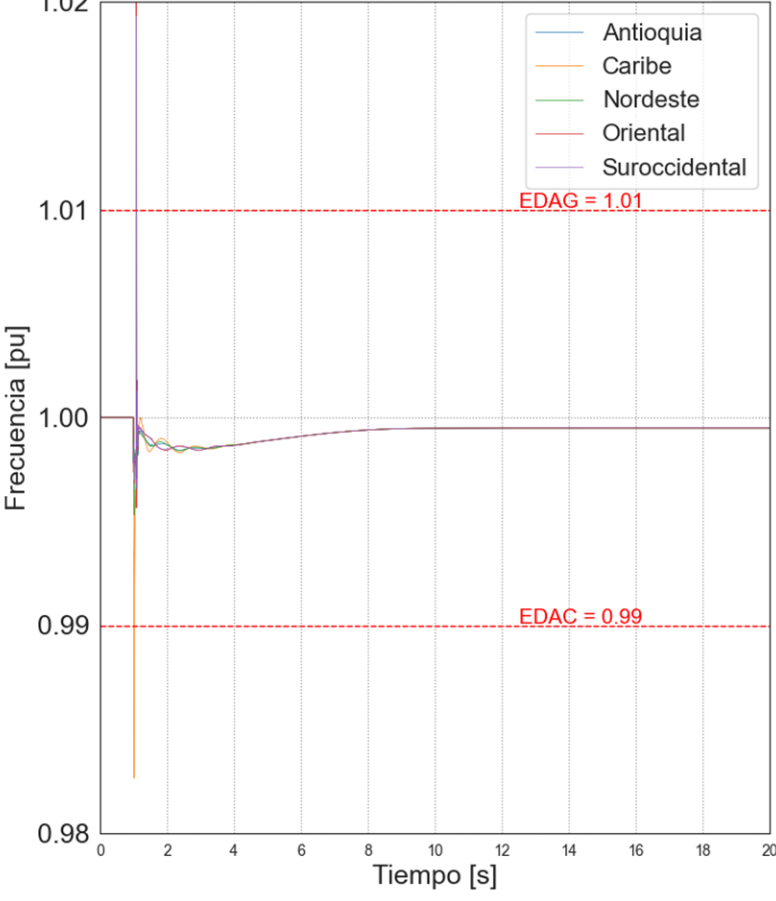
Ángulos de GS
cortocircuito en Copey - Cuestecitas 1 500 T2



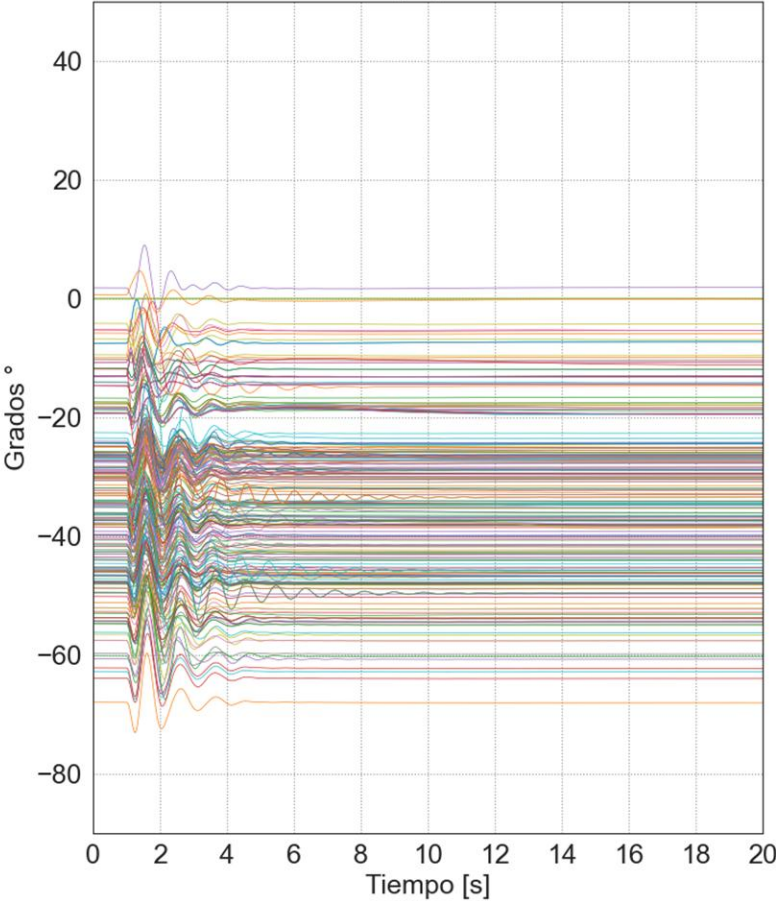
Tensión en barras de 500 kV
cortocircuito en Copey - La Loma 1 500 T2

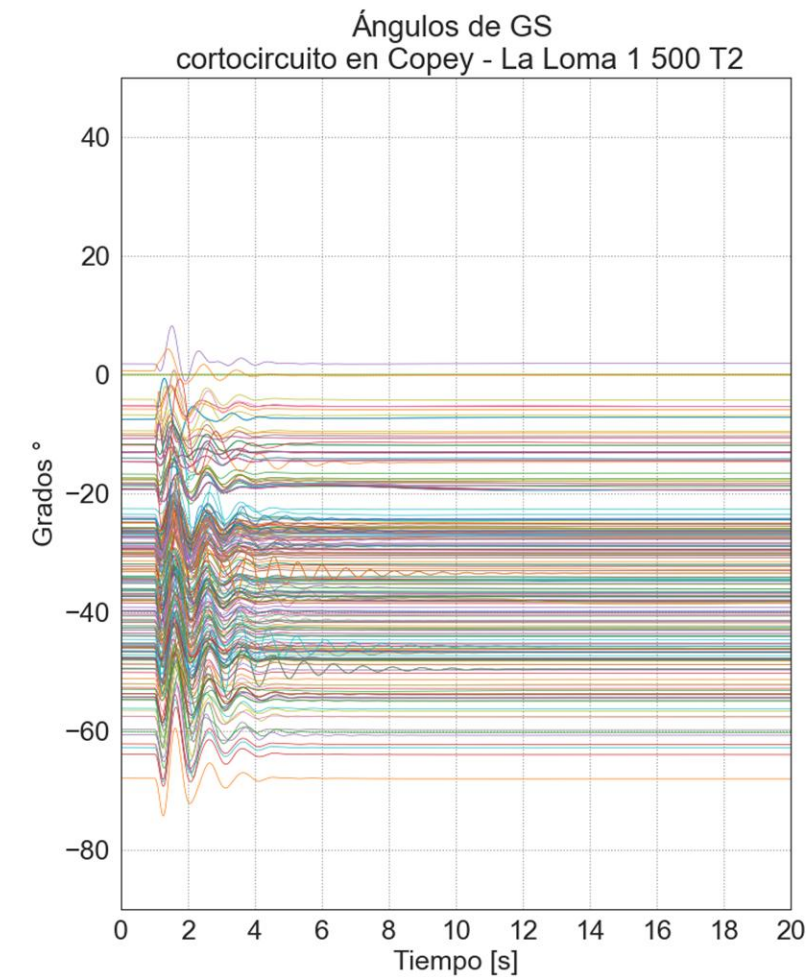
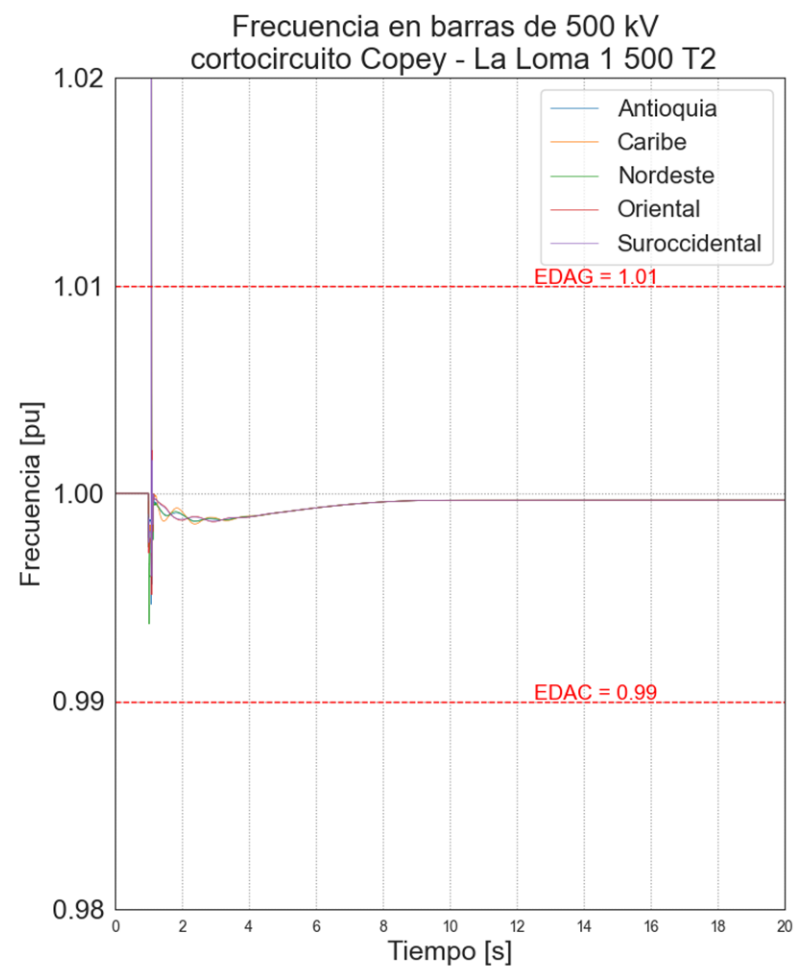
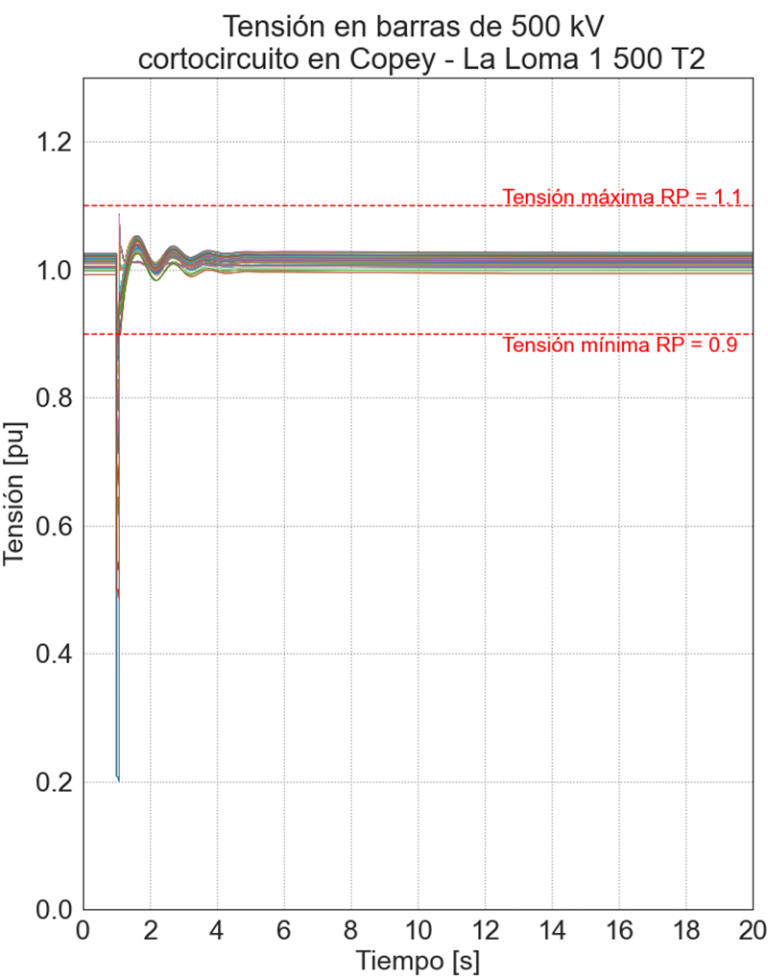


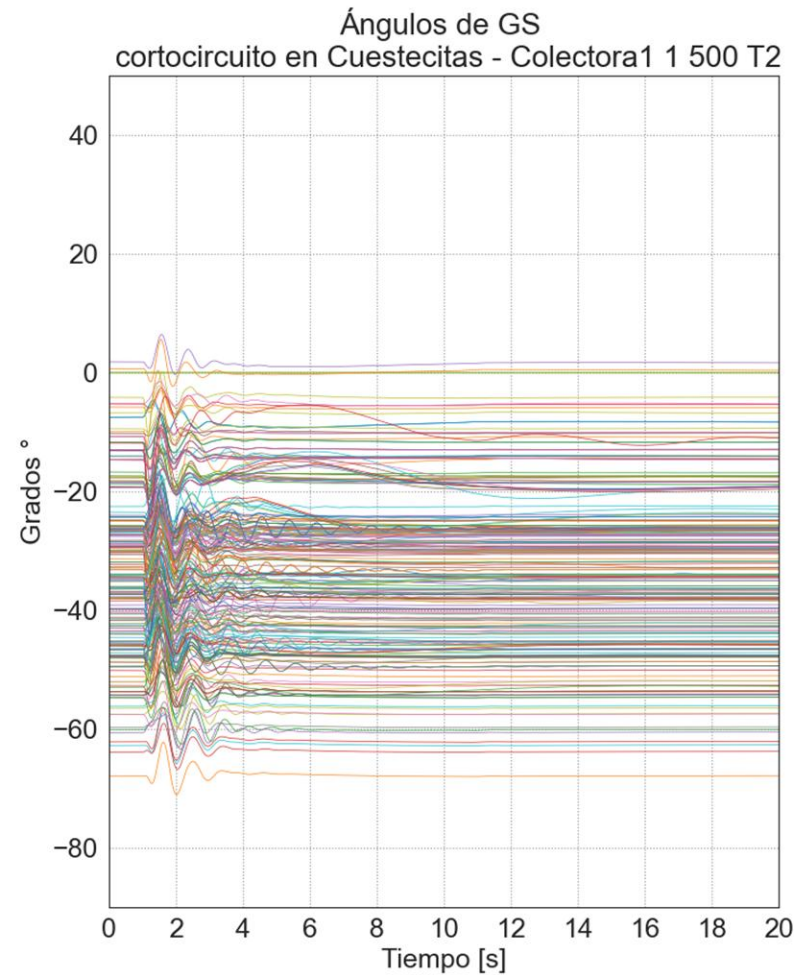
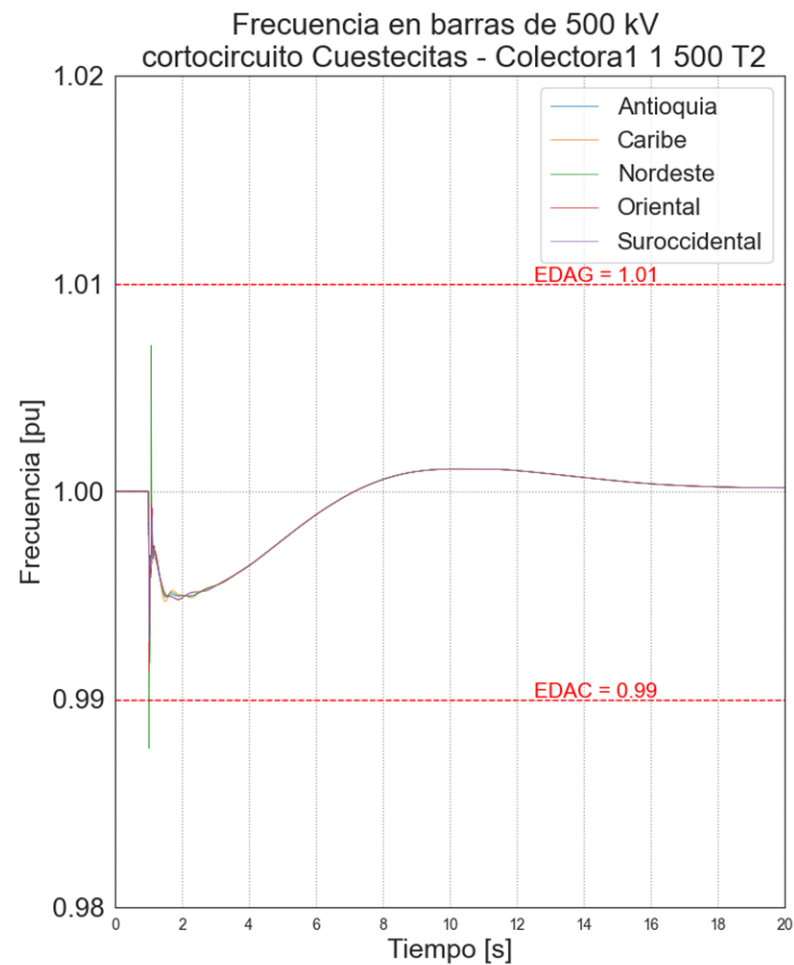
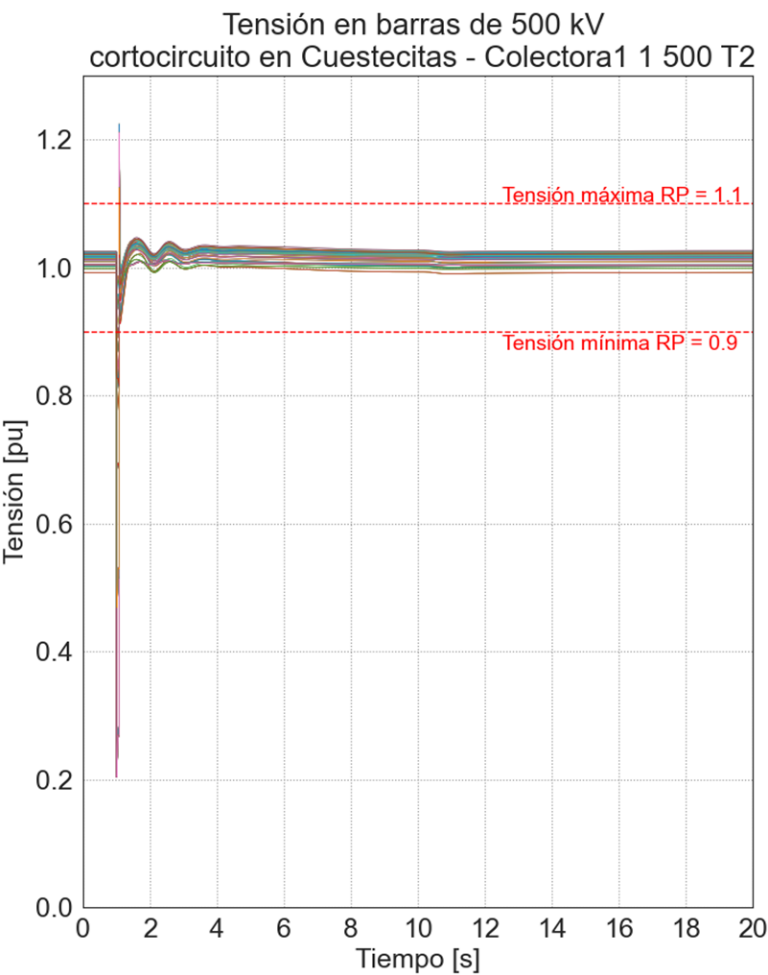
Frecuencia en barras de 500 kV
cortocircuito Copey - La Loma 1 500 T2

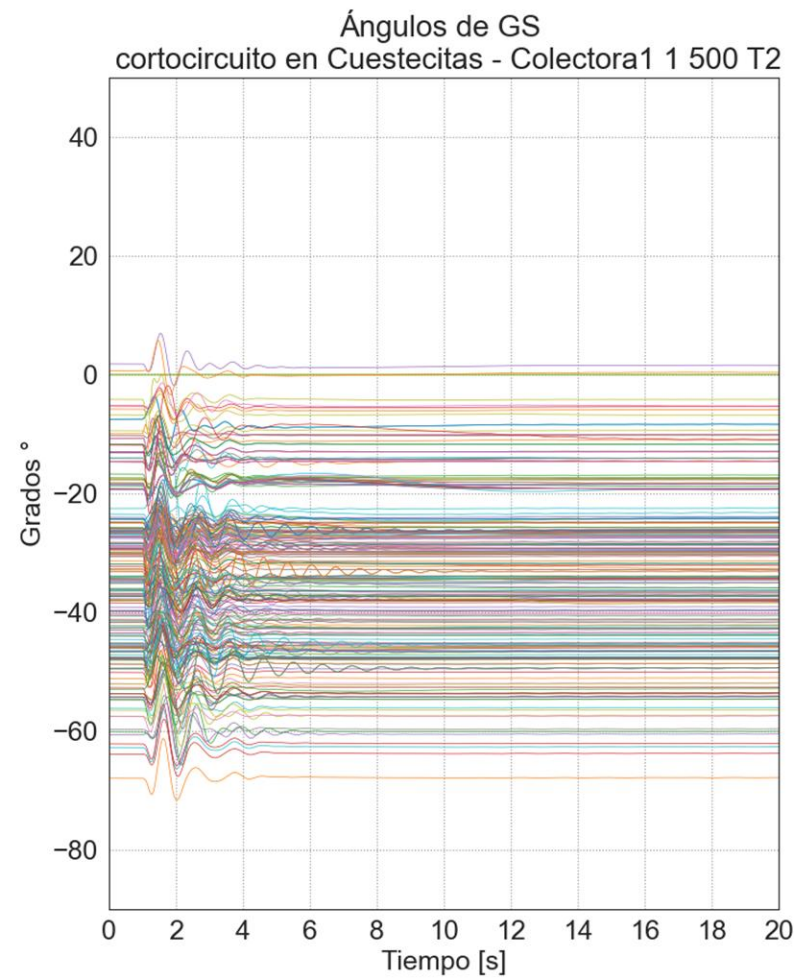
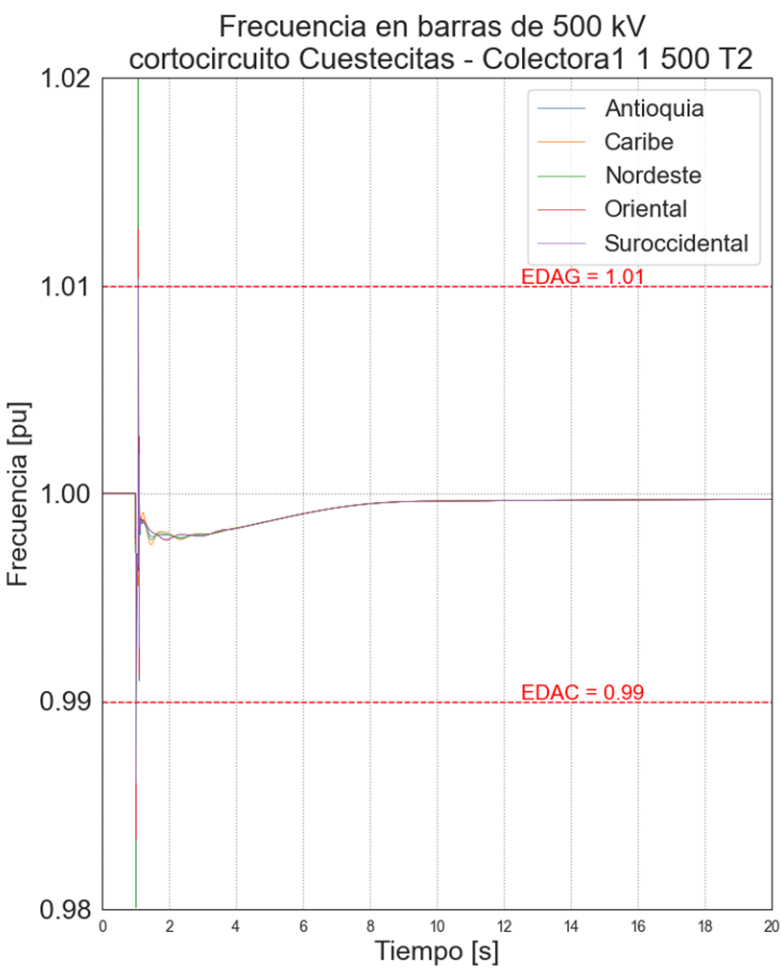
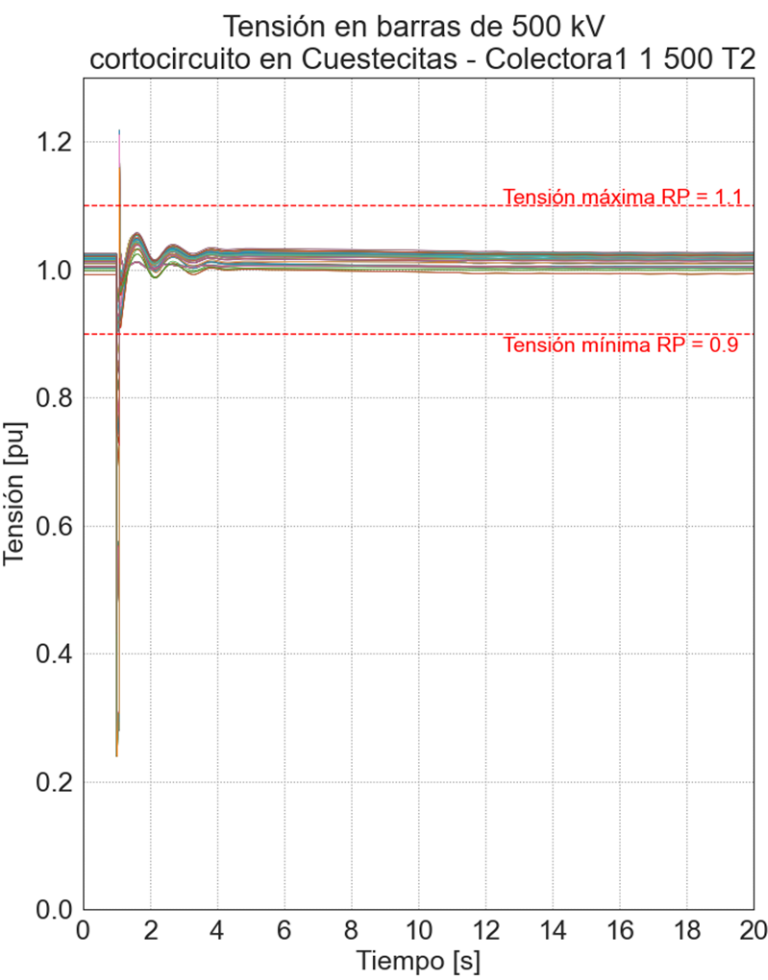


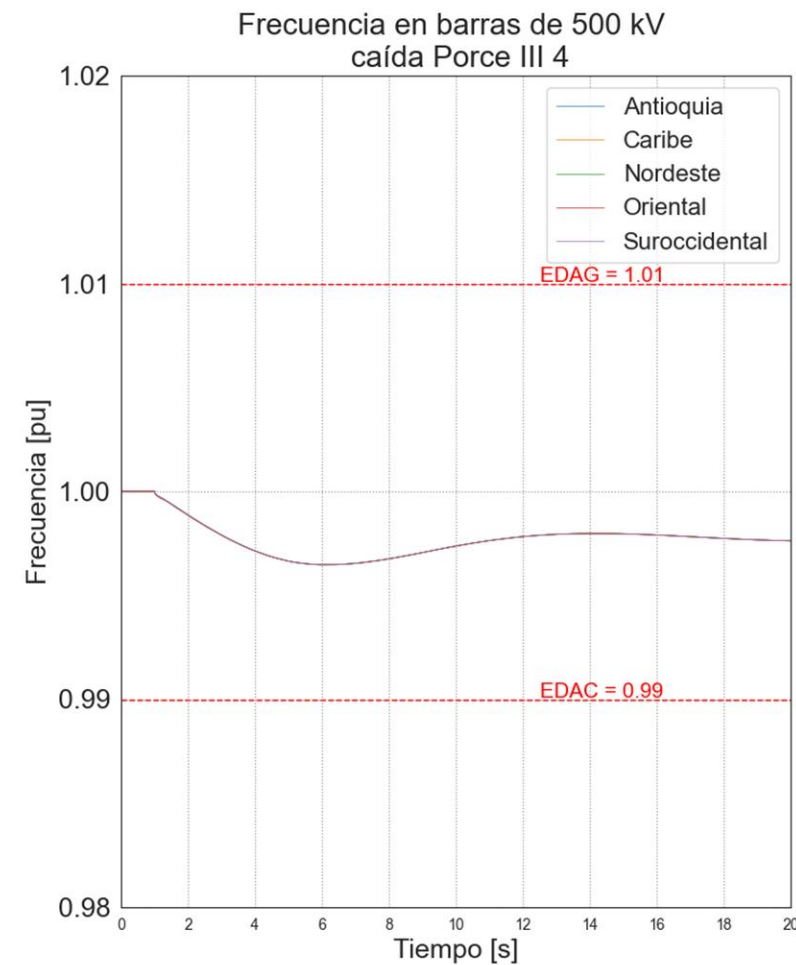
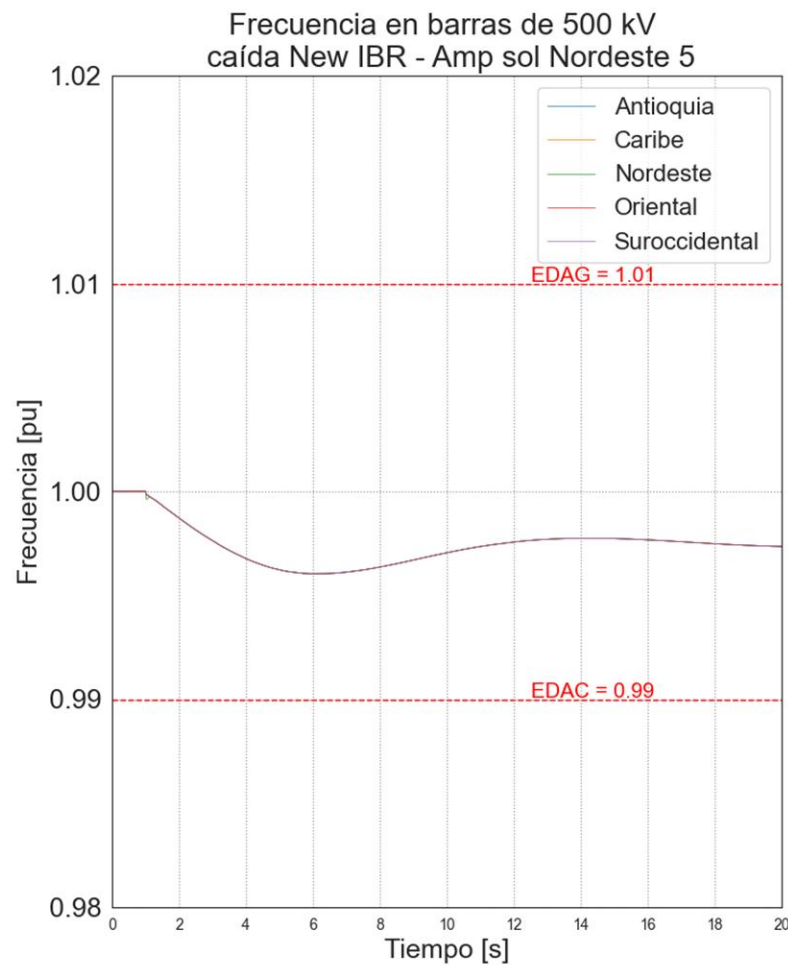
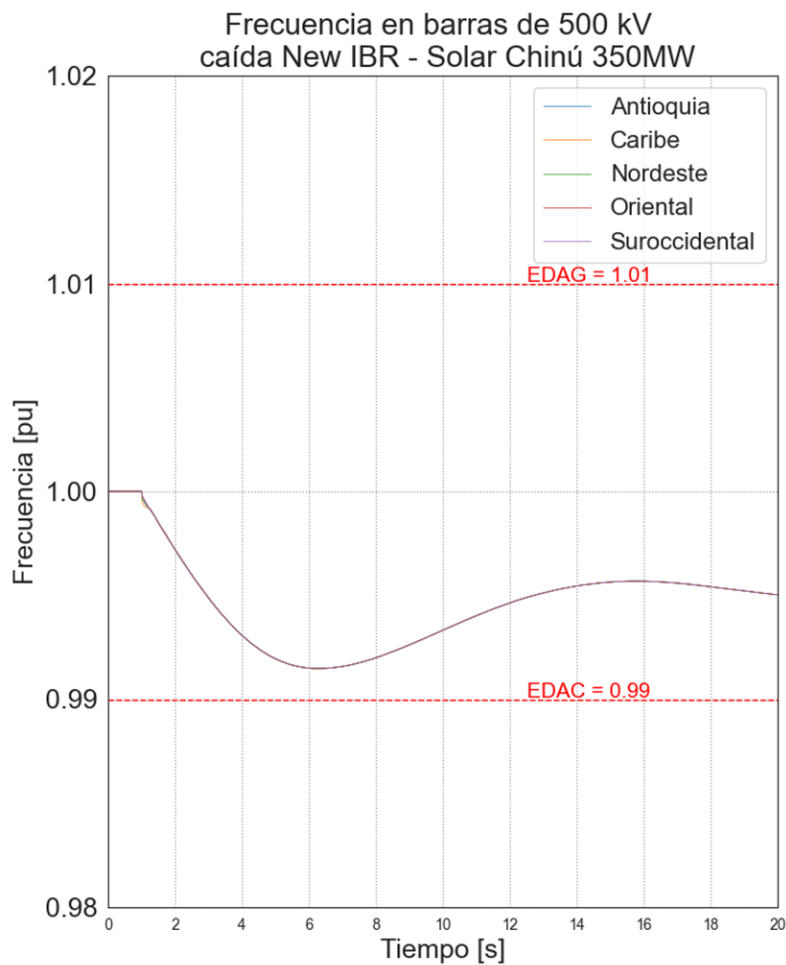
Ángulos de GS
cortocircuito en Copey - La Loma 1 500 T2

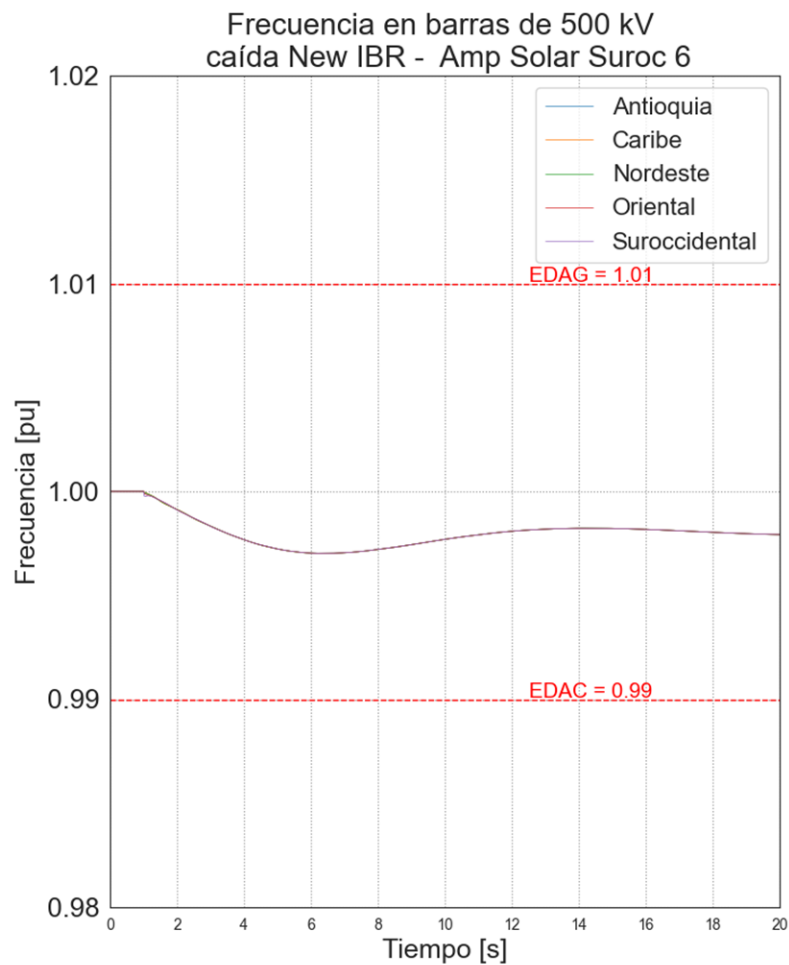
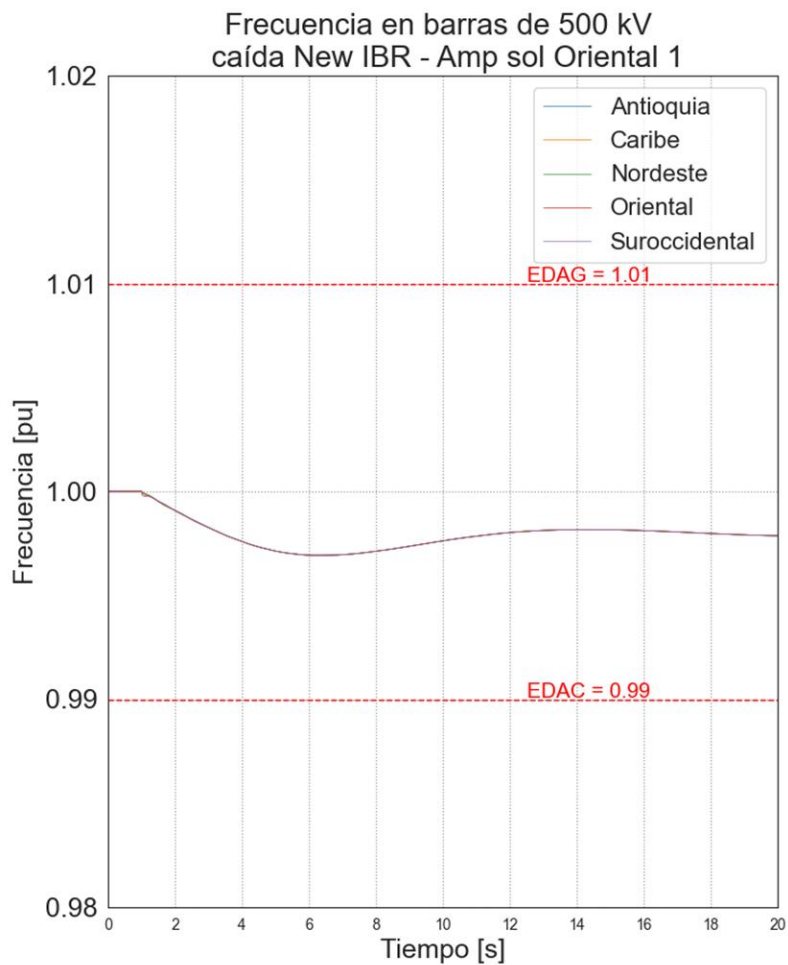




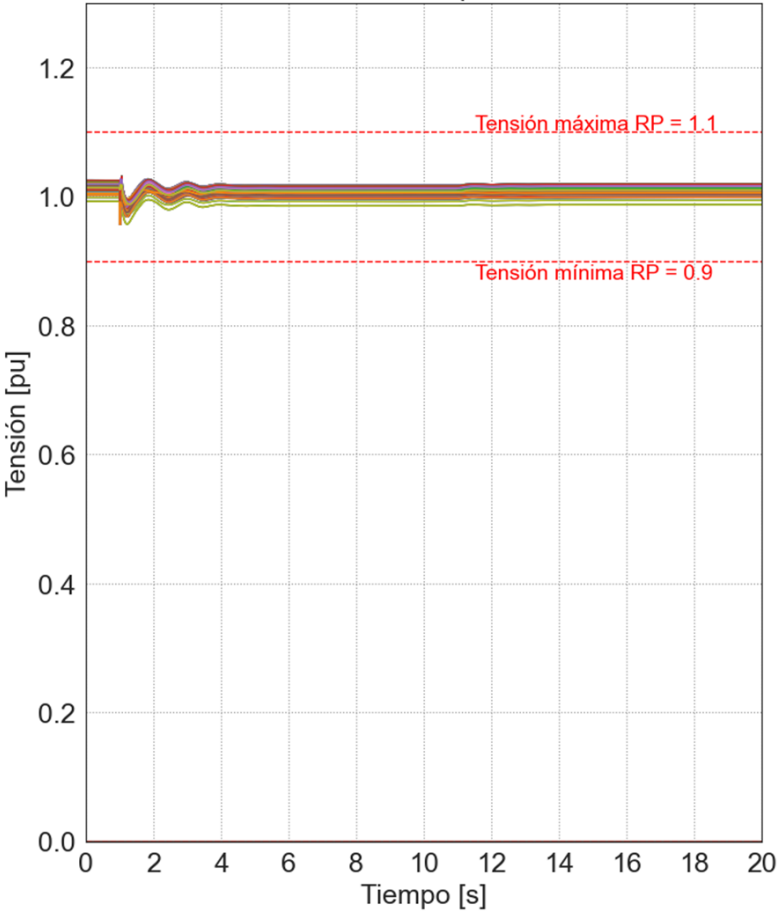




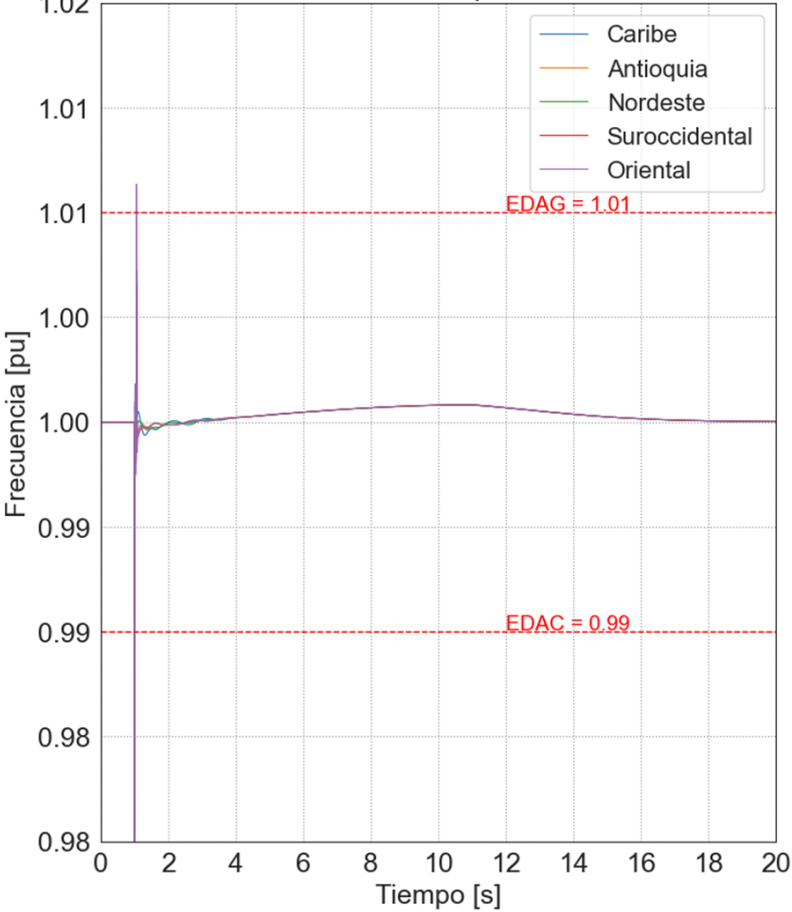




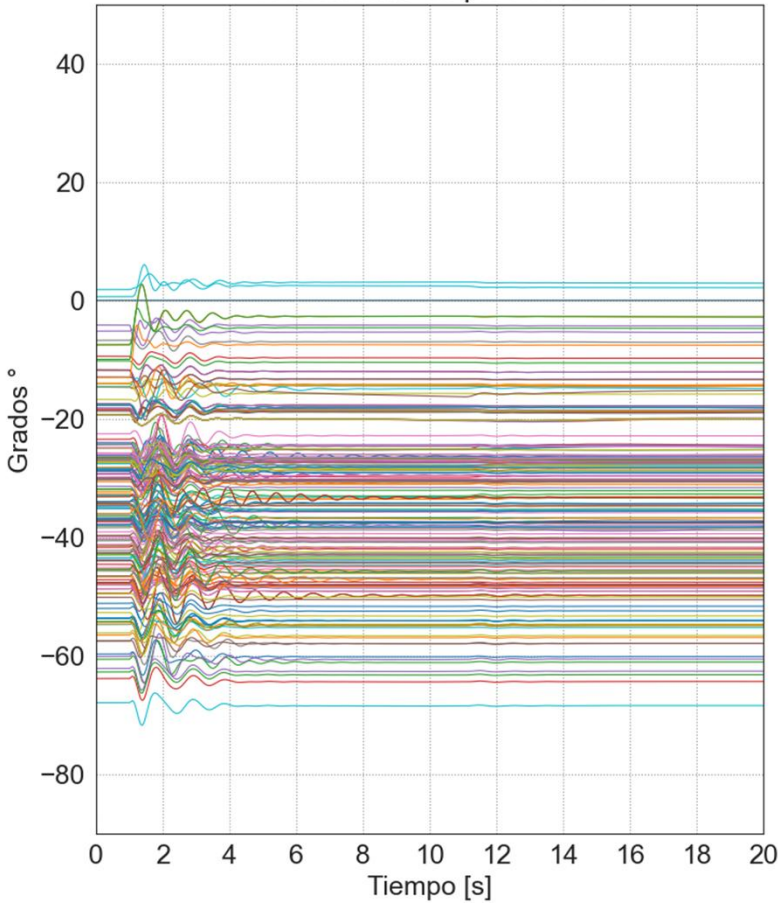
Tensión en barras de 500 kV
cortocircuito en polo HVDC



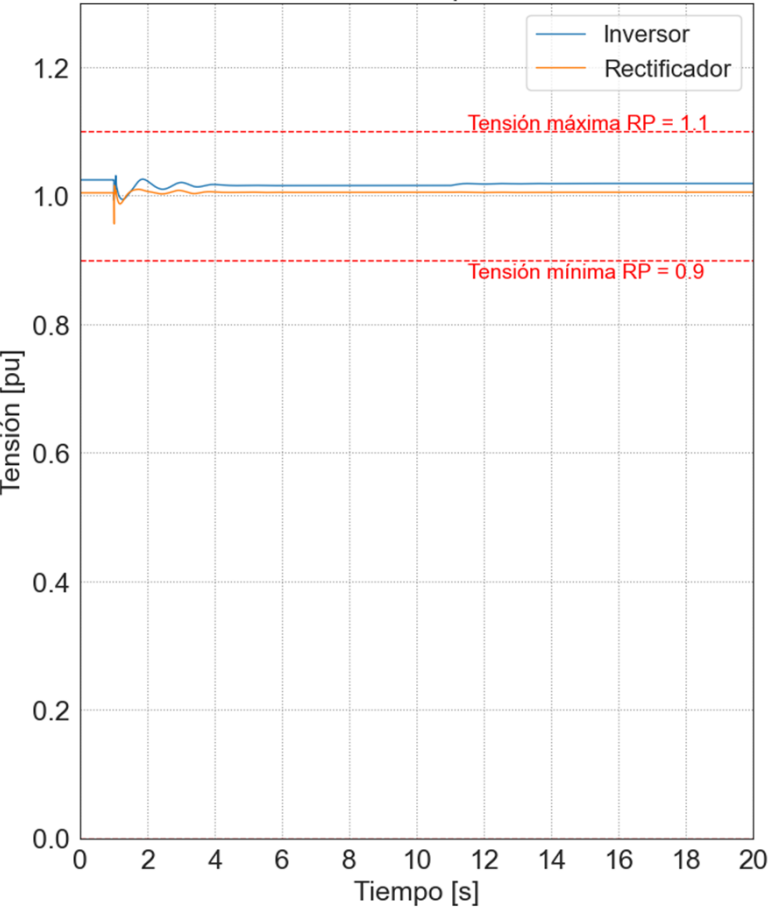
Frecuencia en barras de 500 kV
cortocircuito en polo HVDC



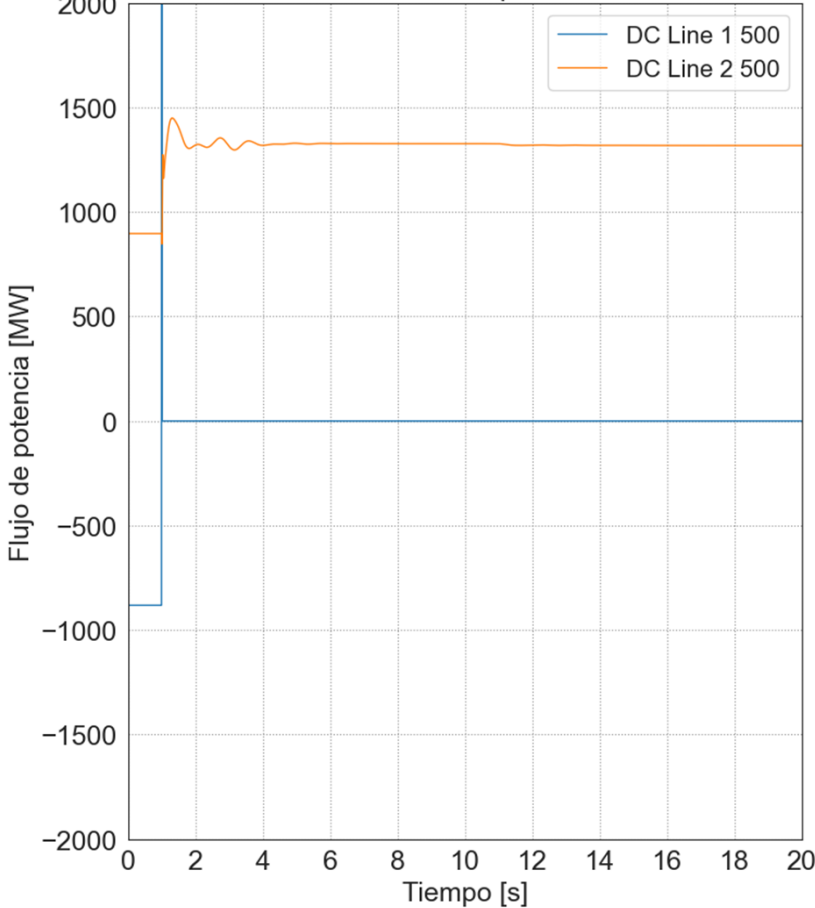
Ángulos de GS
cortocircuito en polo HVDC



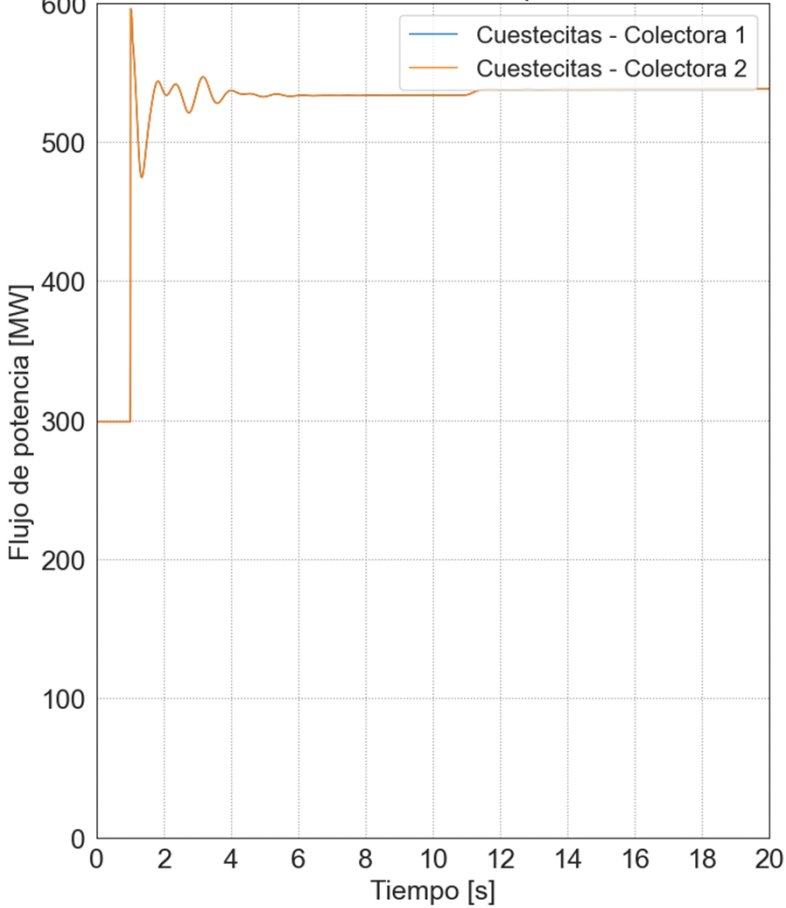
Tensión en barras HVDC
cortocircuito en polo HVDC



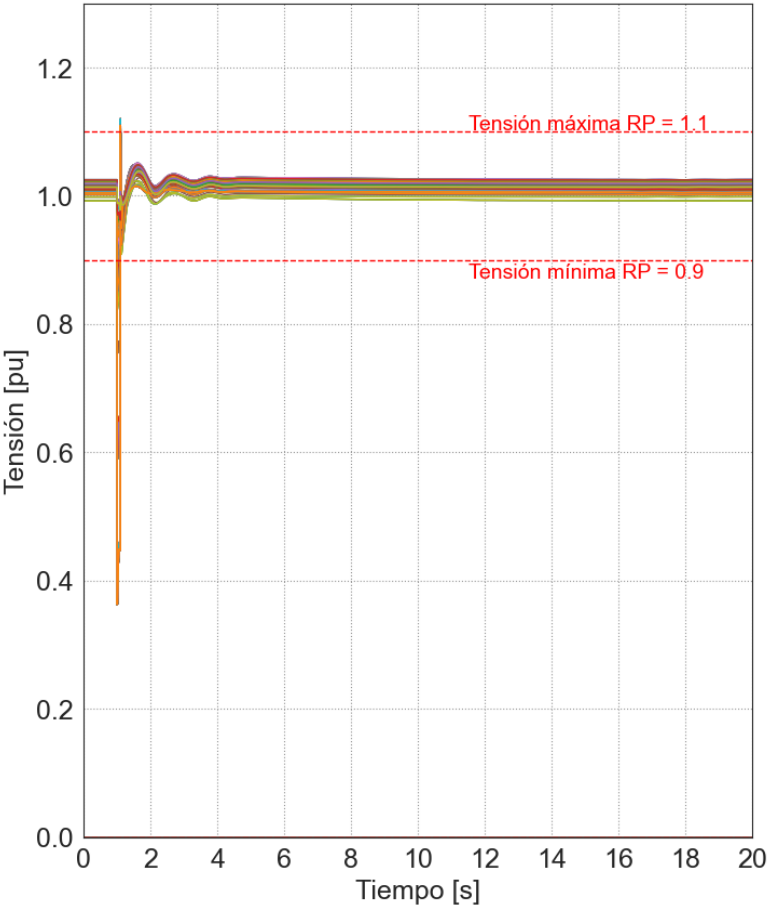
Flujo de potencia en polos HVDC durante
cortocircuito en polo HVDC



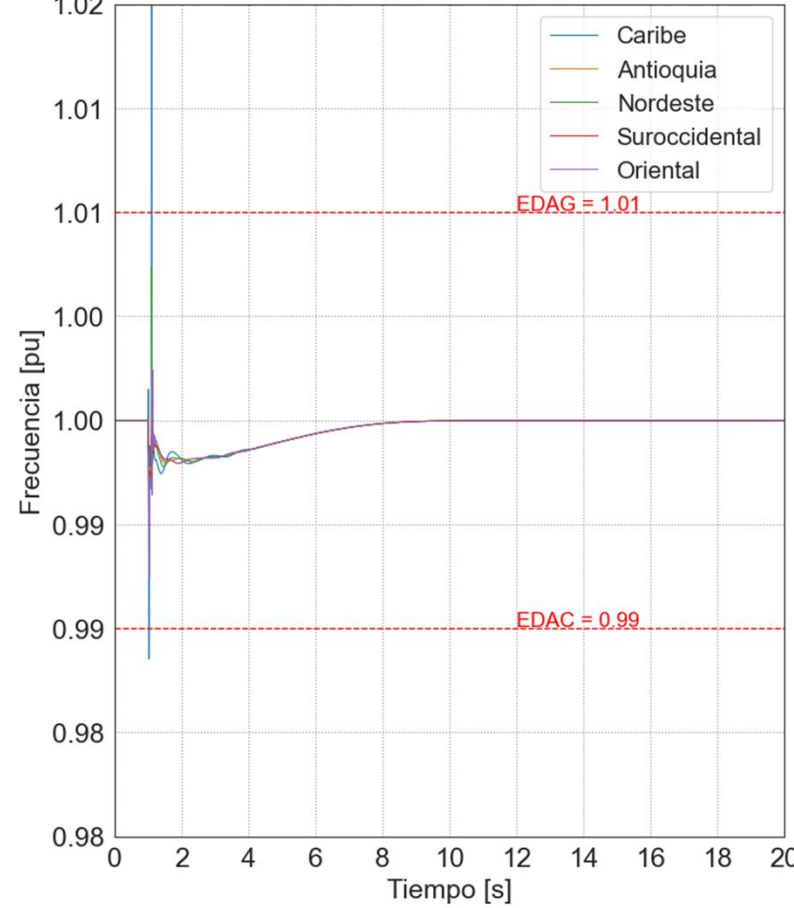
Flujo de potencia en tramo Colec-Cuest 500 kV
durante cortocircuito en polo HVDC



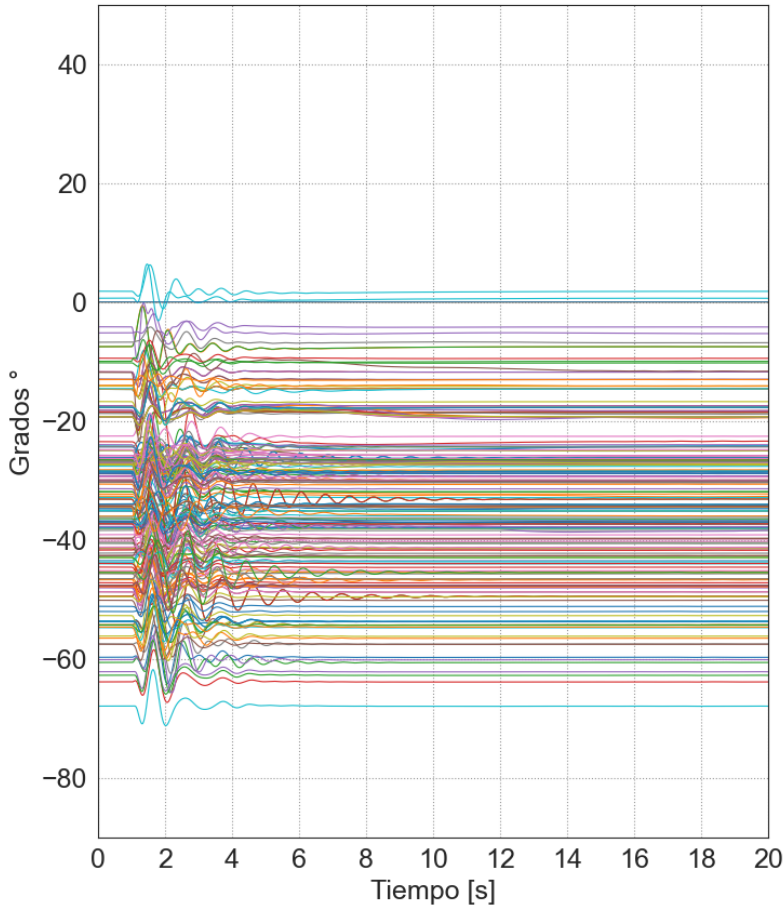
Tensión en barras de 500 kV
cortocircuito en CC rectificador



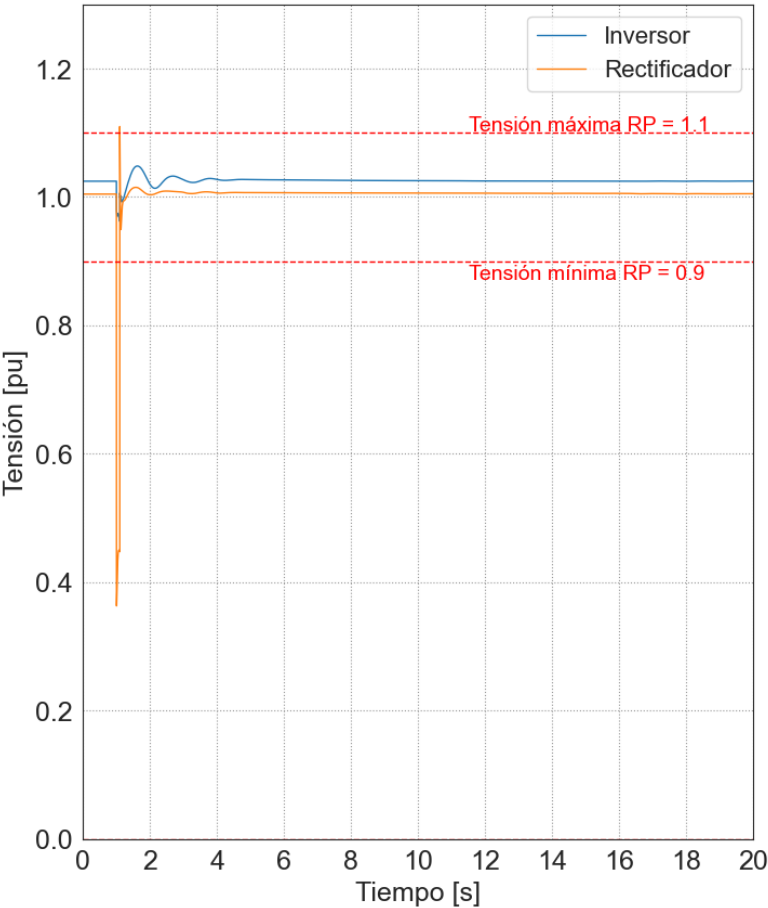
Frecuencia en barras de 500 kV
cortocircuito en CC rectificador



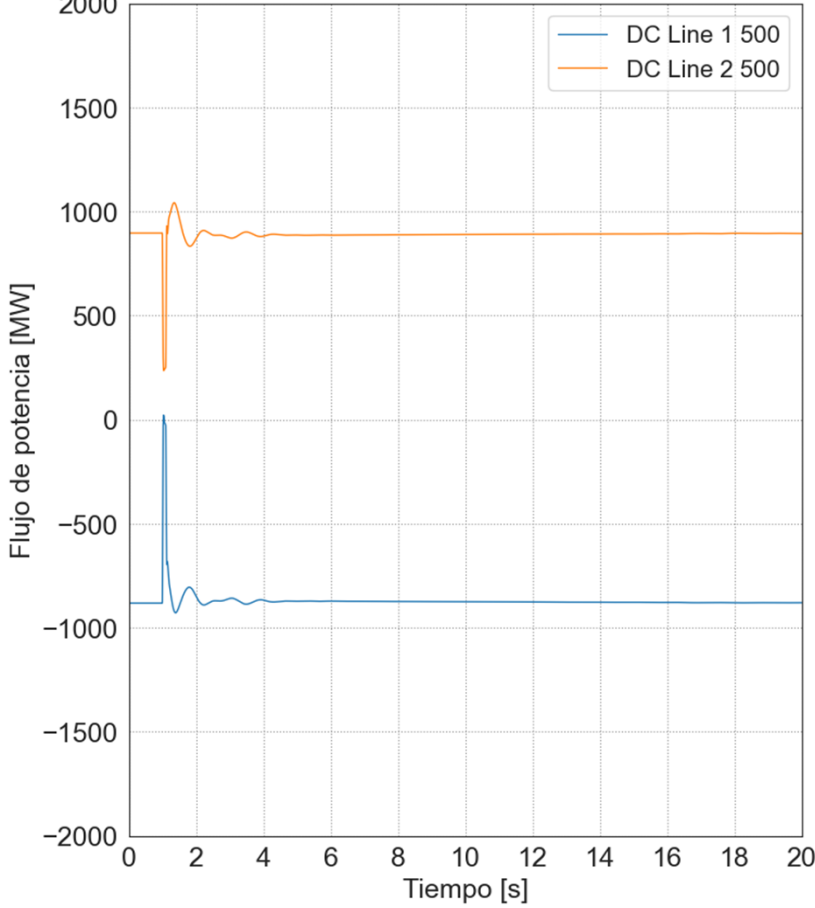
Ángulos de GS
cortocircuito en CC rectificador



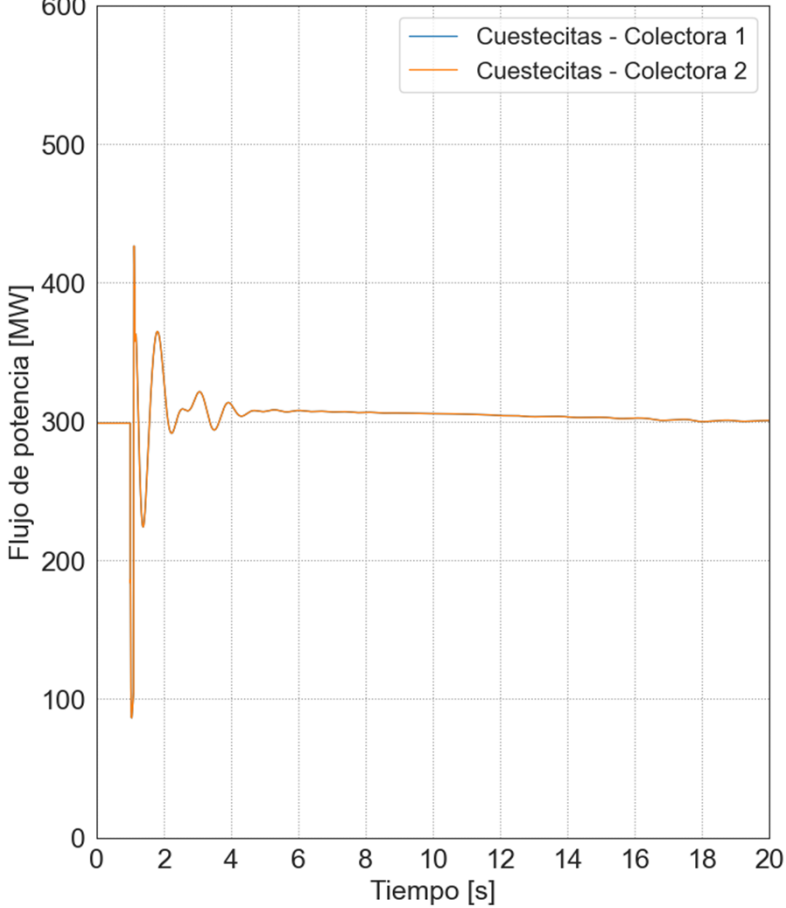
Tensión en barras HVDC
cortocircuito en CC rectificador



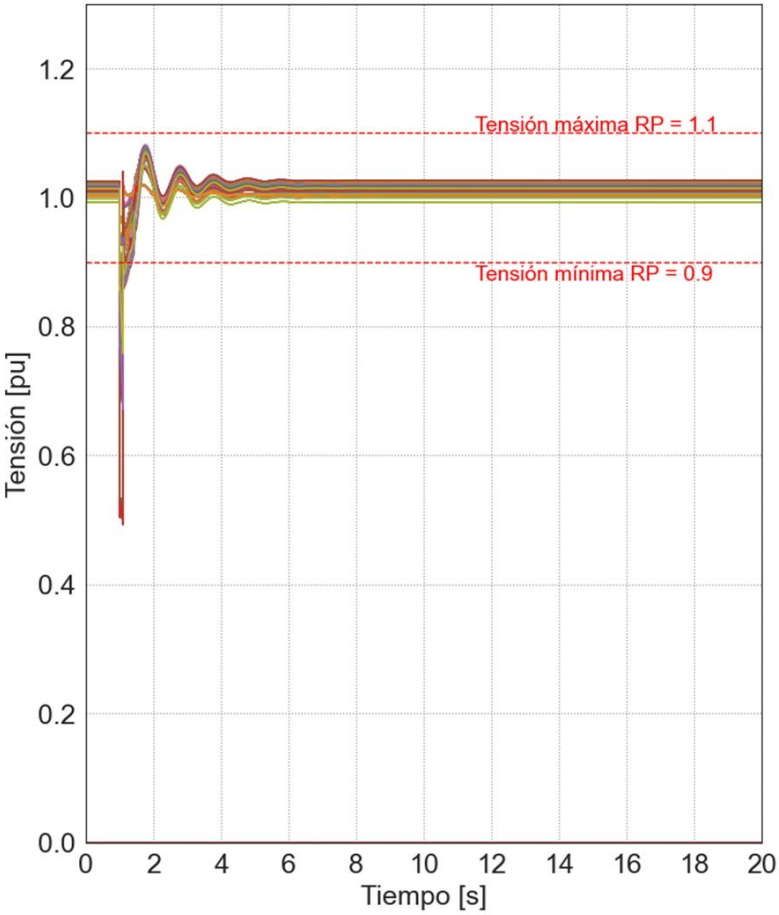
Flujo de potencia en polos HVDC durante
cortocircuito en CC rectificador



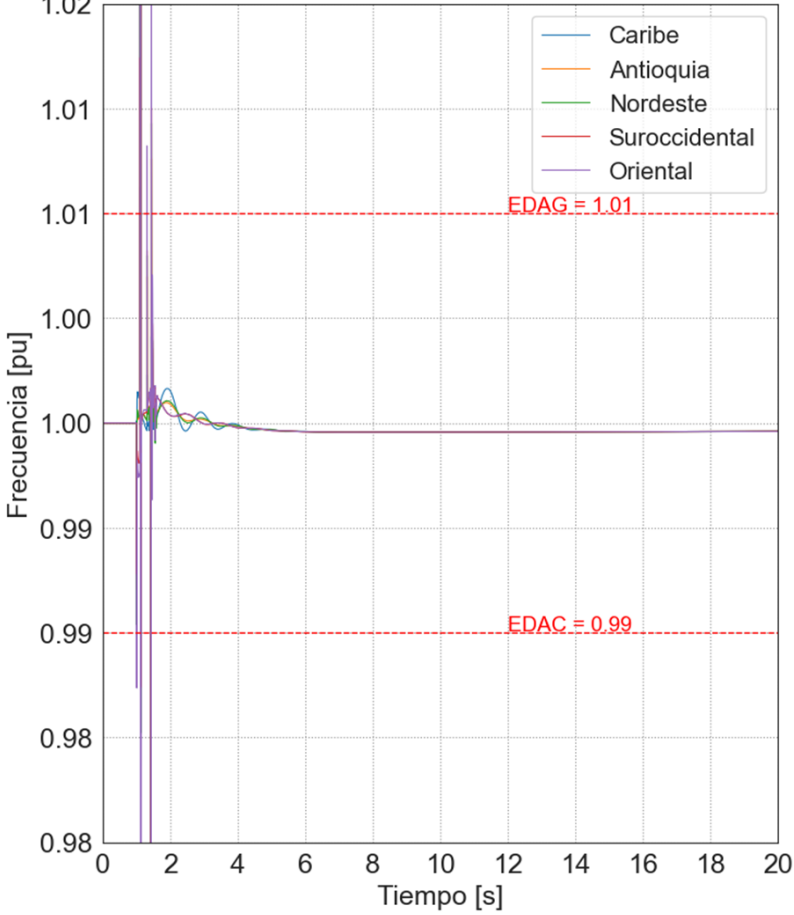
Flujo de potencia en tramo Colec-Cuest 500 kV
durante cortocircuito en CC rectificador



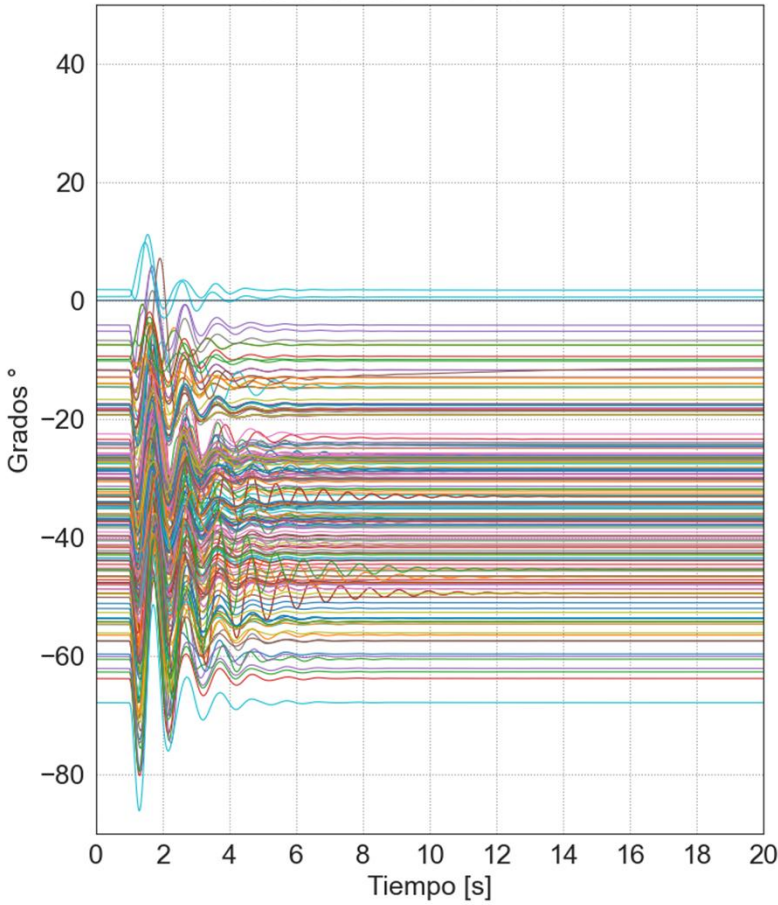
Tensión en barras de 500 kV
cortocircuito en CC inversor



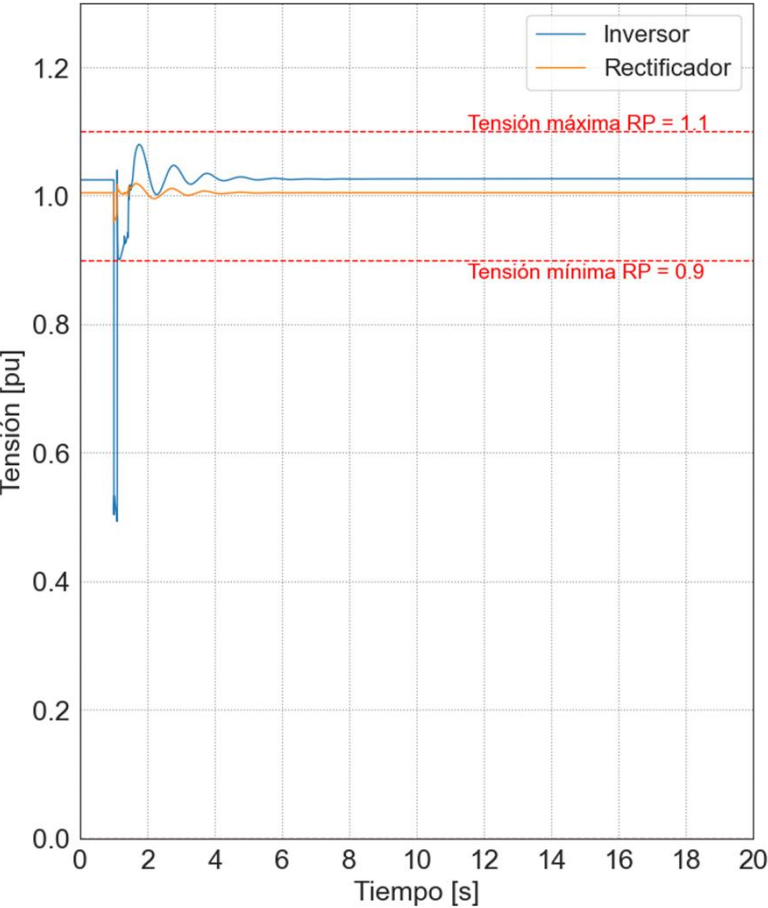
Frecuencia en barras de 500 kV
cortocircuito en CC inversor



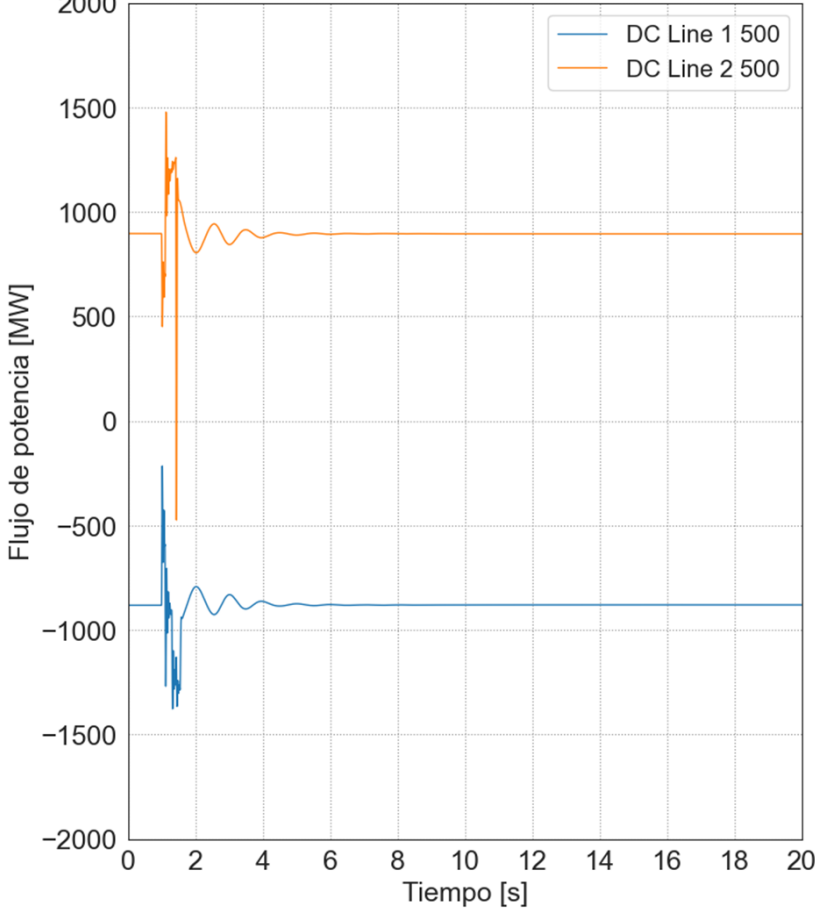
Ángulos de GS
cortocircuito en CC inversor



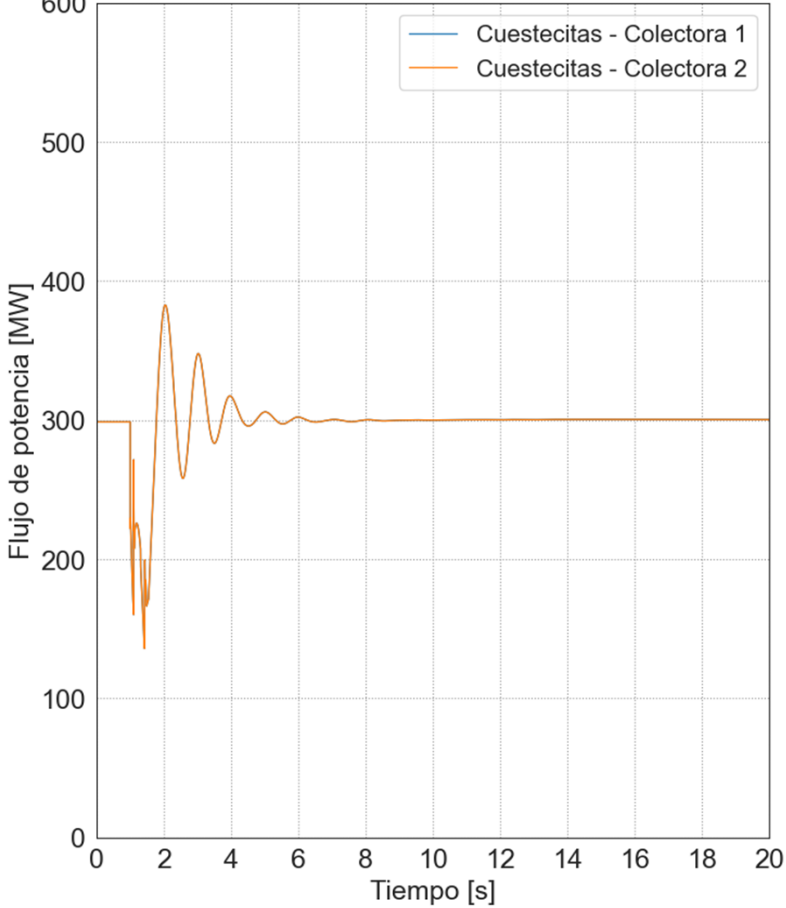
Tensión en barras HVDC
cortocircuito en CC inversor



Flujo de potencia en polos HVDC durante
cortocircuito en CC inversor

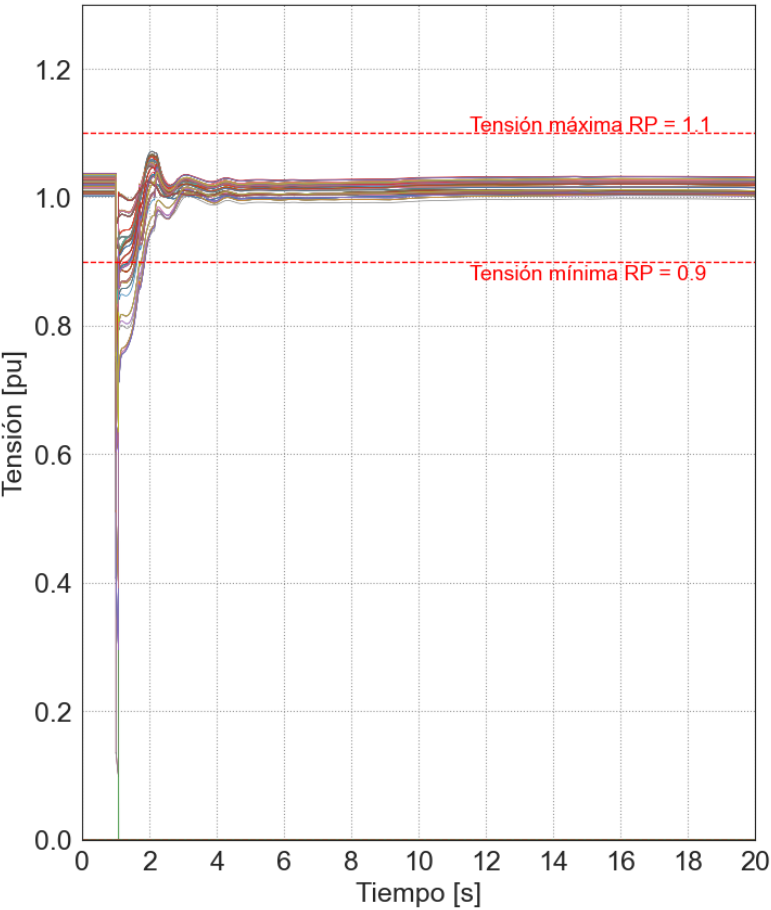


Flujo de potencia en tramo Colec-Cuest 500 kV
durante cortocircuito en CC inversor

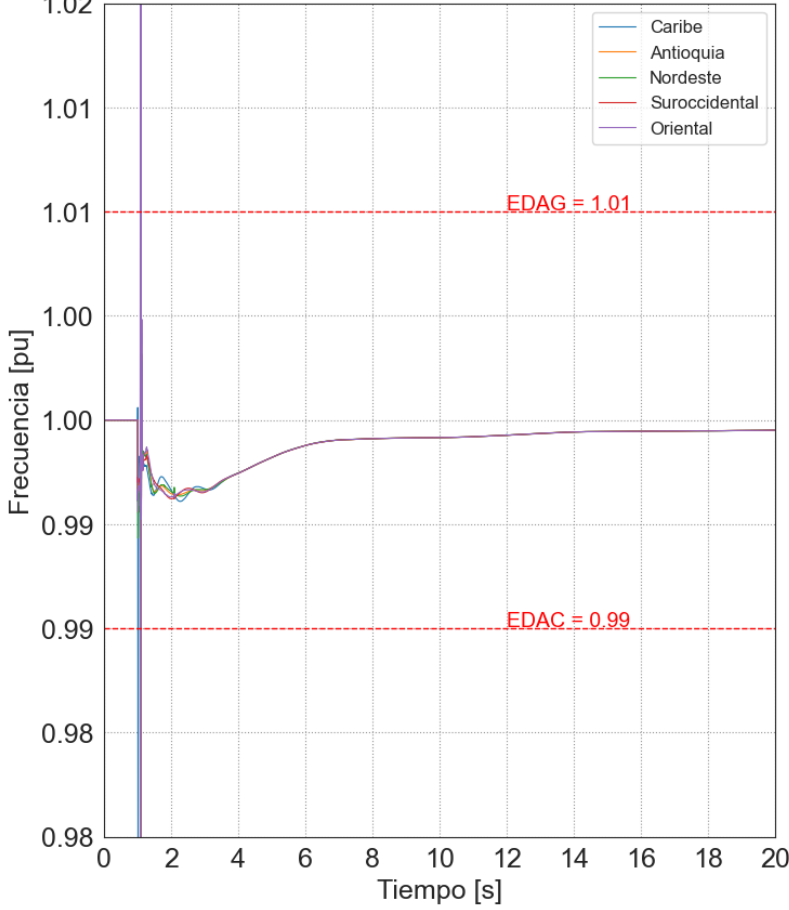


Resultados demanda neta mínima 2037

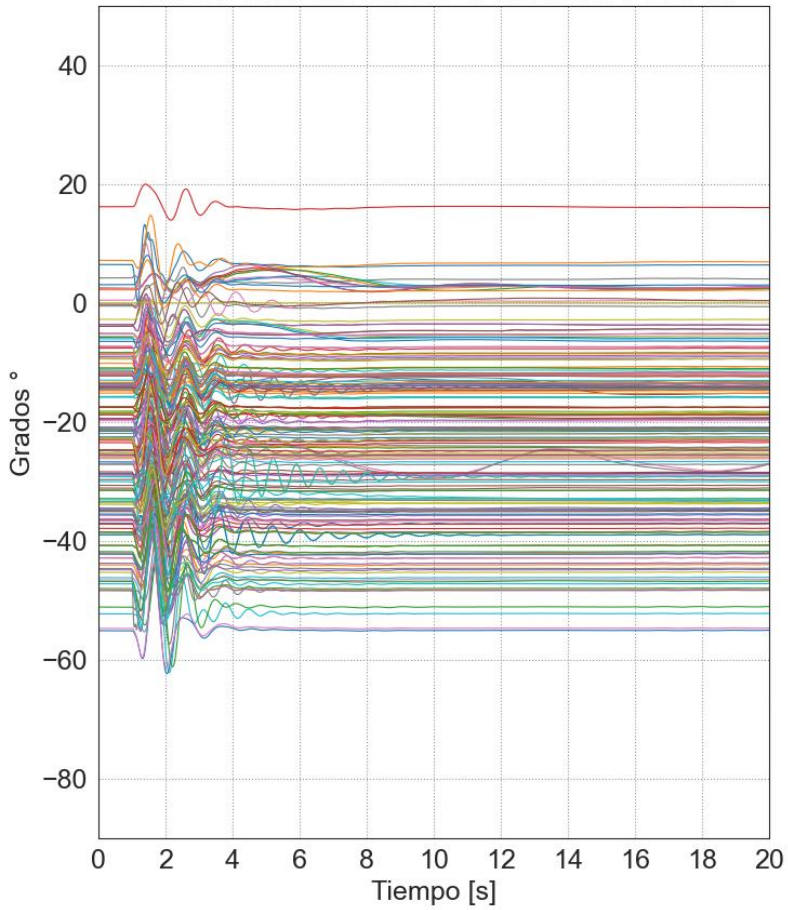
Tensión en barras de 500 kV
cortocircuito en Bacata - Primavera 1 500 T2



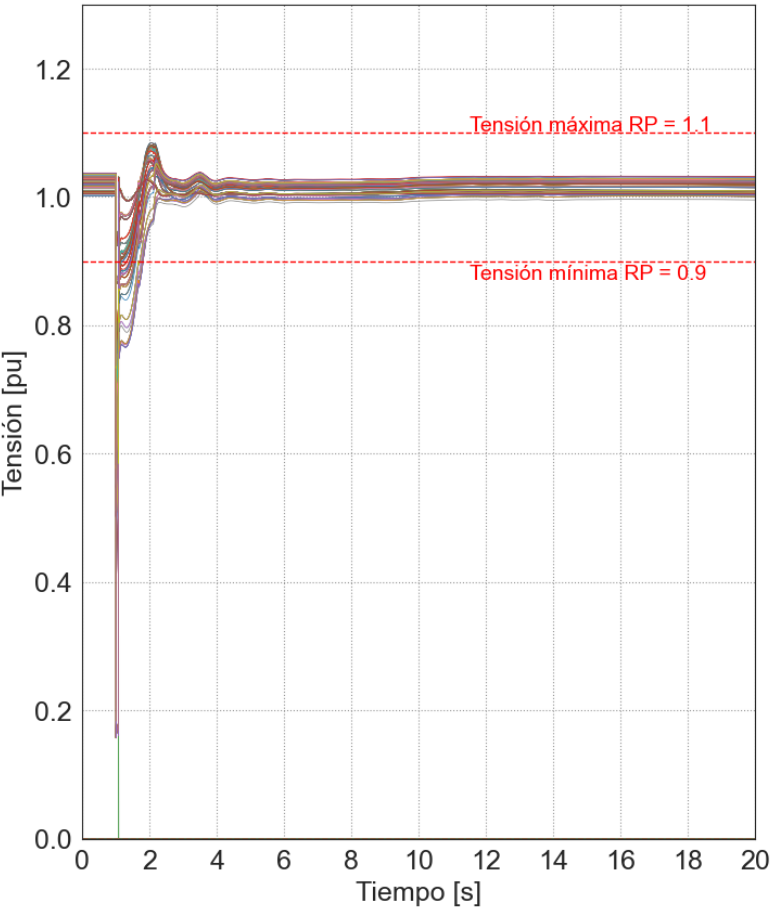
Frecuencia en barras de 500 kV
cortocircuito en Bacata - Primavera 1 500 T2



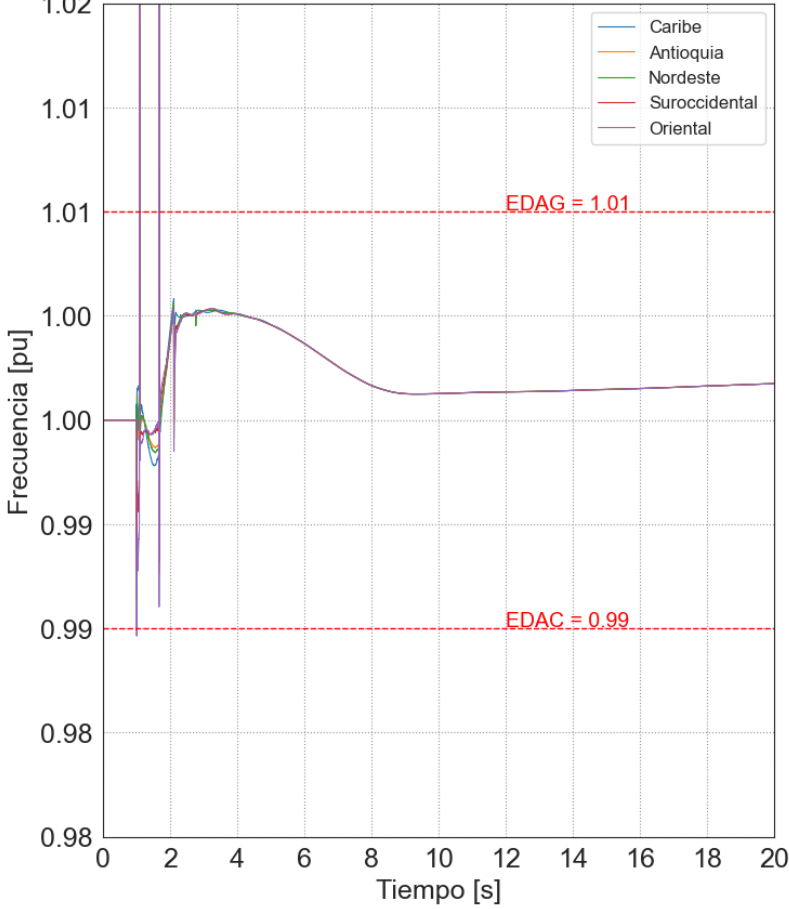
Ángulos de GS
cortocircuito en Bacata - Primavera 1 500 T2



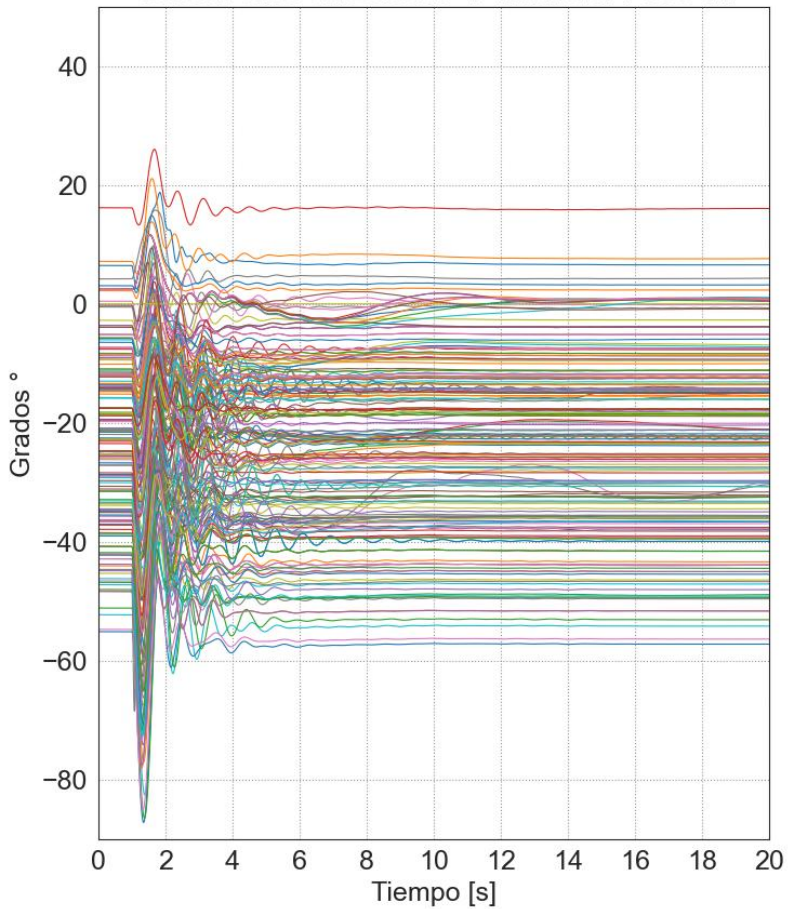
Tensión en barras de 500 kV
cortocircuito en Bacata - Primavera 1 500 T2

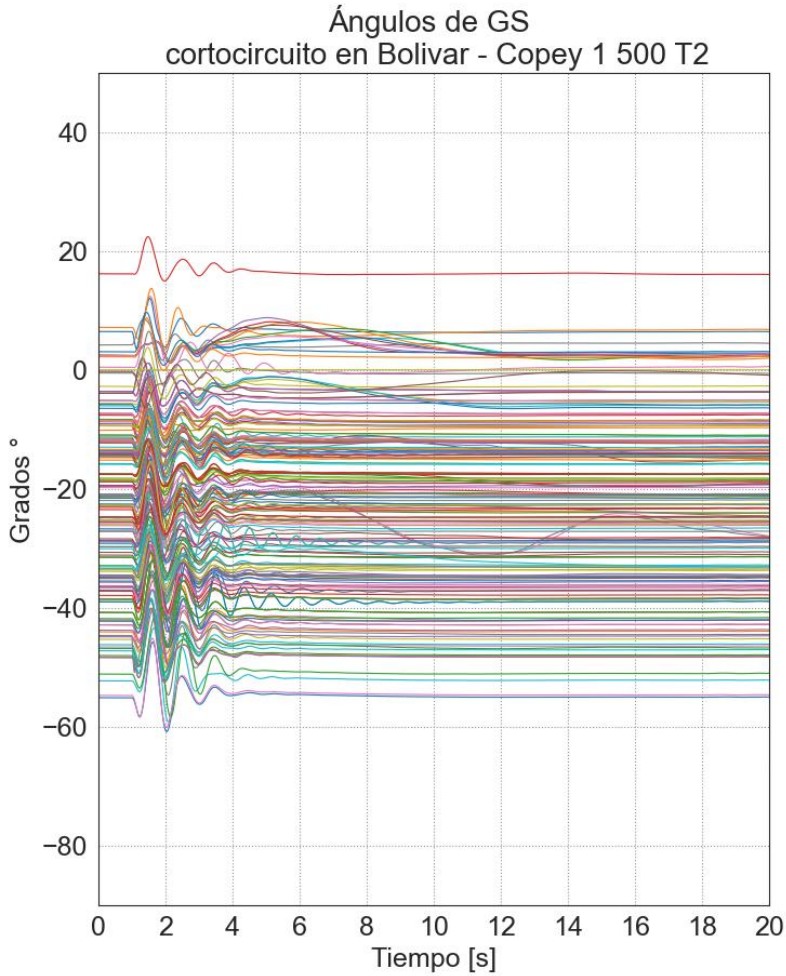
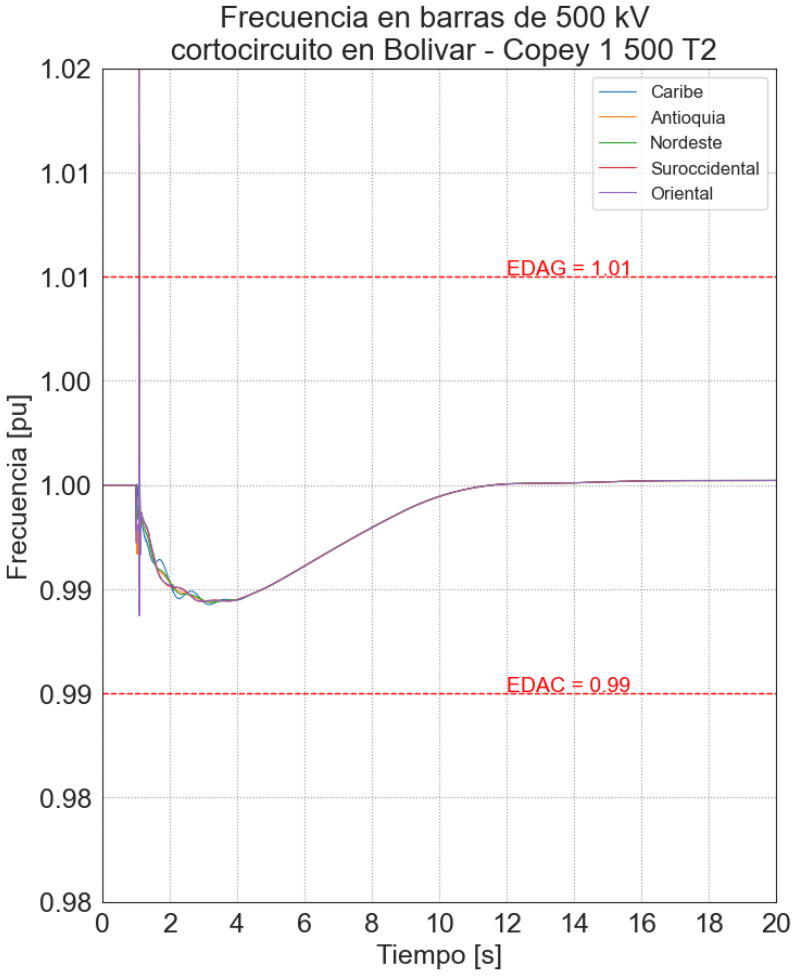
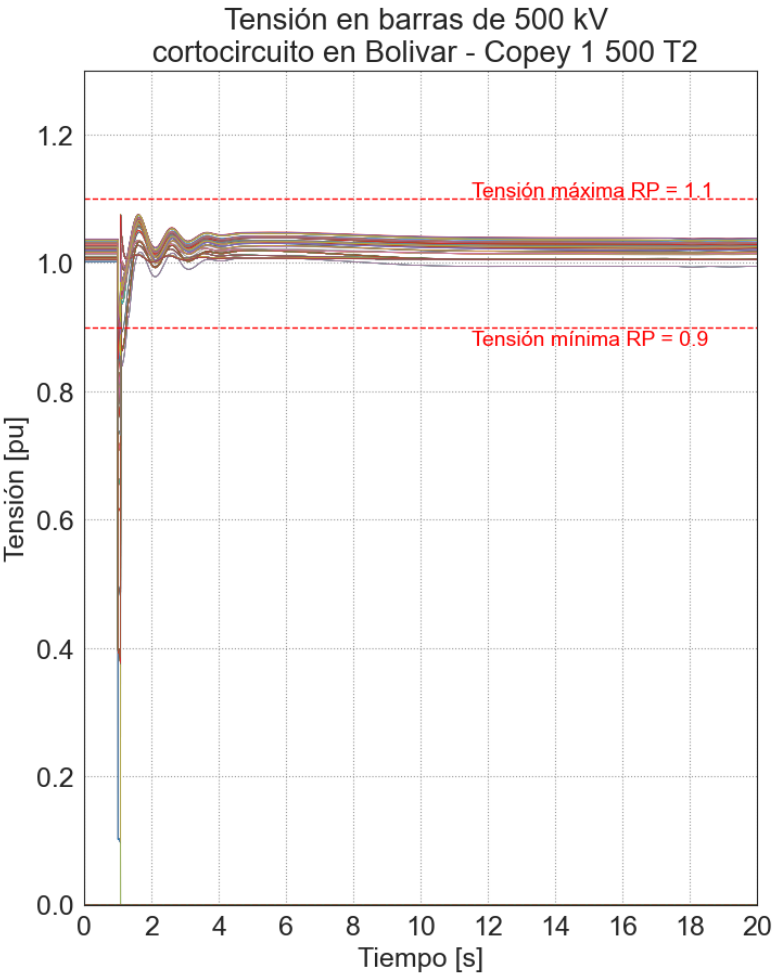


Frecuencia en barras de 500 kV
cortocircuito en Bacata - Primavera 1 500 T2

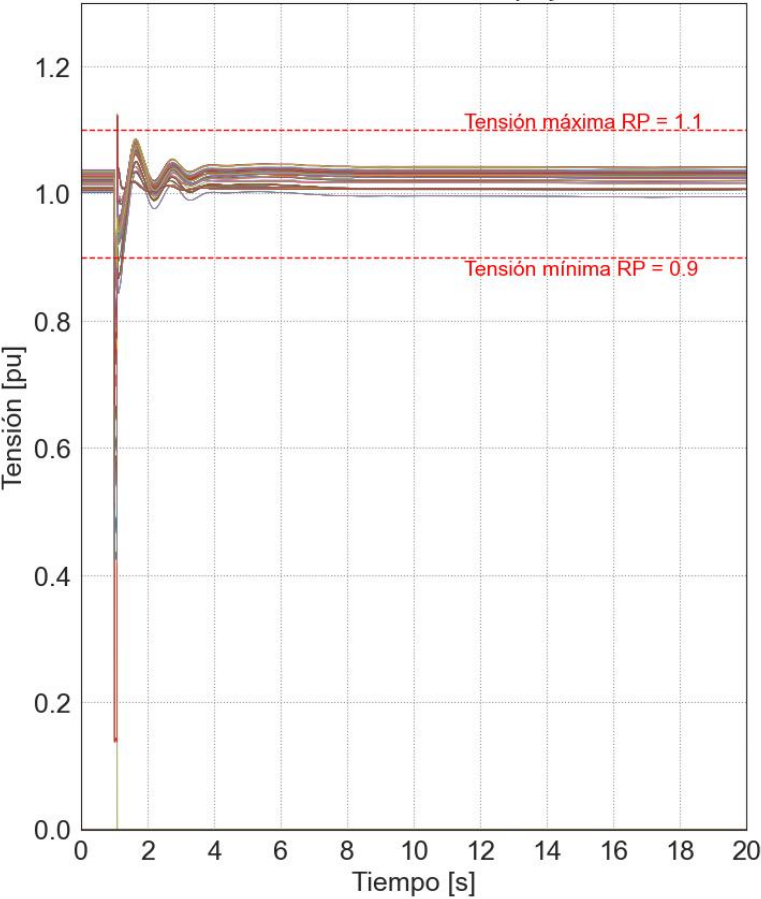


Ángulos de GS
cortocircuito en Bacata - Primavera 1 500 T2

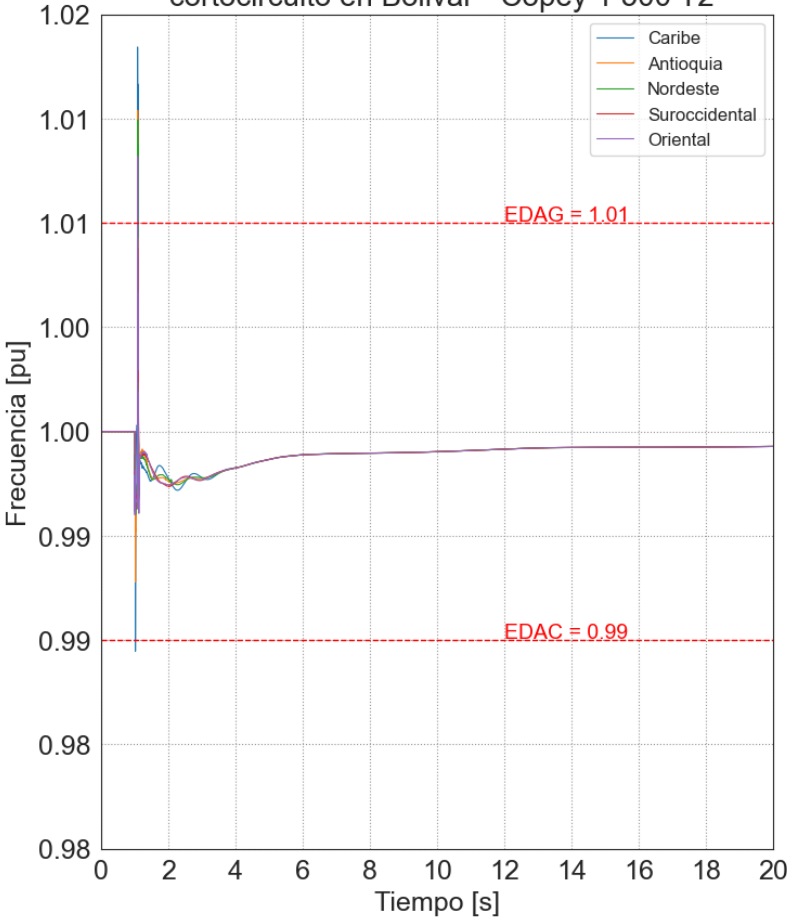




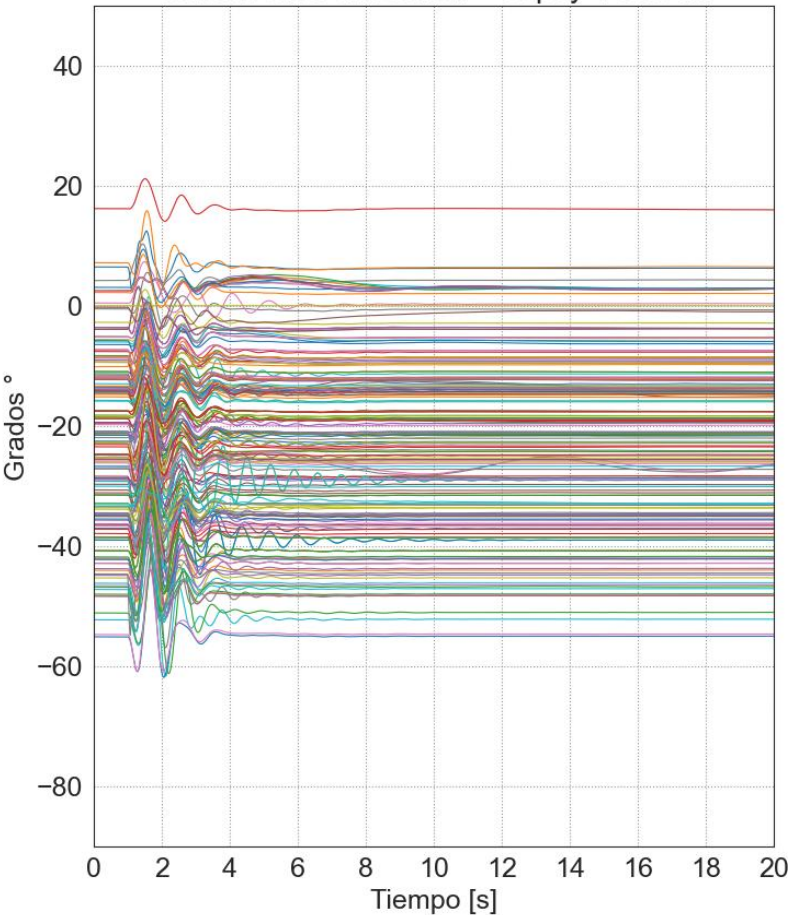
Tensión en barras de 500 kV
cortocircuito en Bolivar - Copey 1 500 T2



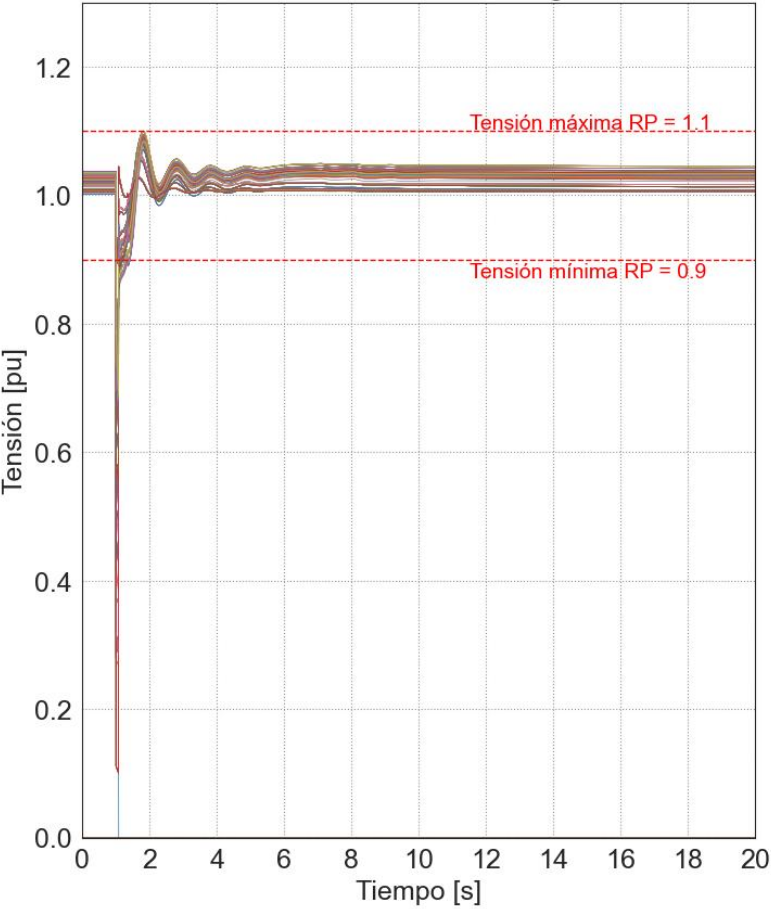
Frecuencia en barras de 500 kV
cortocircuito en Bolivar - Copey 1 500 T2



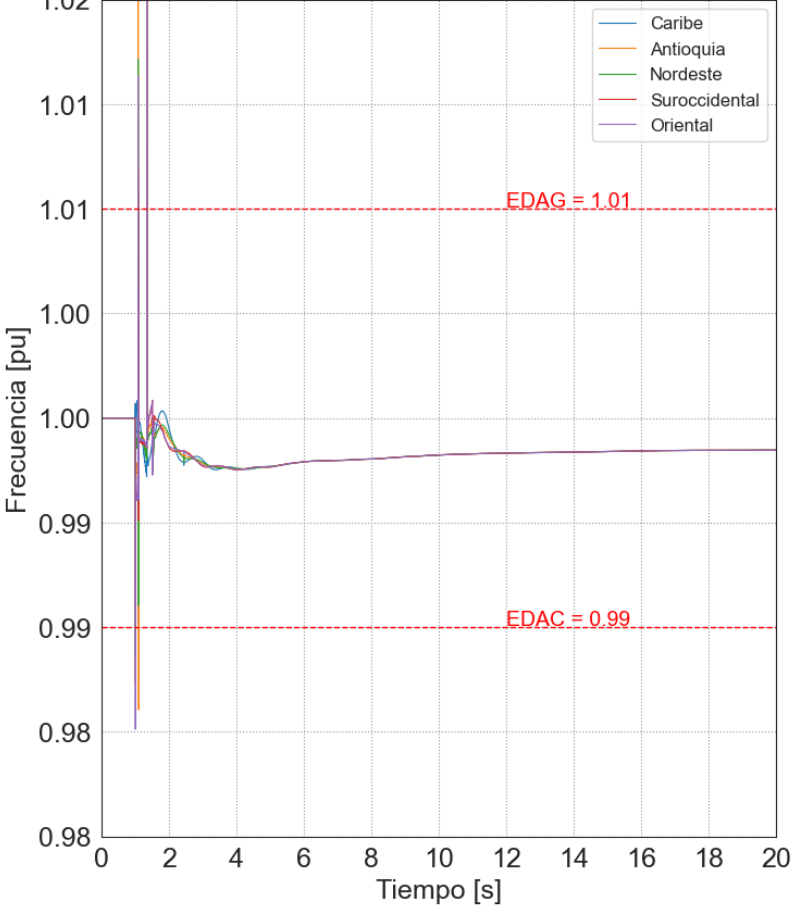
Ángulos de GS
cortocircuito en Bolivar - Copey 1 500 T2



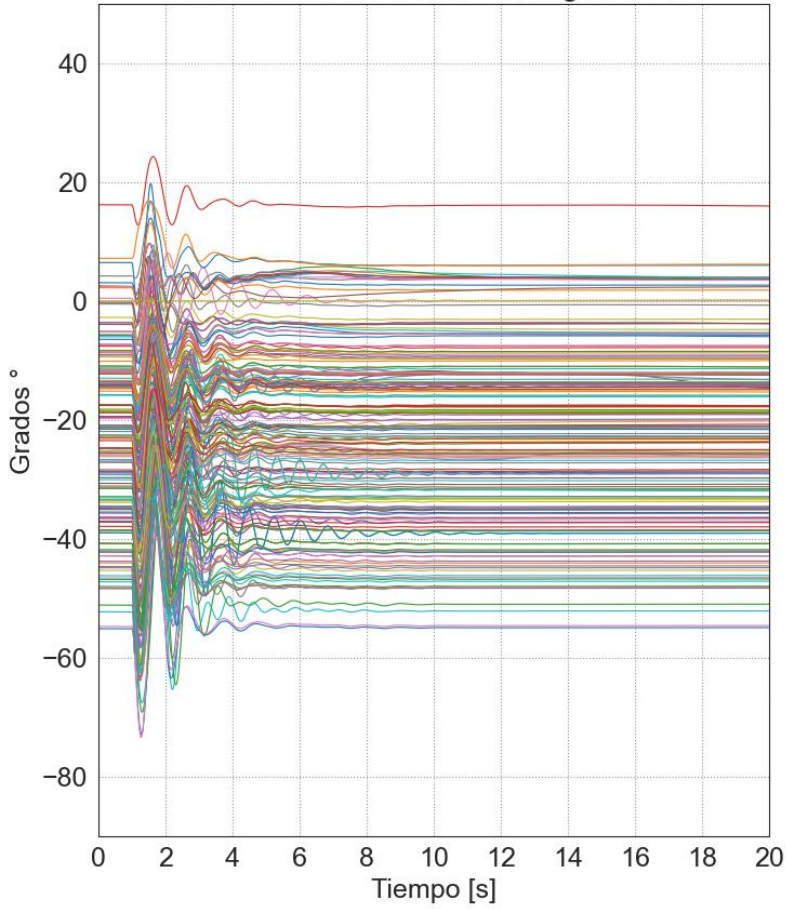
Tensión en barras de 500 kV
cortocircuito en Cerro - Sahagun 1 500



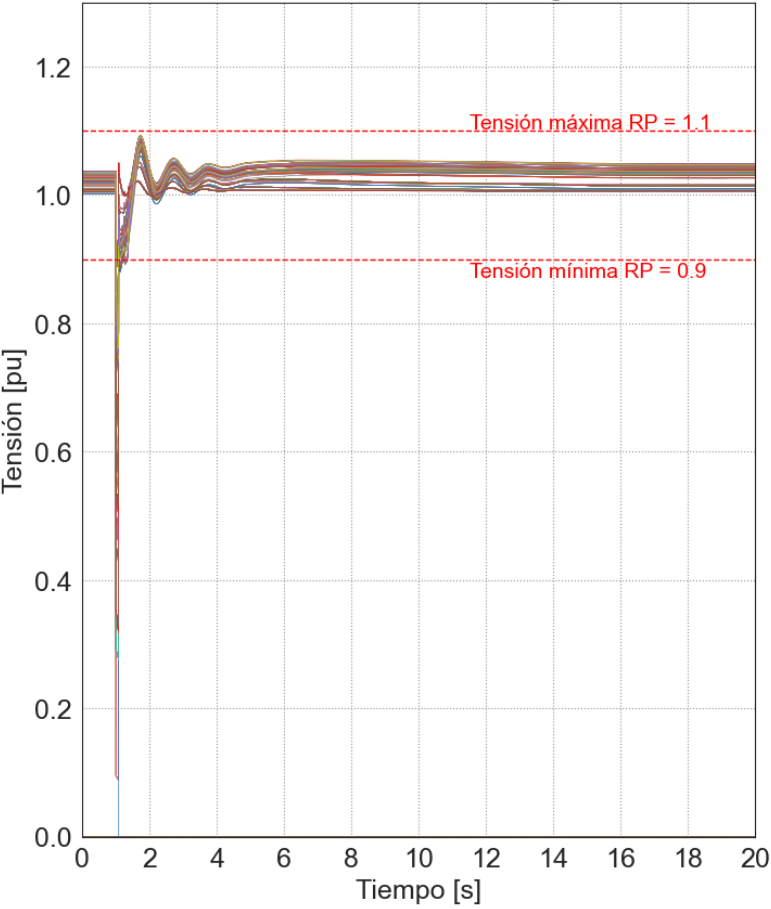
Frecuencia en barras de 500 kV
cortocircuito en Cerro - Sahagun 1 500



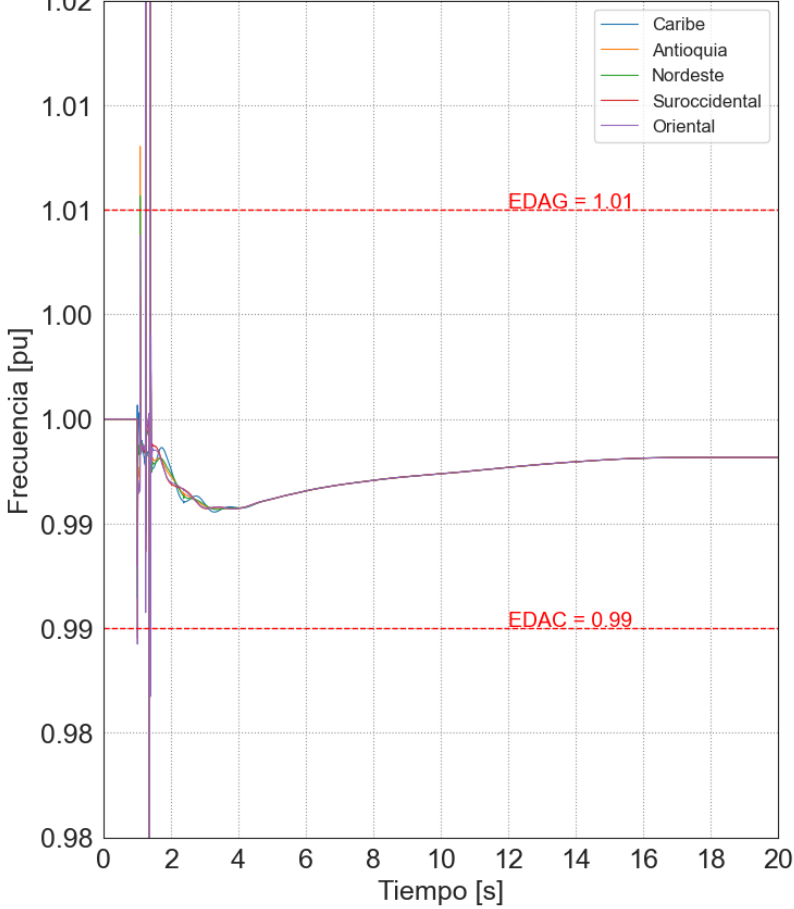
Ángulos de GS
cortocircuito en Cerro - Sahagun 1 500



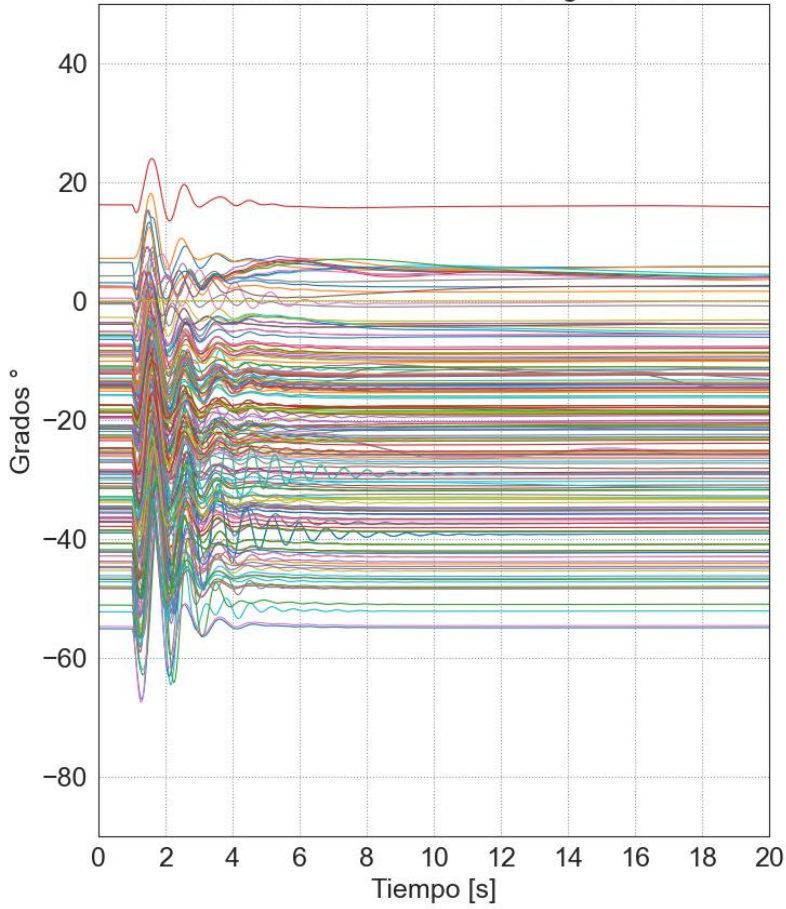
Tensión en barras de 500 kV
cortocircuito en Cerro - Sahagun 1 500



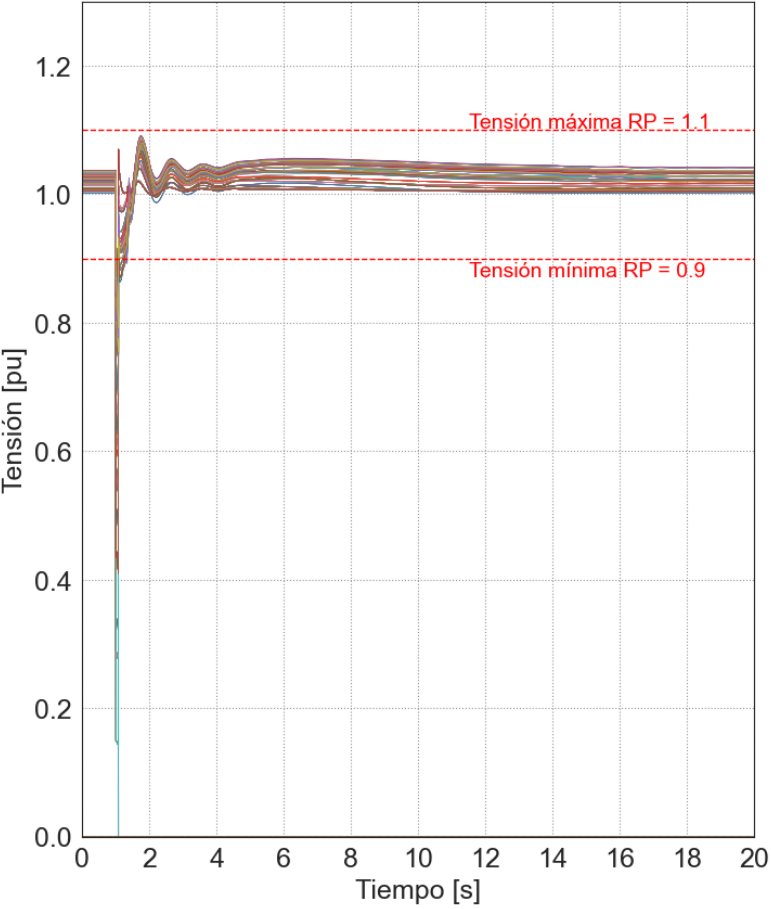
Frecuencia en barras de 500 kV
cortocircuito en Cerro - Sahagun 1 500



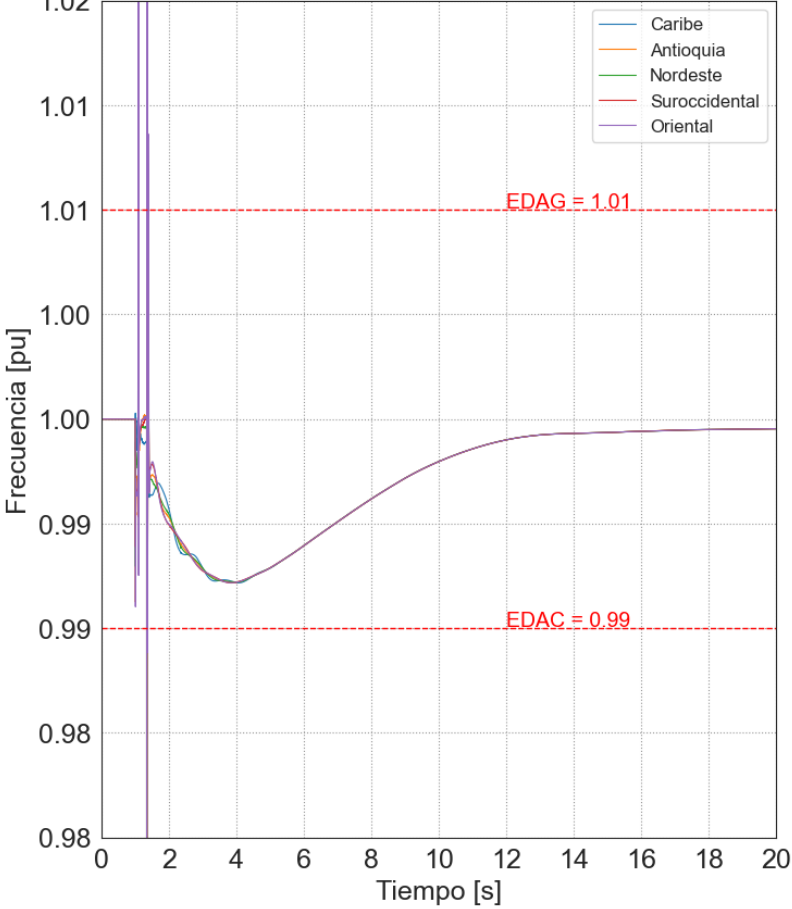
Ángulos de GS
cortocircuito en Cerro - Sahagun 1 500



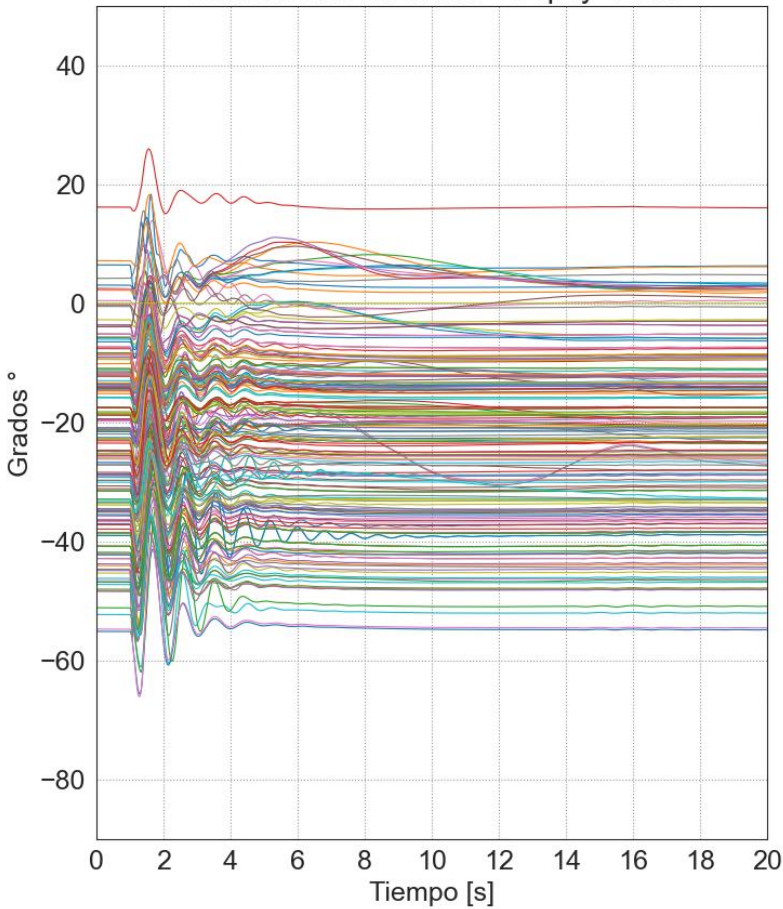
Tensión en barras de 500 kV
cortocircuito en Chinu - Copey 1 500



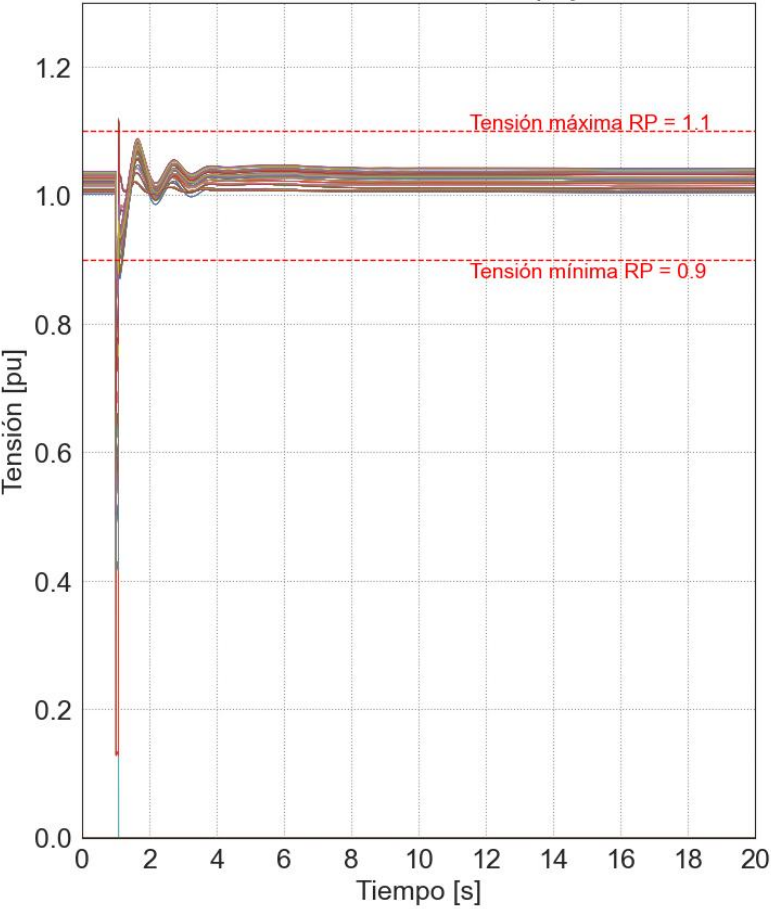
Frecuencia en barras de 500 kV
cortocircuito en Chinu - Copey 1 500



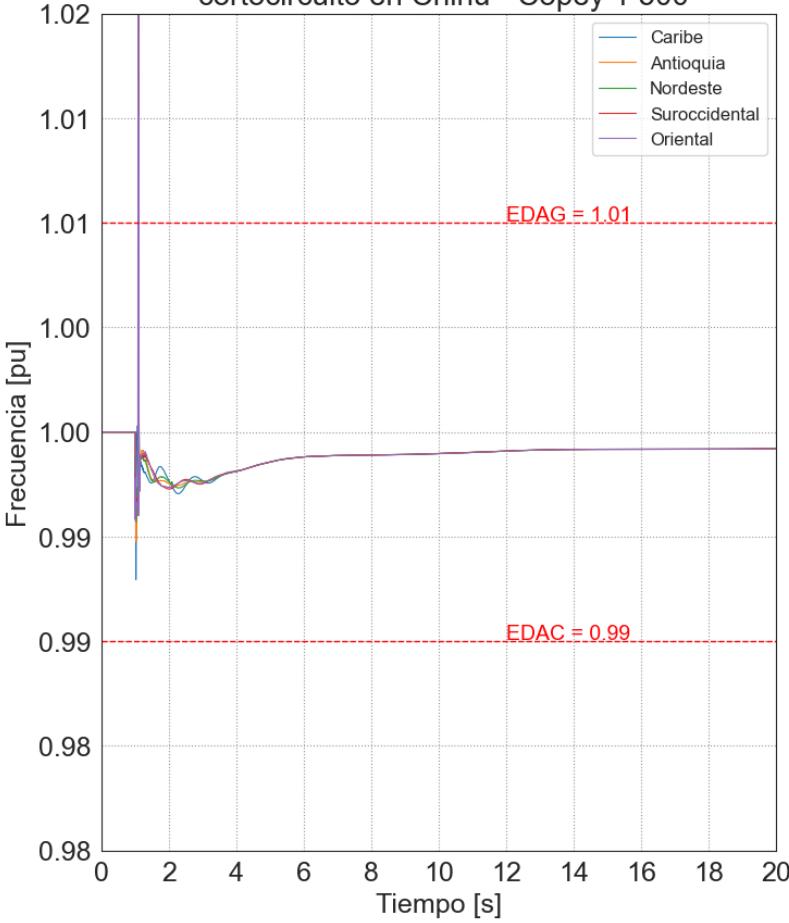
Ángulos de GS
cortocircuito en Chinu - Copey 1 500



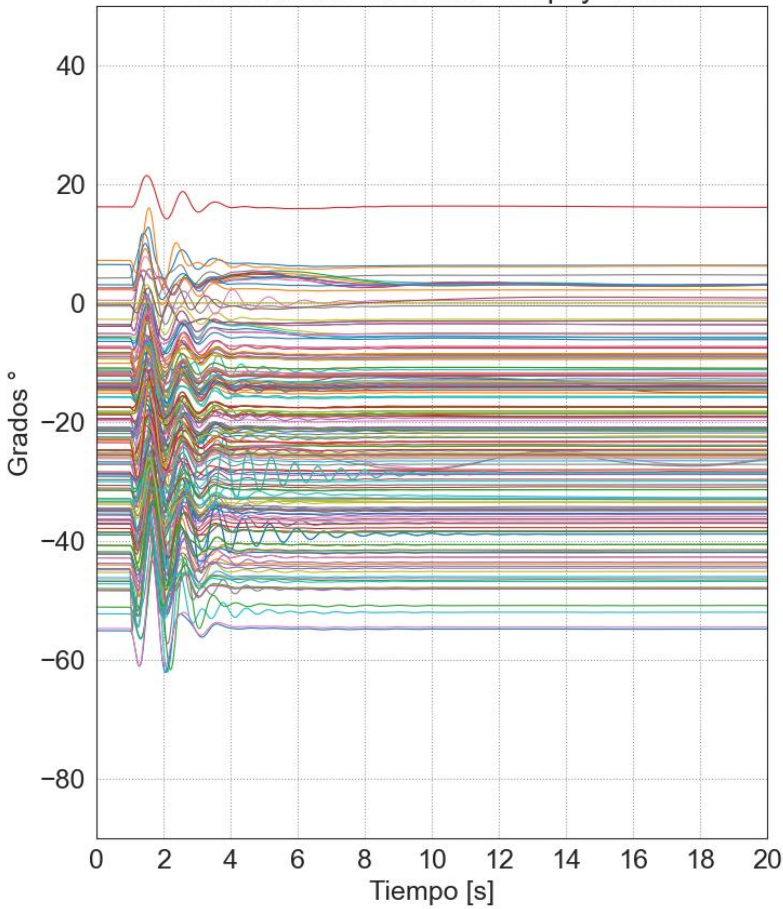
Tensión en barras de 500 kV
cortocircuito en Chinu - Copey 1 500



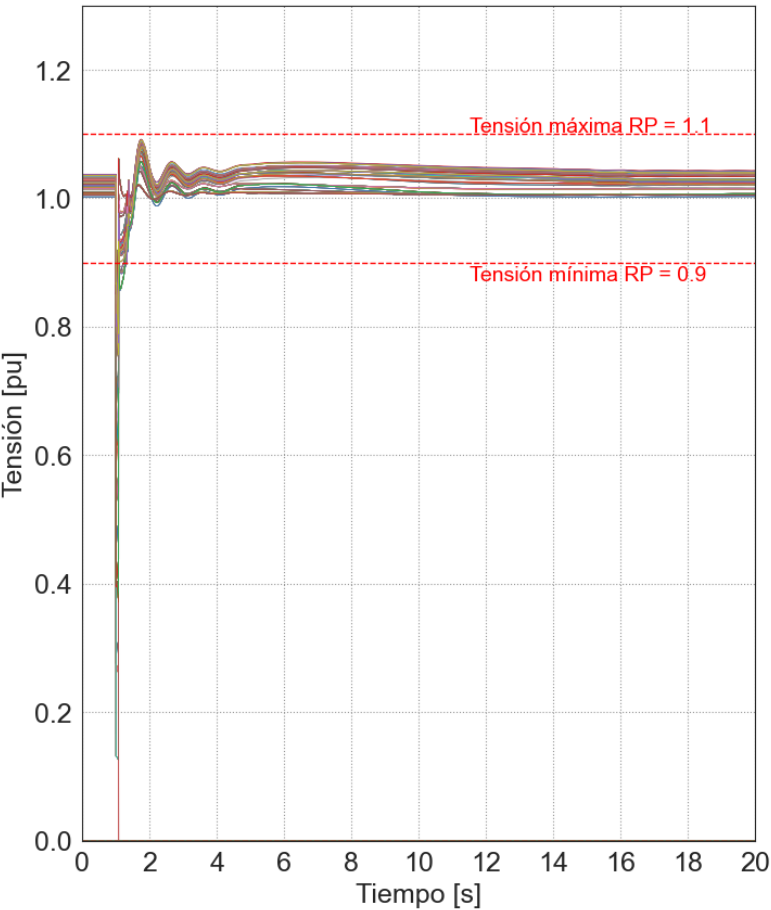
Frecuencia en barras de 500 kV
cortocircuito en Chinu - Copey 1 500



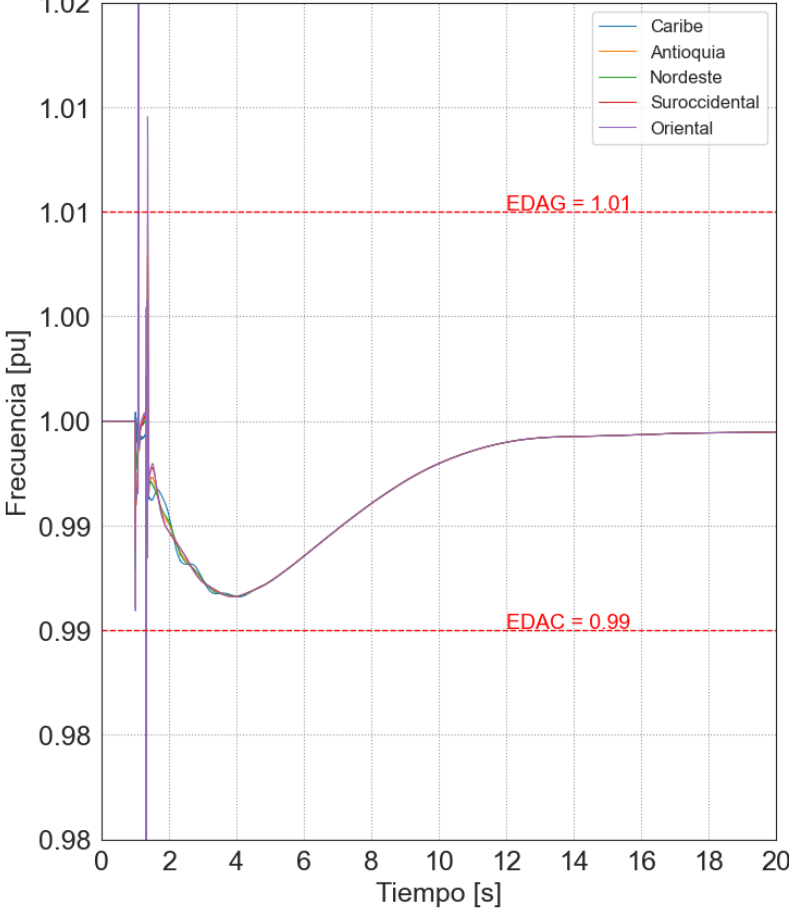
Ángulos de GS
cortocircuito en Chinu - Copey 1 500



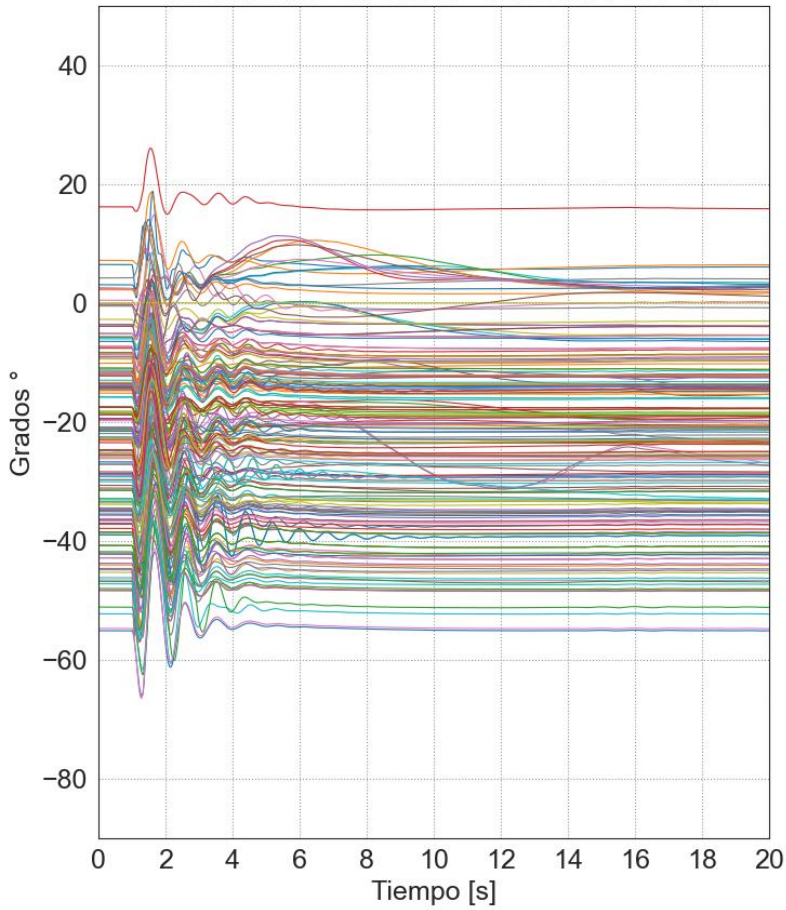
Tensión en barras de 500 kV
cortocircuito en Chinu - Sabana 2 500 T2



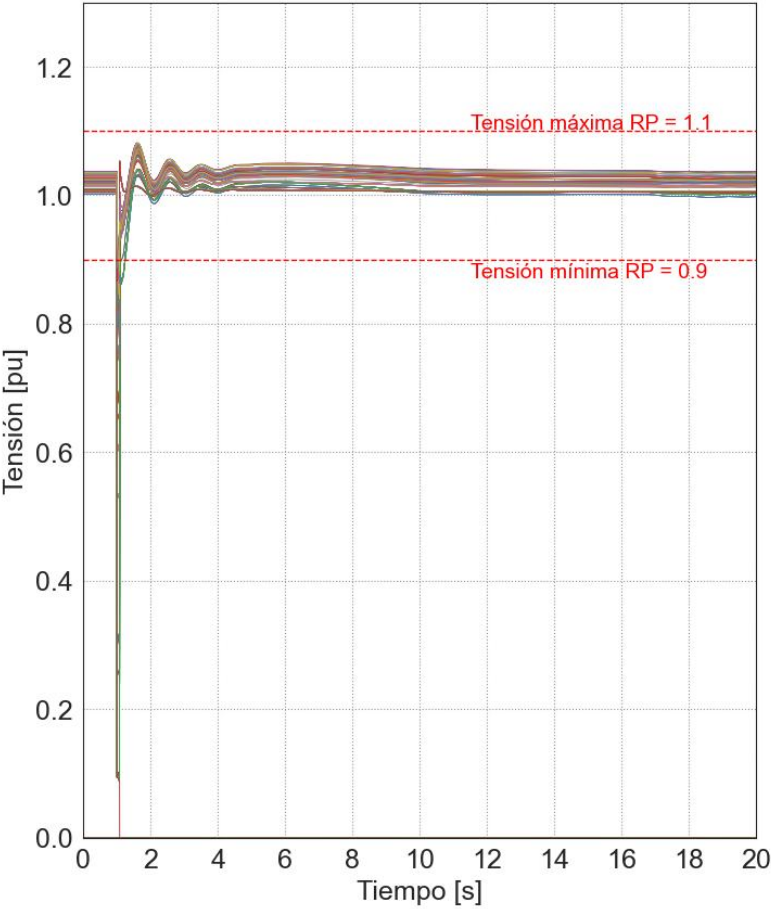
Frecuencia en barras de 500 kV
cortocircuito en Chinu - Sabana 2 500 T2



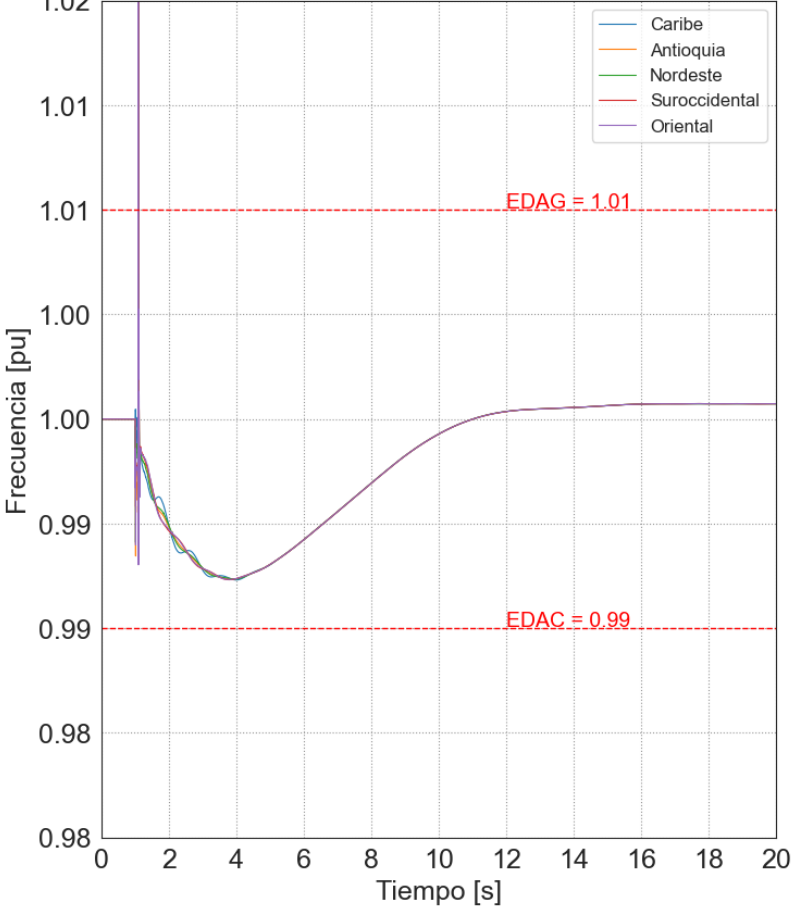
Ángulos de GS
cortocircuito en Chinu - Sabana 2 500 T2



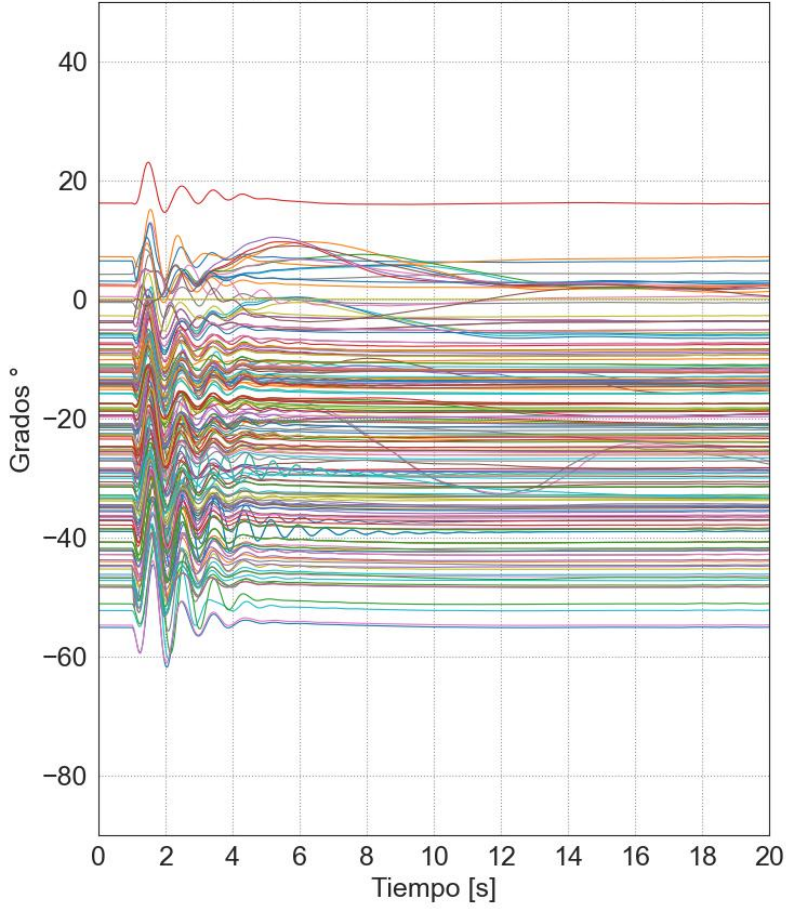
Tensión en barras de 500 kV
cortocircuito en Chinu - Sabana 2 500 T2



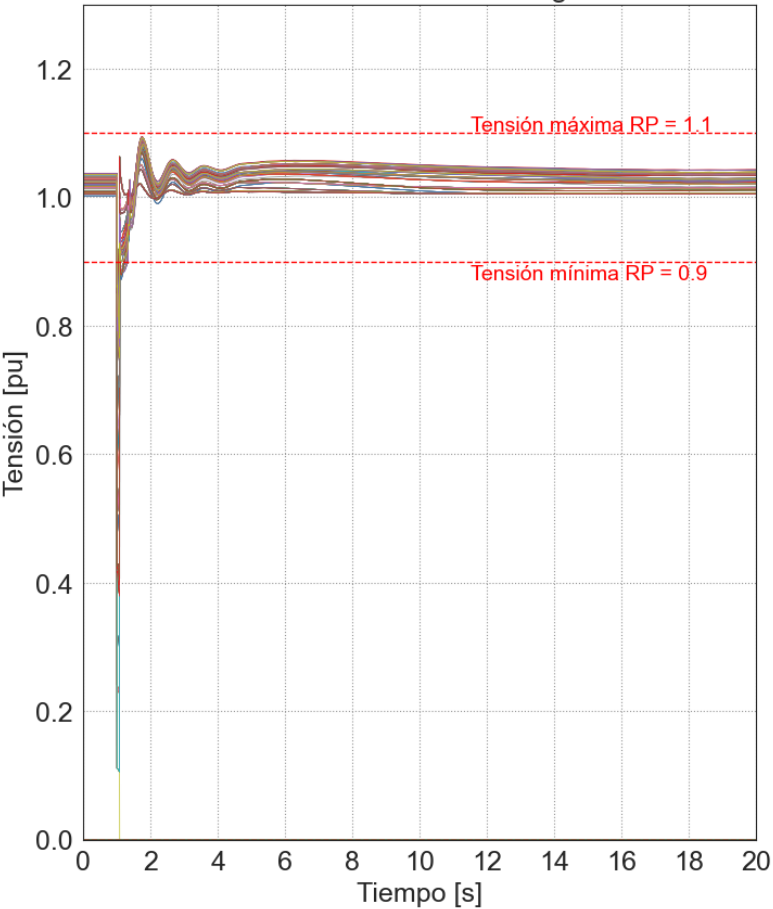
Frecuencia en barras de 500 kV
cortocircuito en Chinu - Sabana 2 500 T2



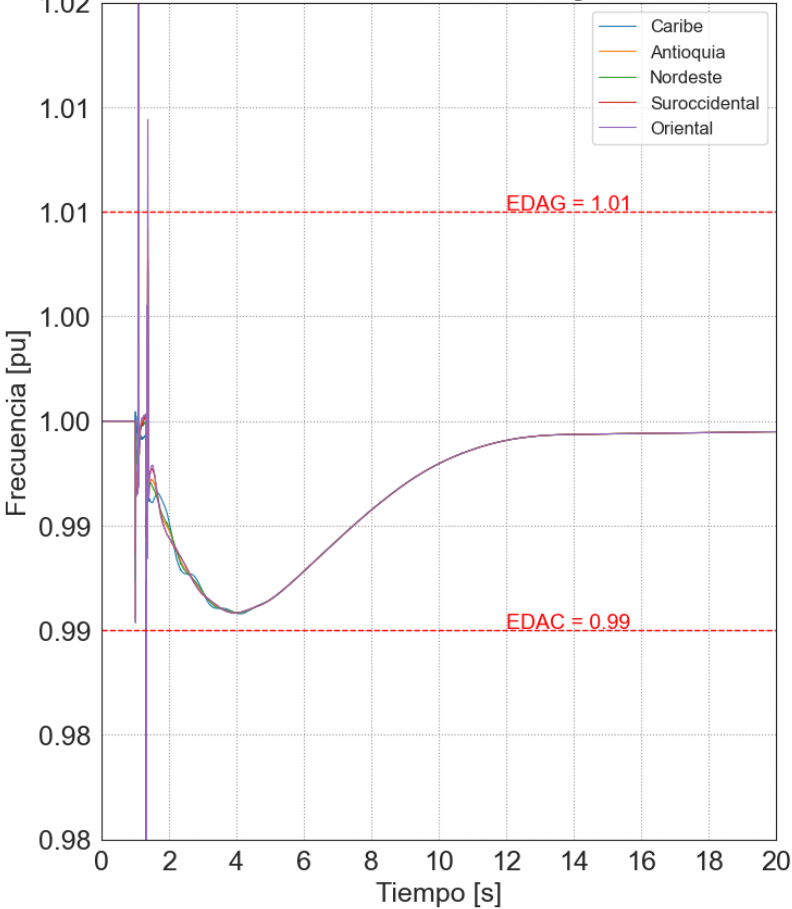
Ángulos de GS
cortocircuito en Chinu - Sabana 2 500 T2



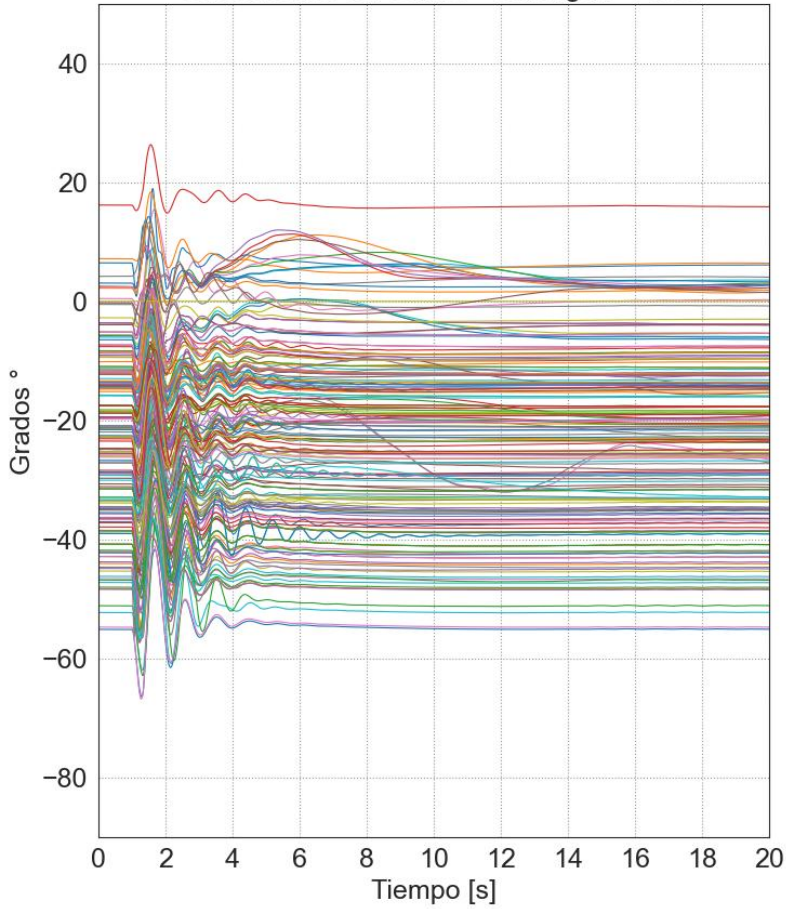
Tensión en barras de 500 kV
cortocircuito en Chinu - Sahagun 1 500



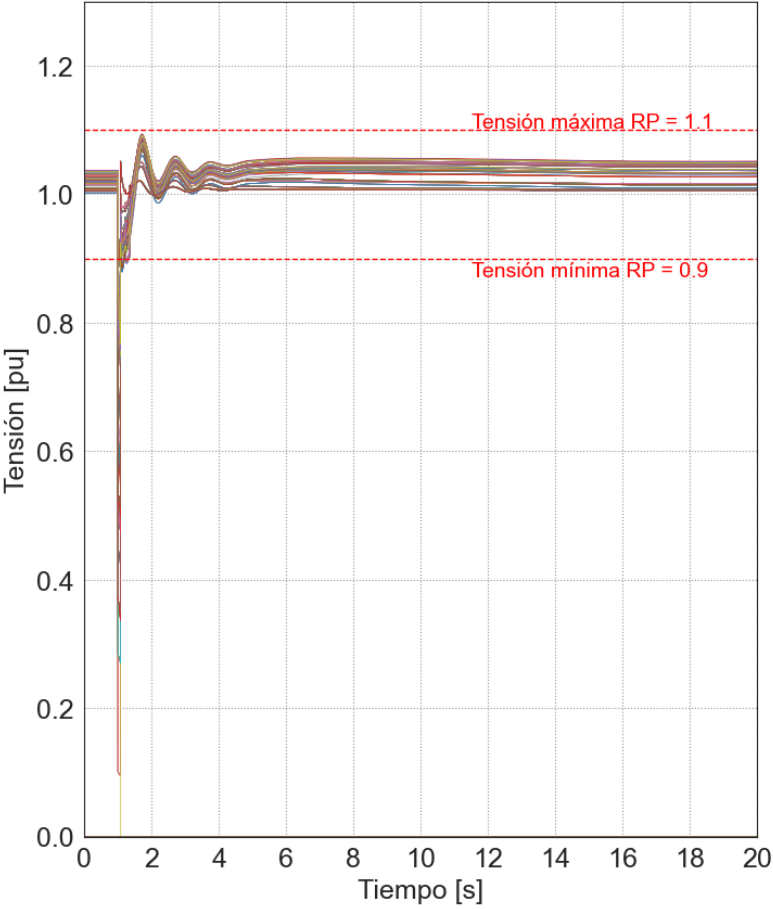
Frecuencia en barras de 500 kV
cortocircuito en Chinu - Sahagun 1 500



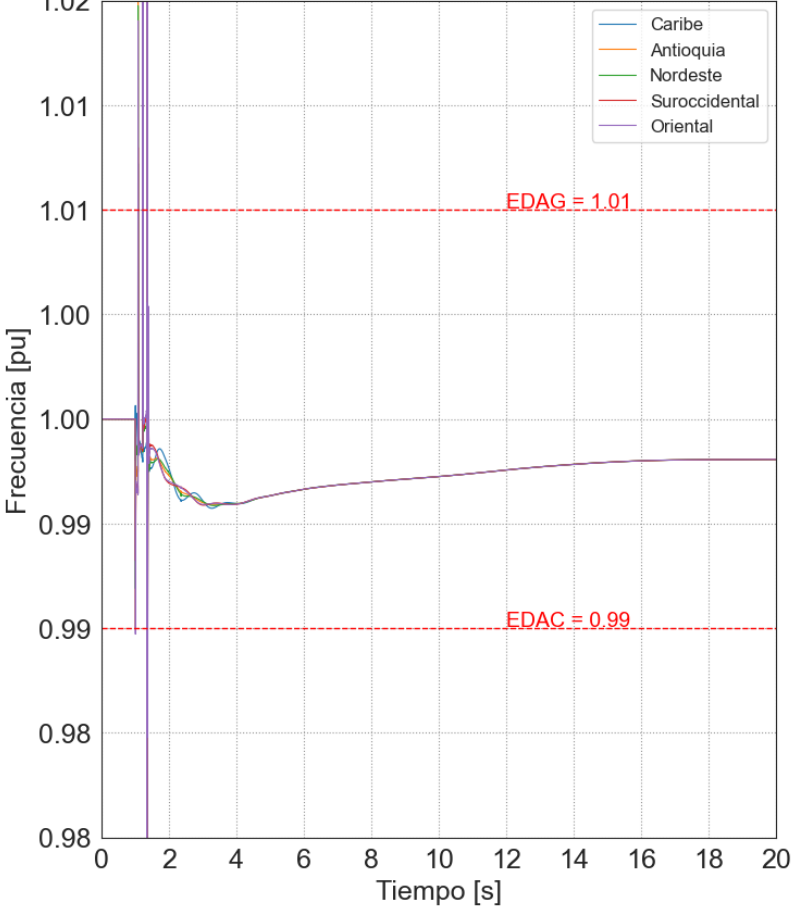
Ángulos de GS
cortocircuito en Chinu - Sahagun 1 500



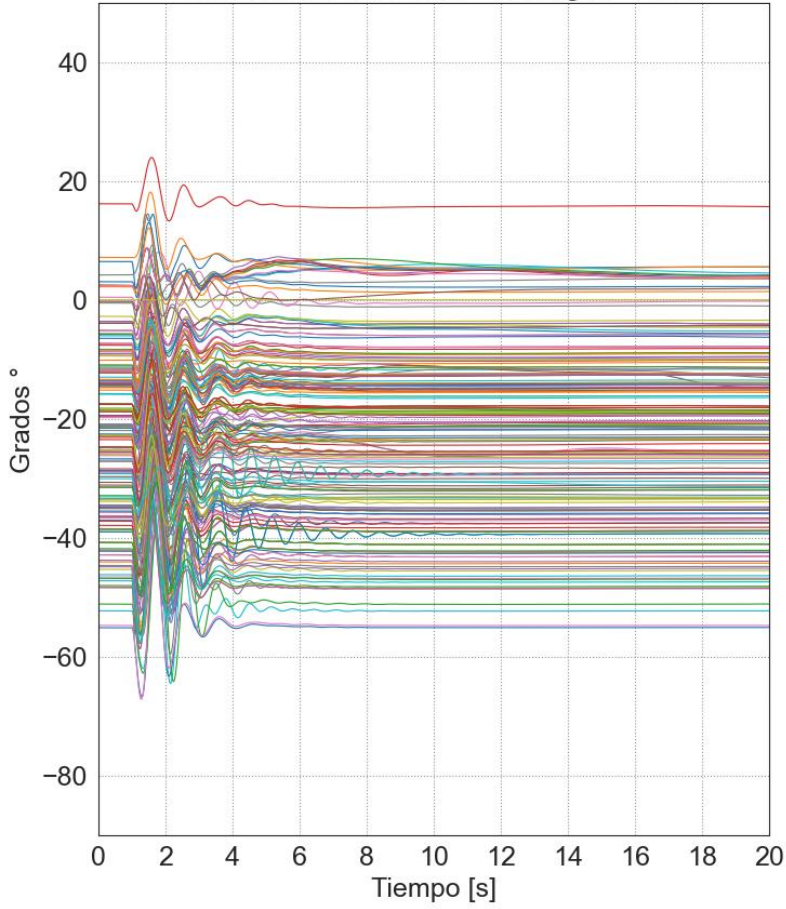
Tensión en barras de 500 kV
cortocircuito en Chinu - Sahagun 1 500



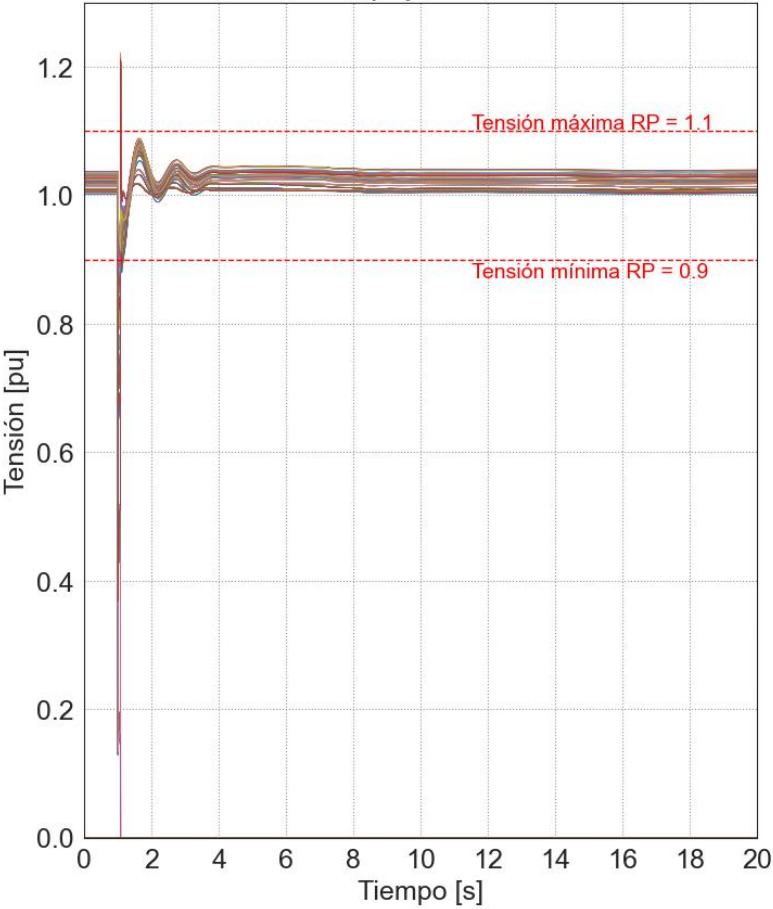
Frecuencia en barras de 500 kV
cortocircuito en Chinu - Sahagun 1 500



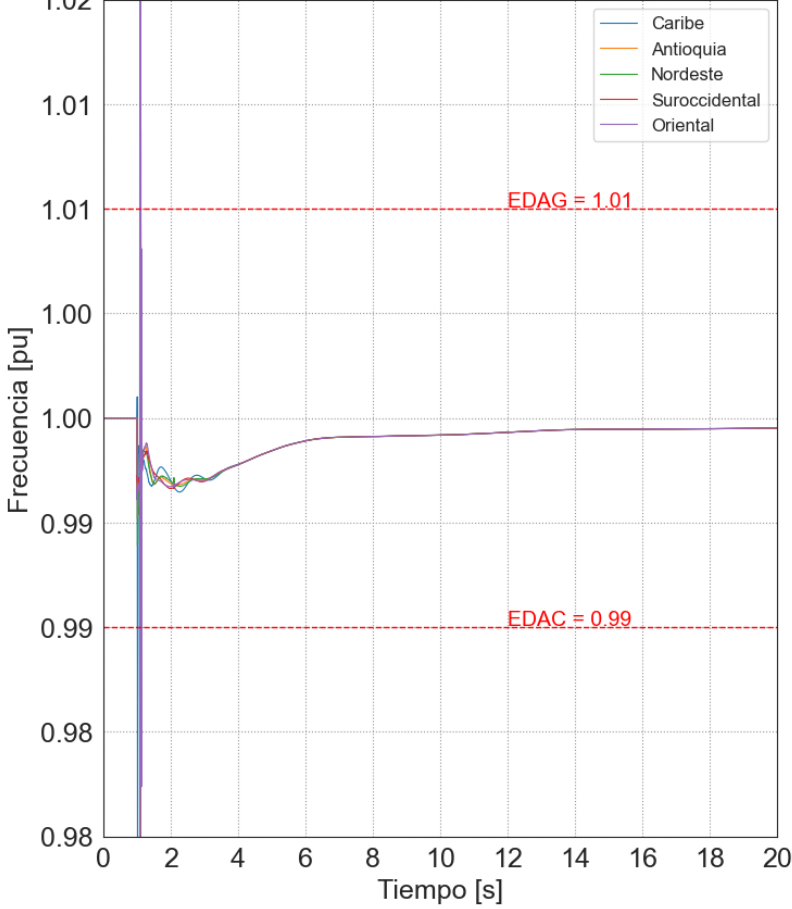
Ángulos de GS
cortocircuito en Chinu - Sahagun 1 500



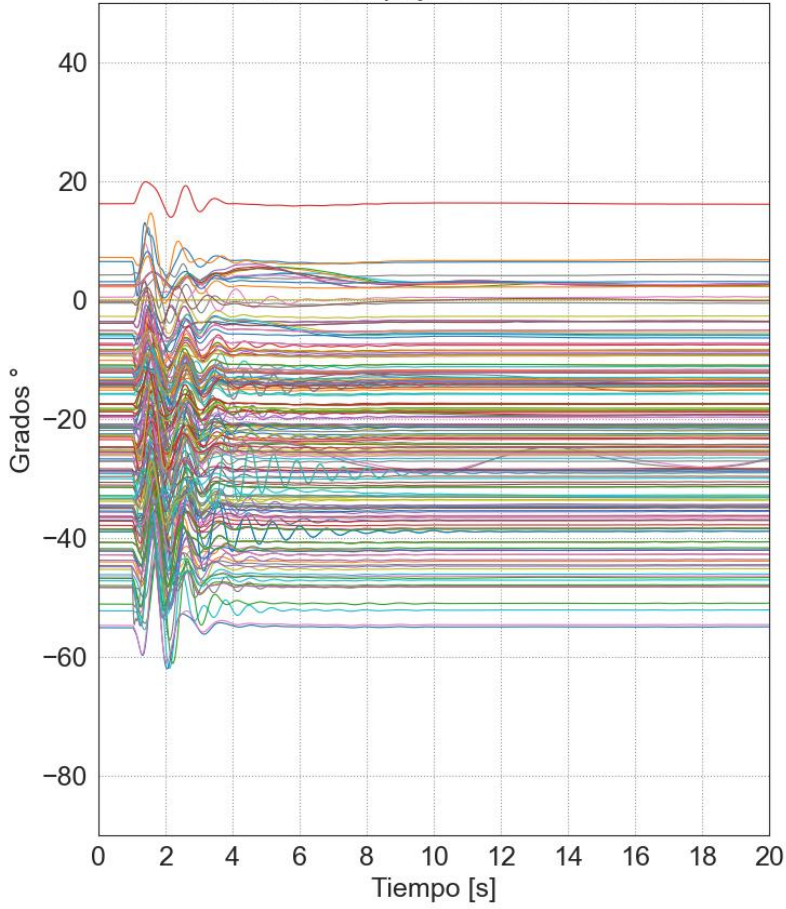
Tensión en barras de 500 kV
cortocircuito en Copey - Cuestecitas 1 500 T2



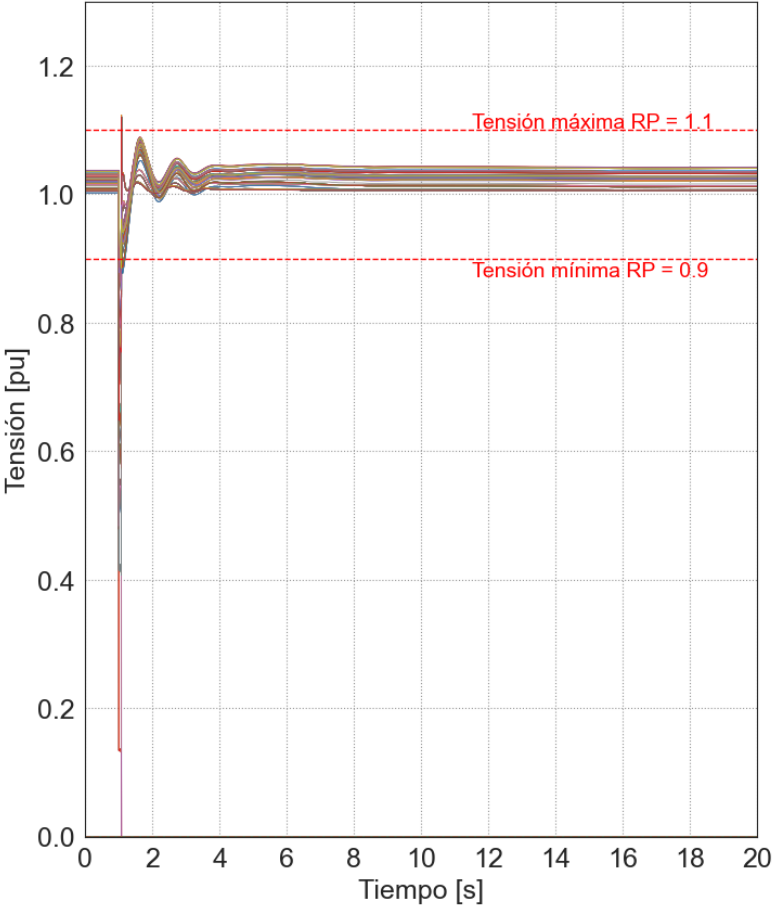
Frecuencia en barras de 500 kV
cortocircuito en Copey - Cuestecitas 1 500 T2



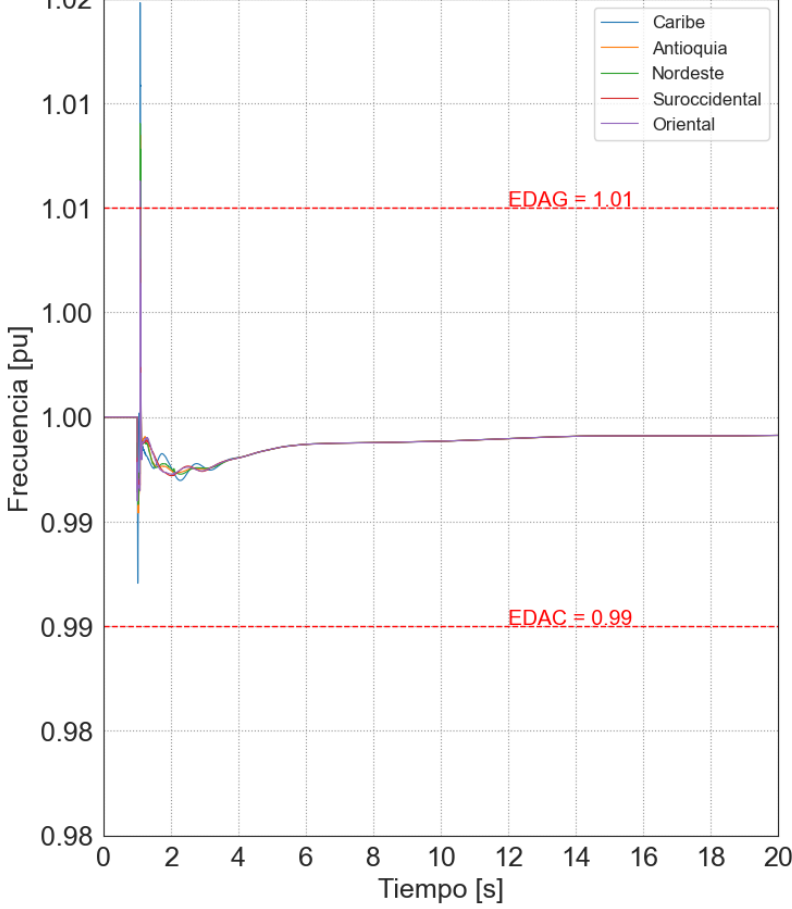
Ángulos de GS
cortocircuito en Copey - Cuestecitas 1 500 T2



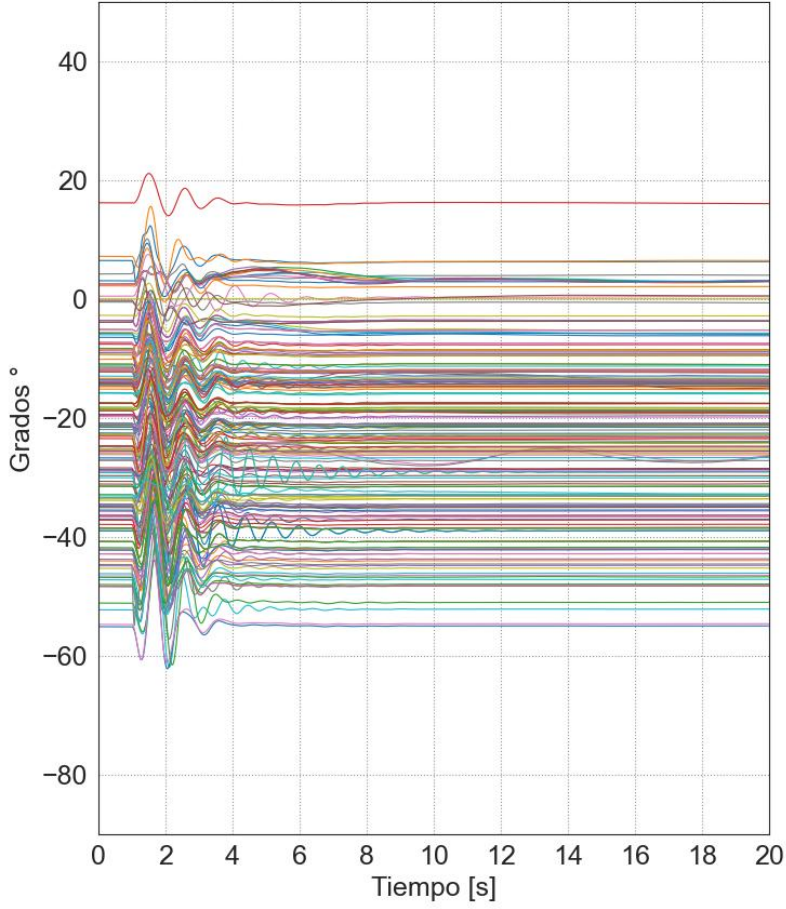
Tensión en barras de 500 kV
cortocircuito en Copey - Cuestecitas 1 500 T2



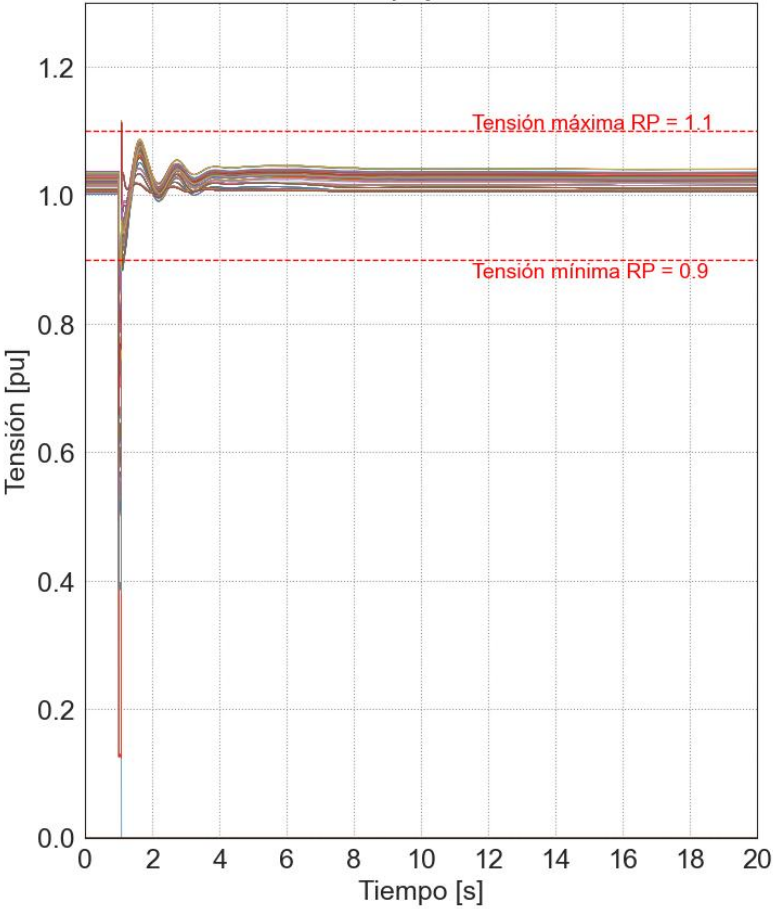
Frecuencia en barras de 500 kV
cortocircuito en Copey - Cuestecitas 1 500 T2



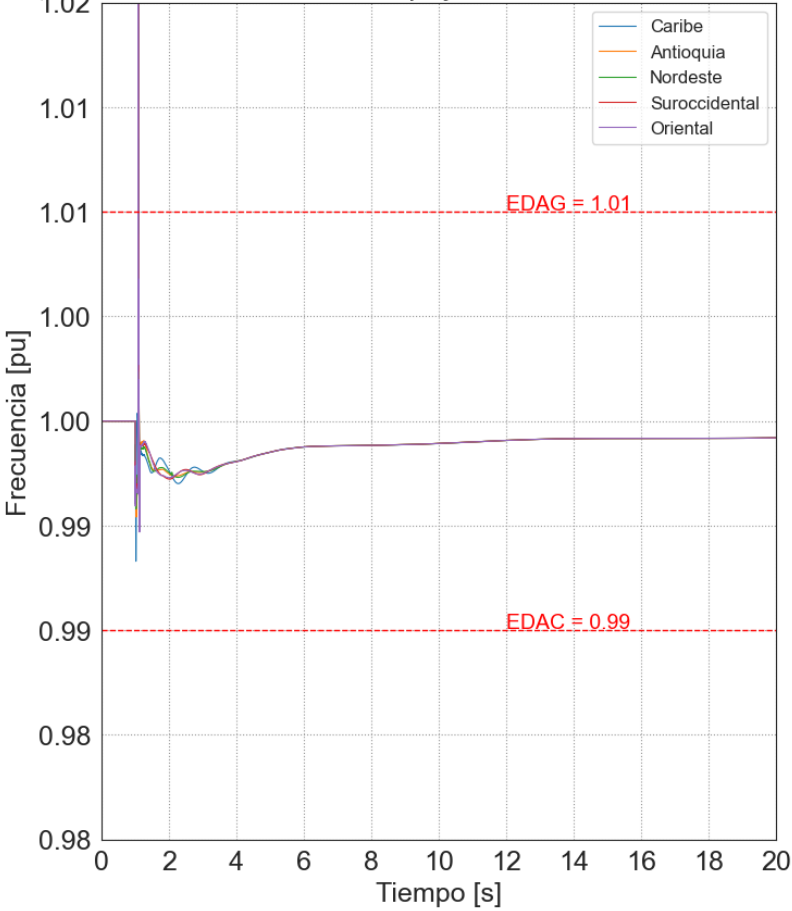
Ángulos de GS
cortocircuito en Copey - Cuestecitas 1 500 T2



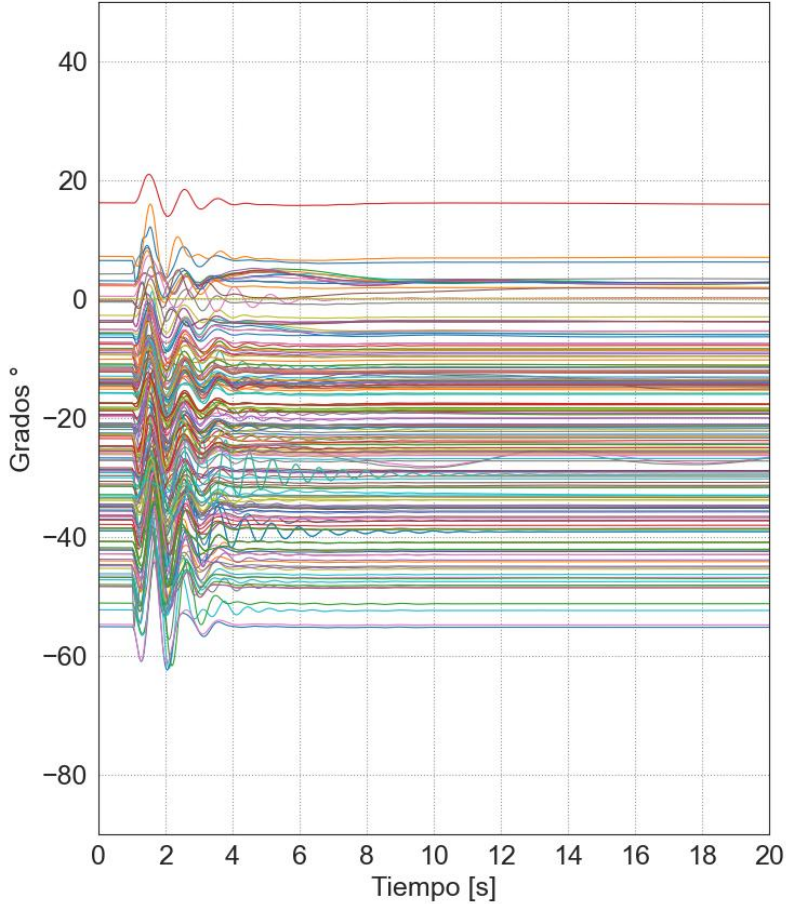
Tensión en barras de 500 kV
cortocircuito en Copey - La Loma 1 500 T2



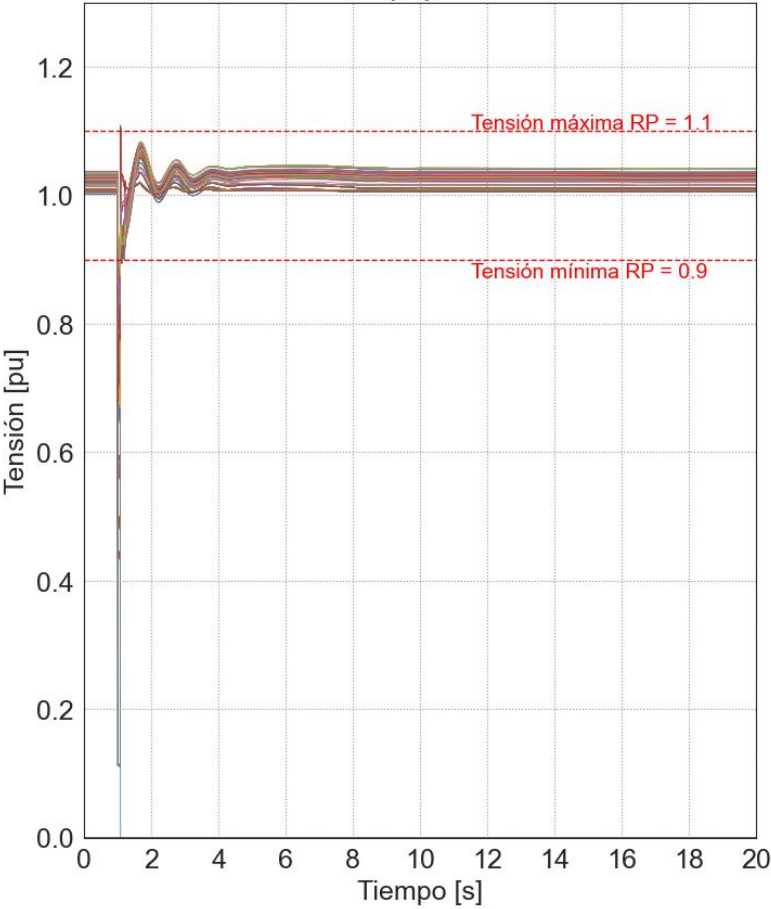
Frecuencia en barras de 500 kV
cortocircuito en Copey - La Loma 1 500 T2



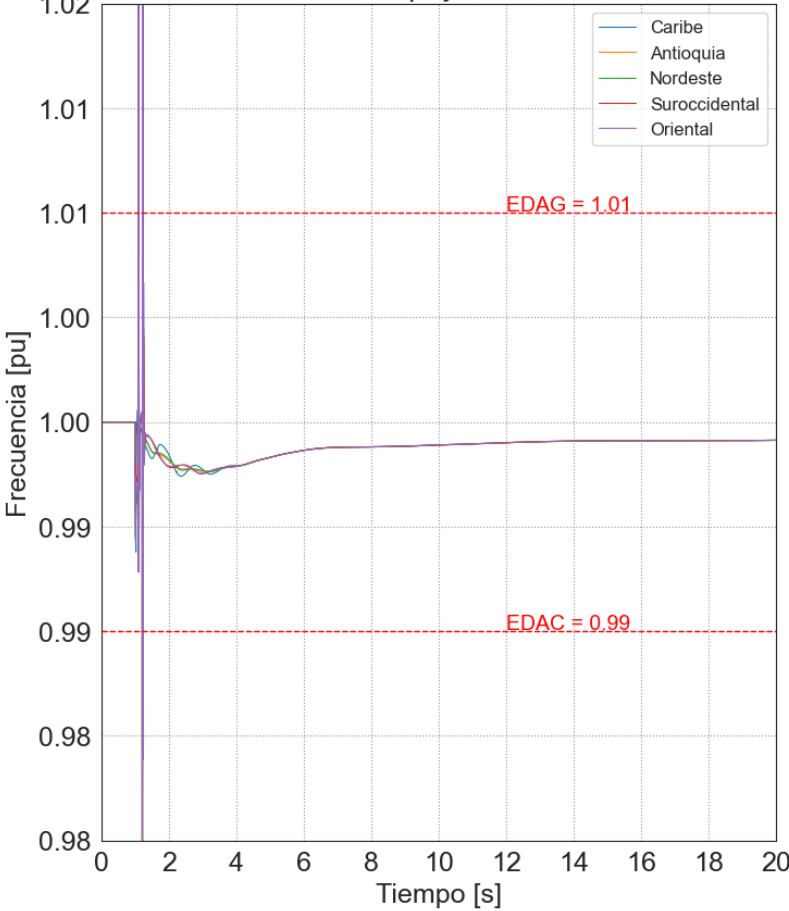
Ángulos de GS
cortocircuito en Copey - La Loma 1 500 T2



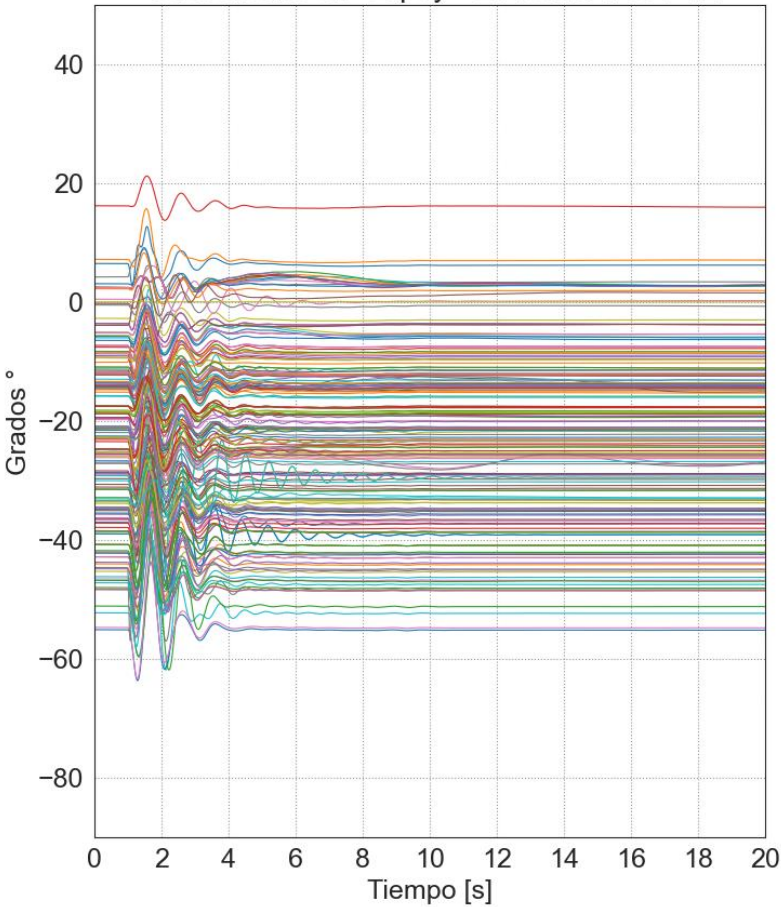
Tensión en barras de 500 kV
cortocircuito en Copey - La Loma 1 500 T2



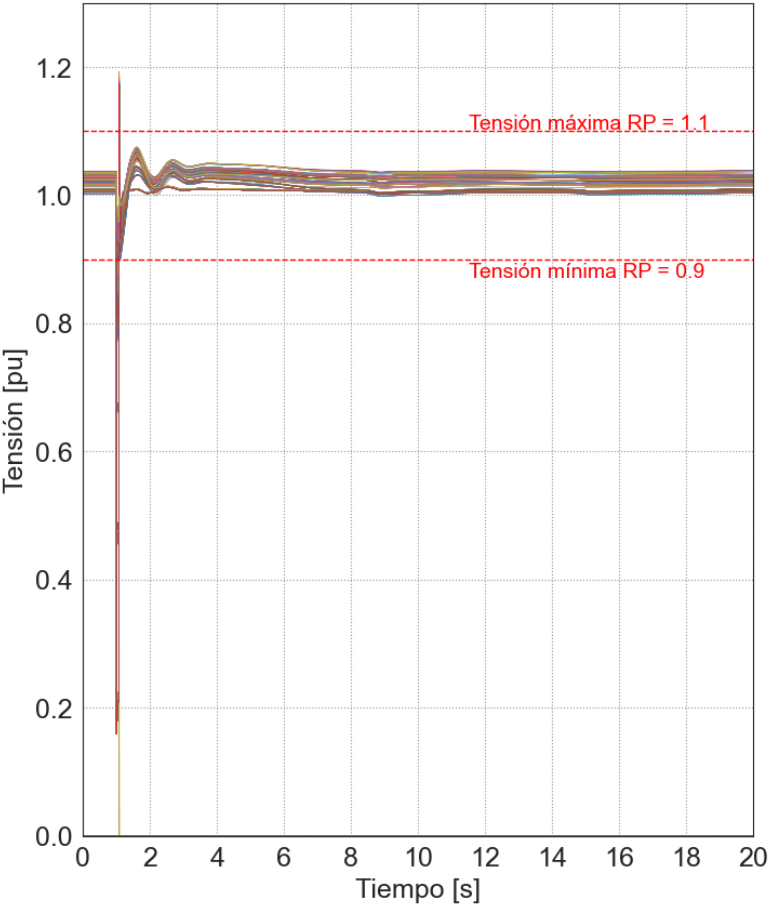
Frecuencia en barras de 500 kV
cortocircuito en Copey - La Loma 1 500 T2



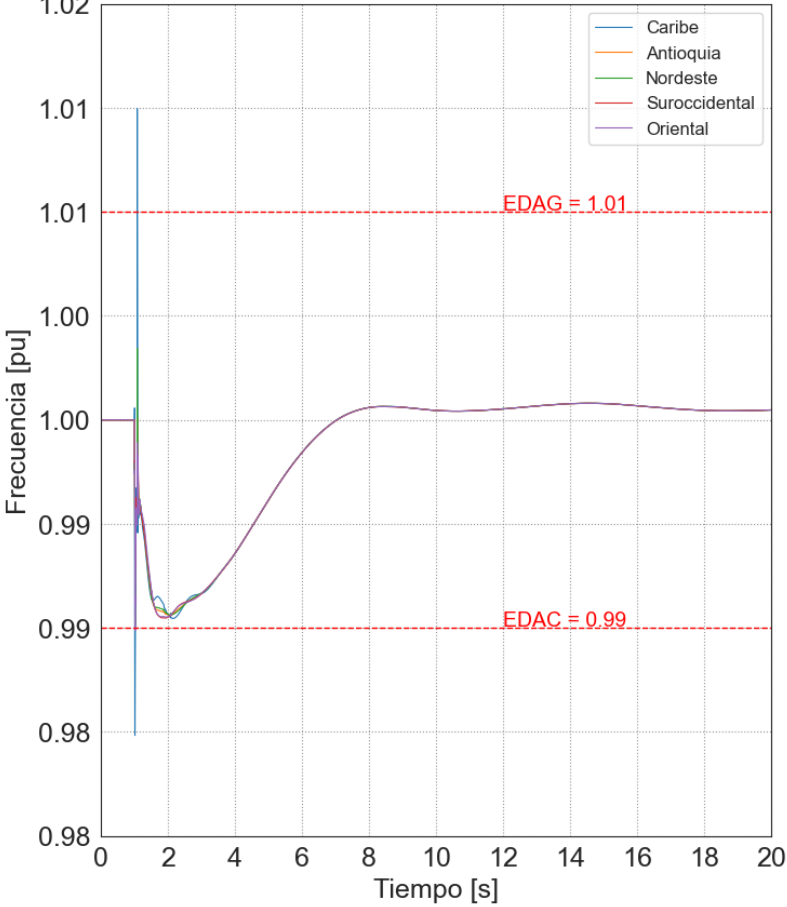
Ángulos de GS
cortocircuito en Copey - La Loma 1 500 T2



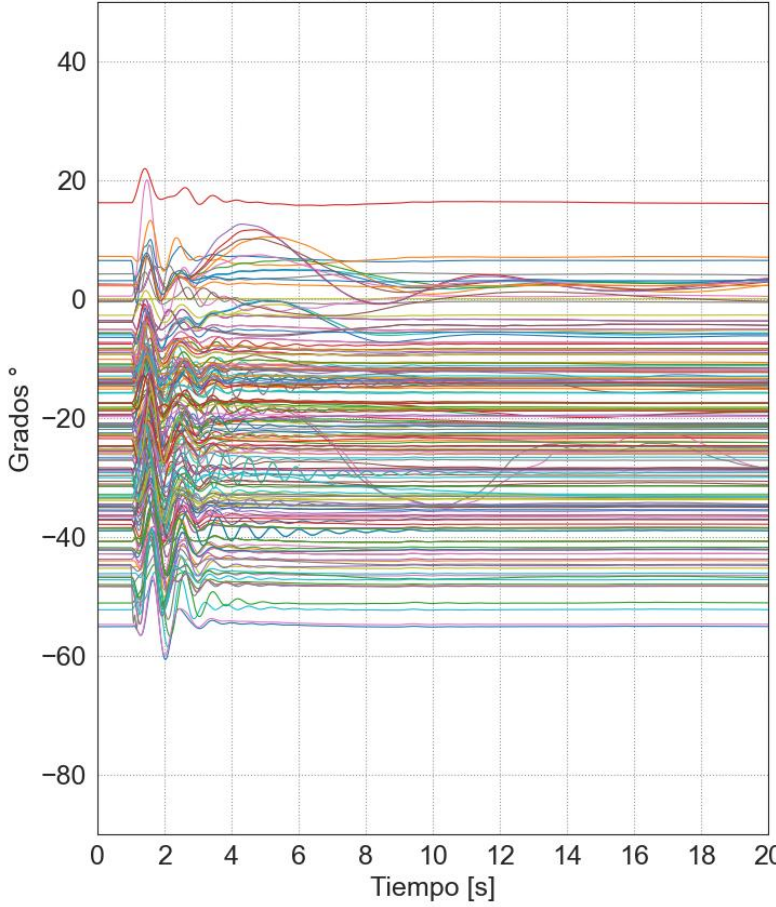
Tensión en barras de 500 kV
cortocircuito en Cuestecitas - Colectora1 1 500 T2

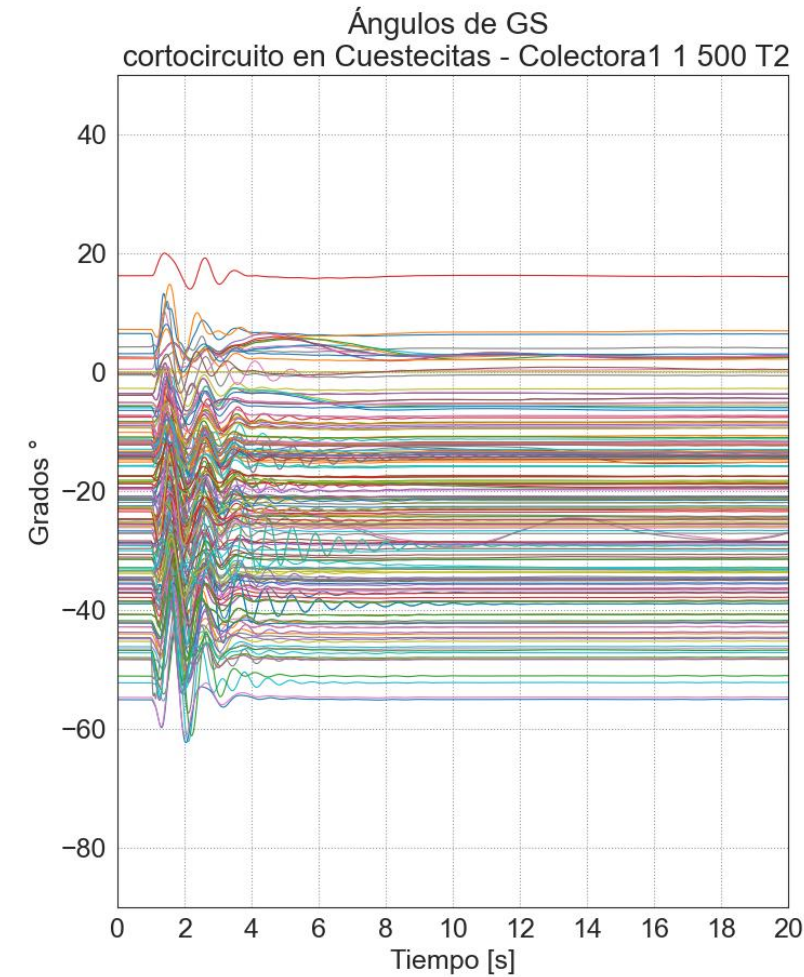
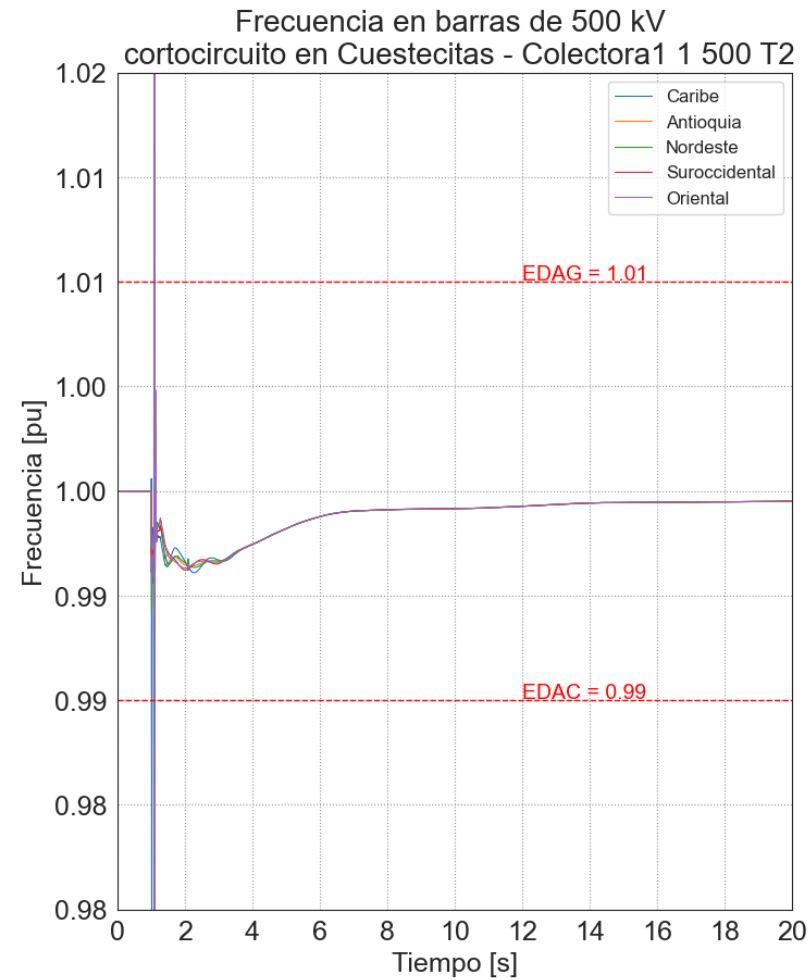
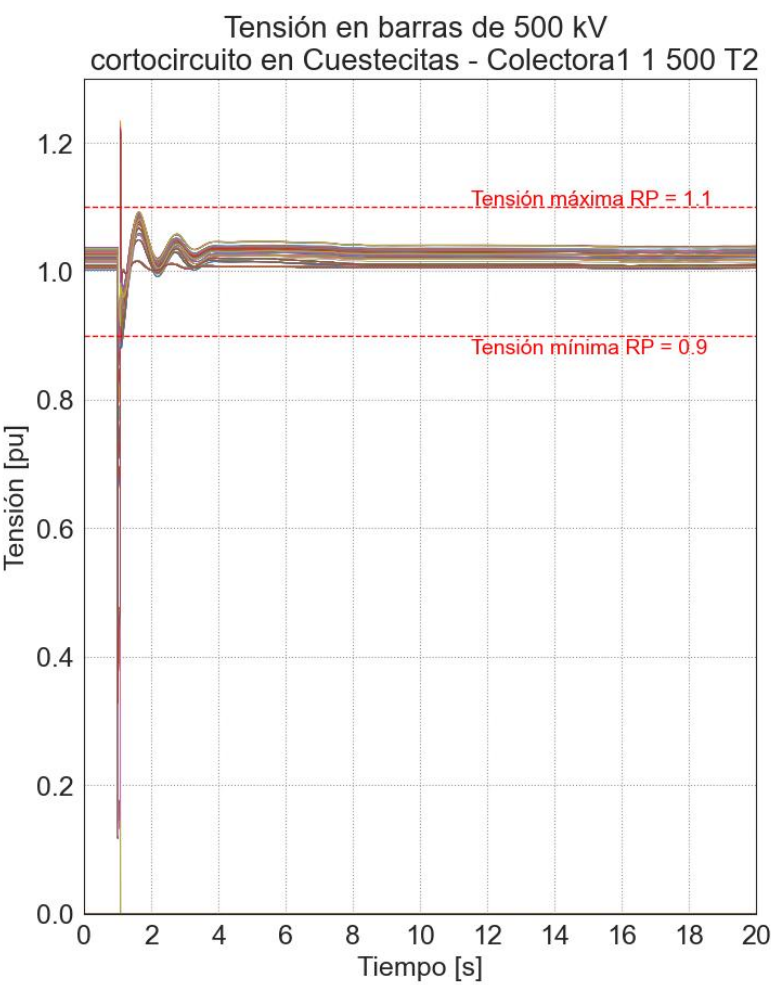


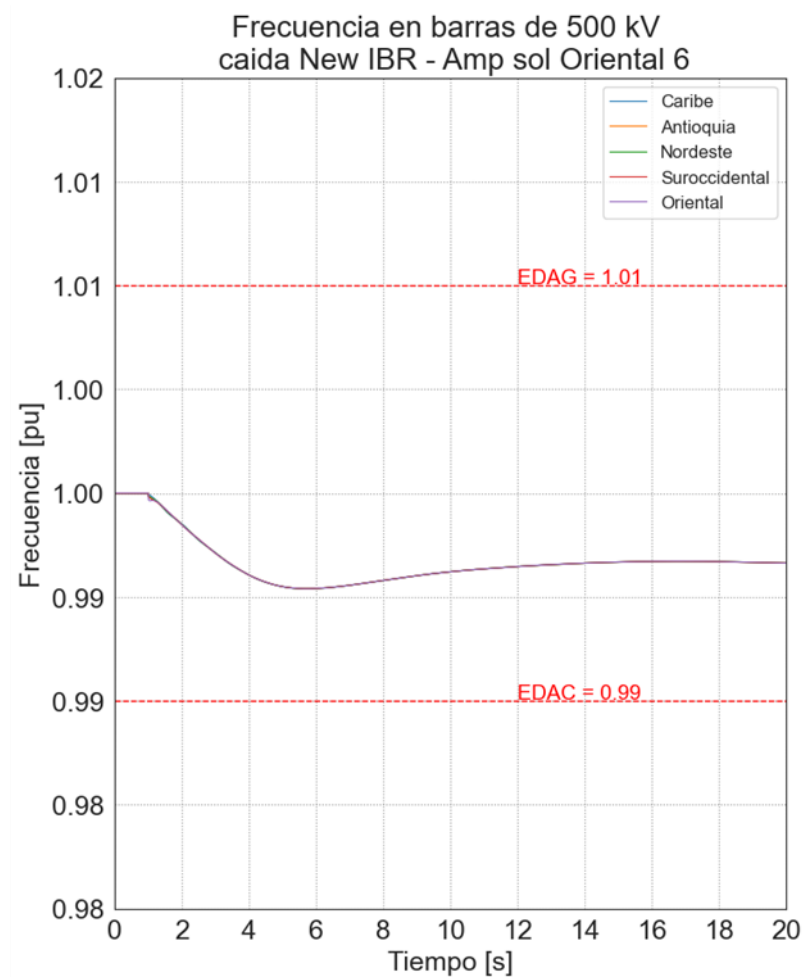
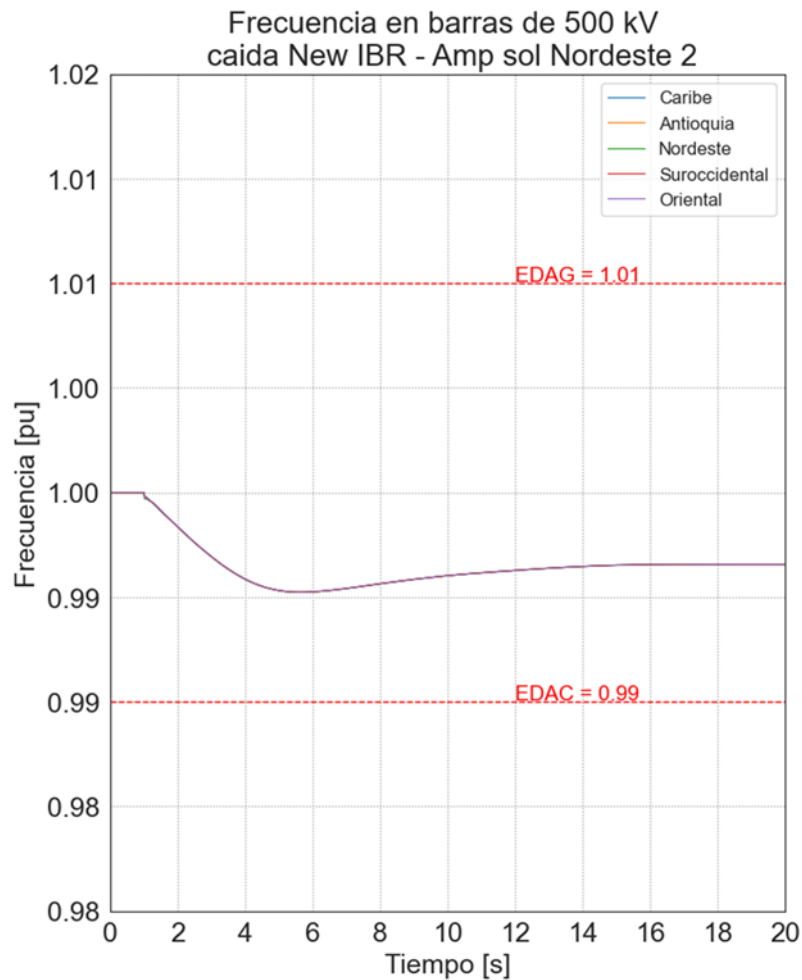
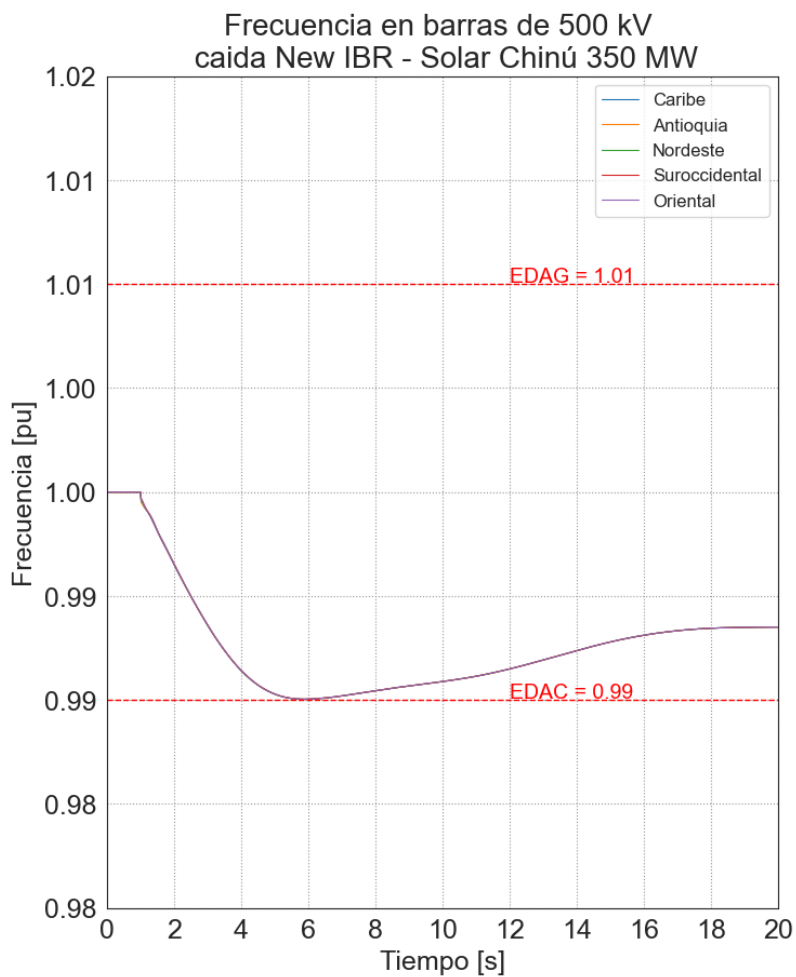
Frecuencia en barras de 500 kV
cortocircuito en Cuestecitas - Colectora1 1 500 T2

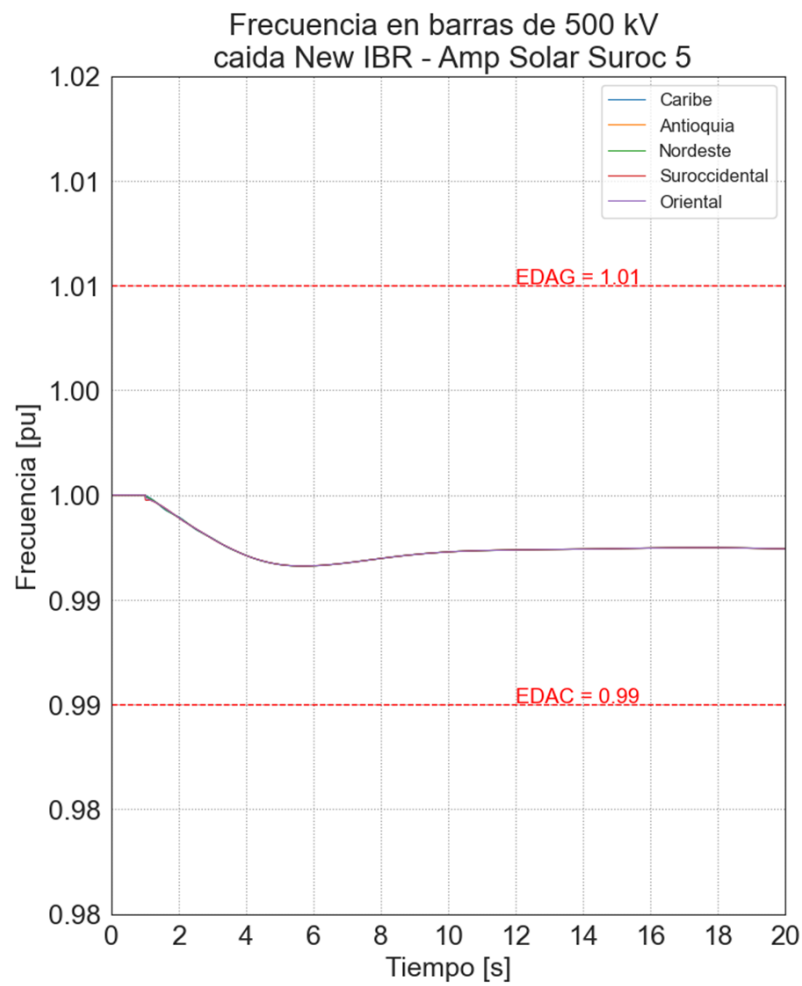
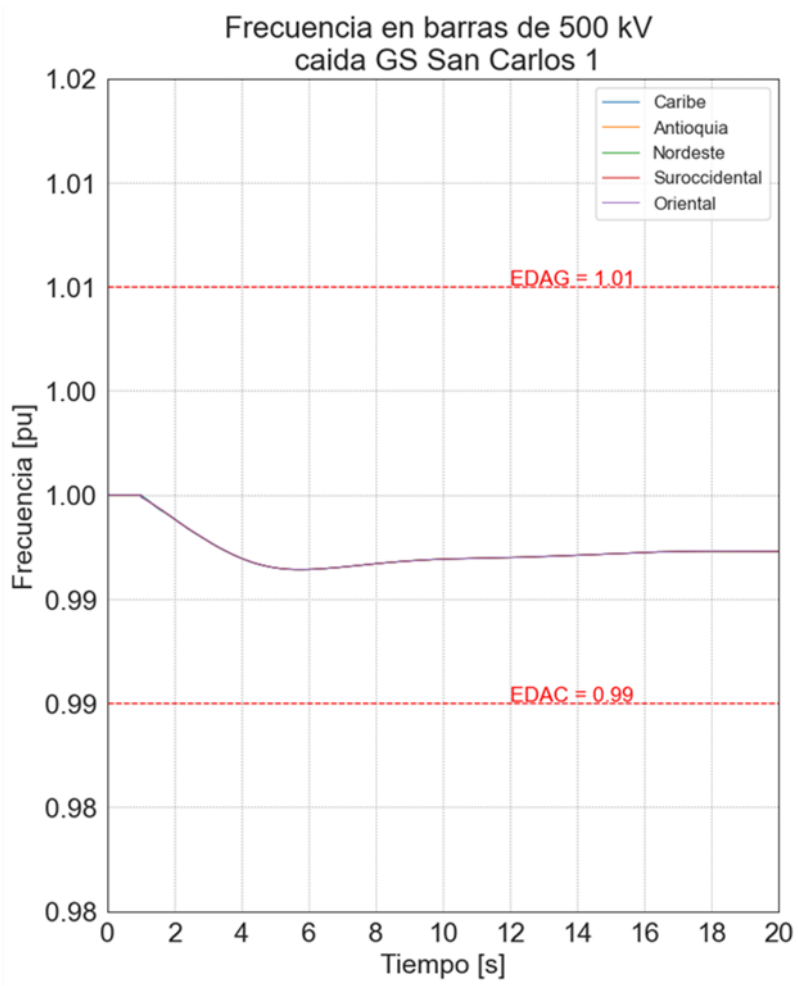


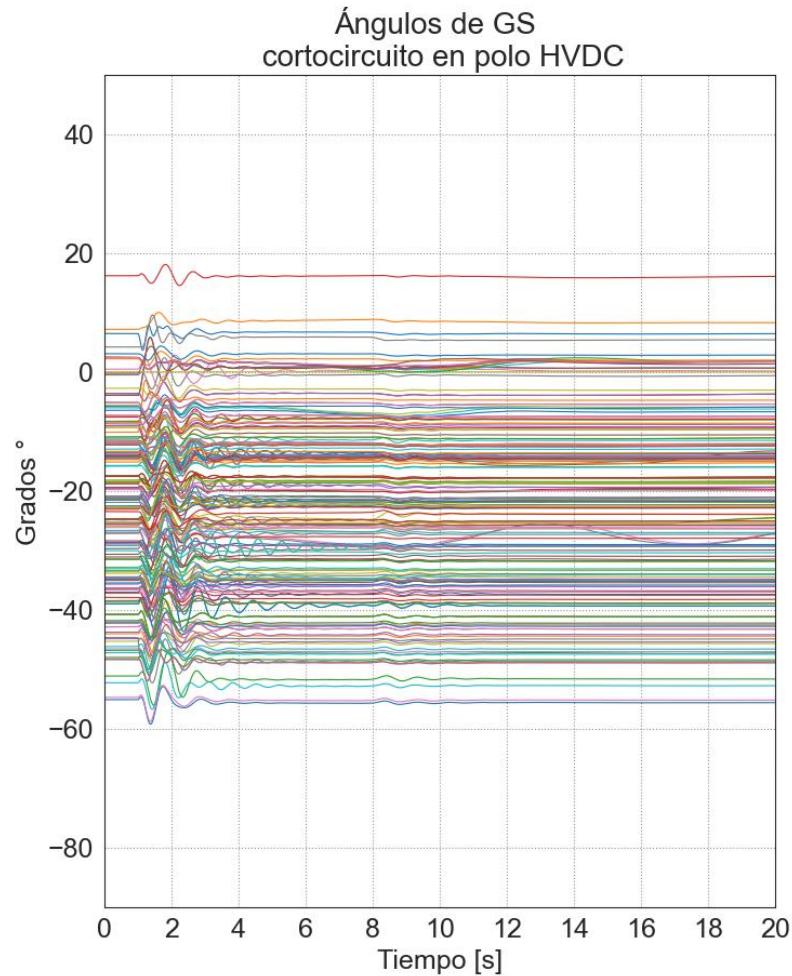
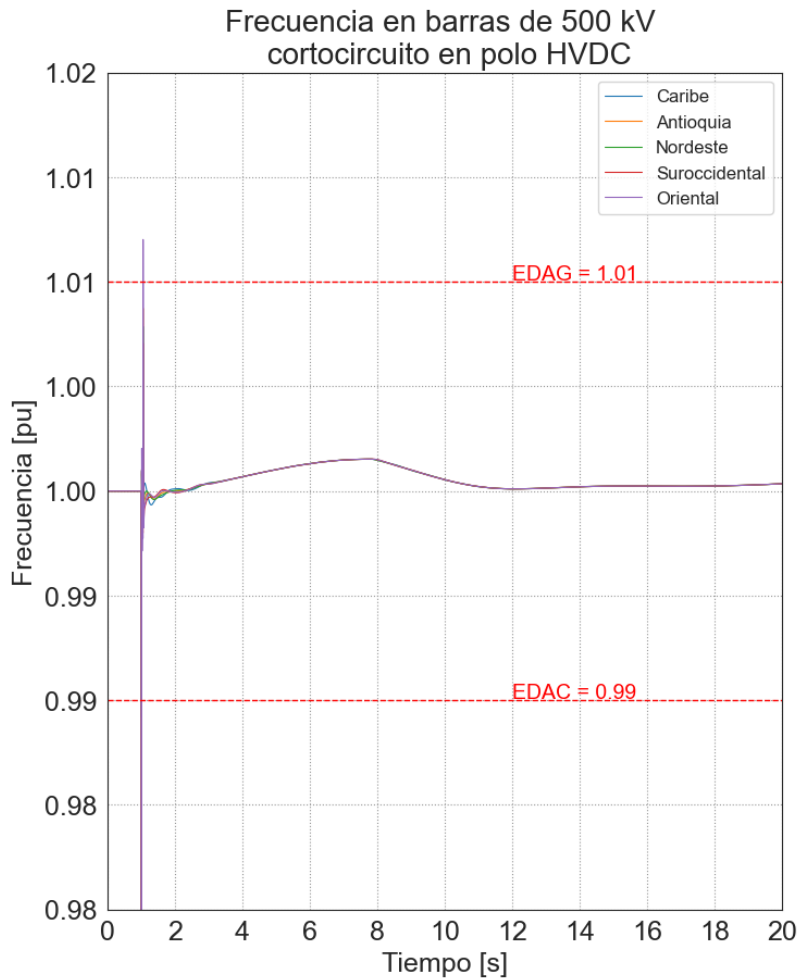
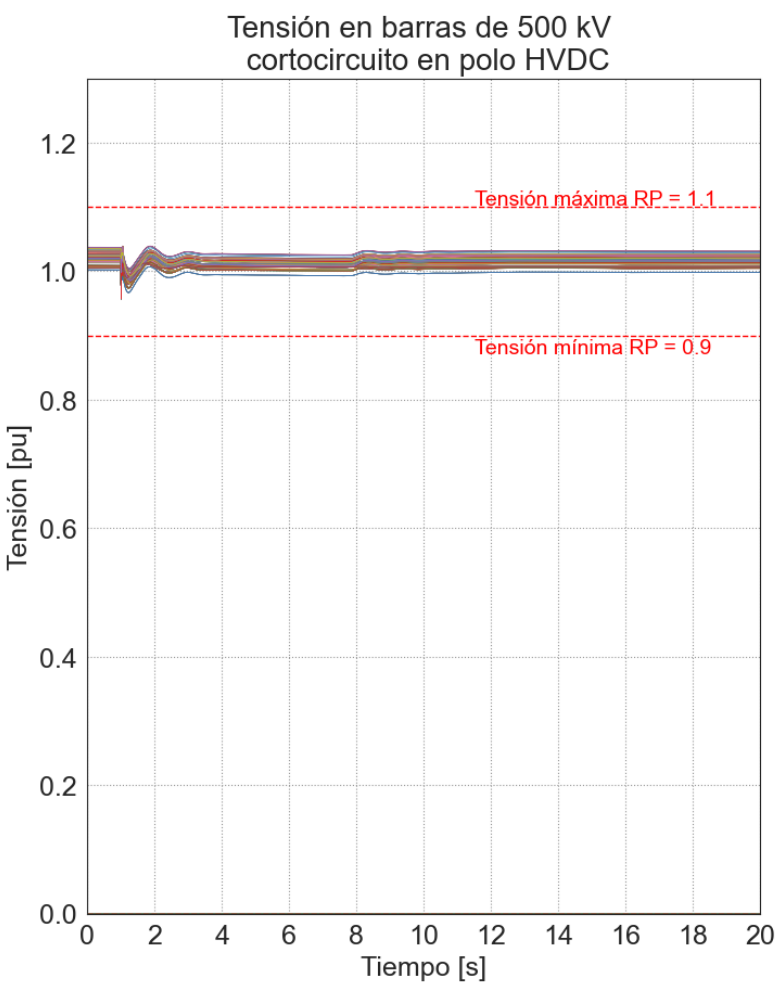
Ángulos de GS
cortocircuito en Cuestecitas - Colectora1 1 500 T2



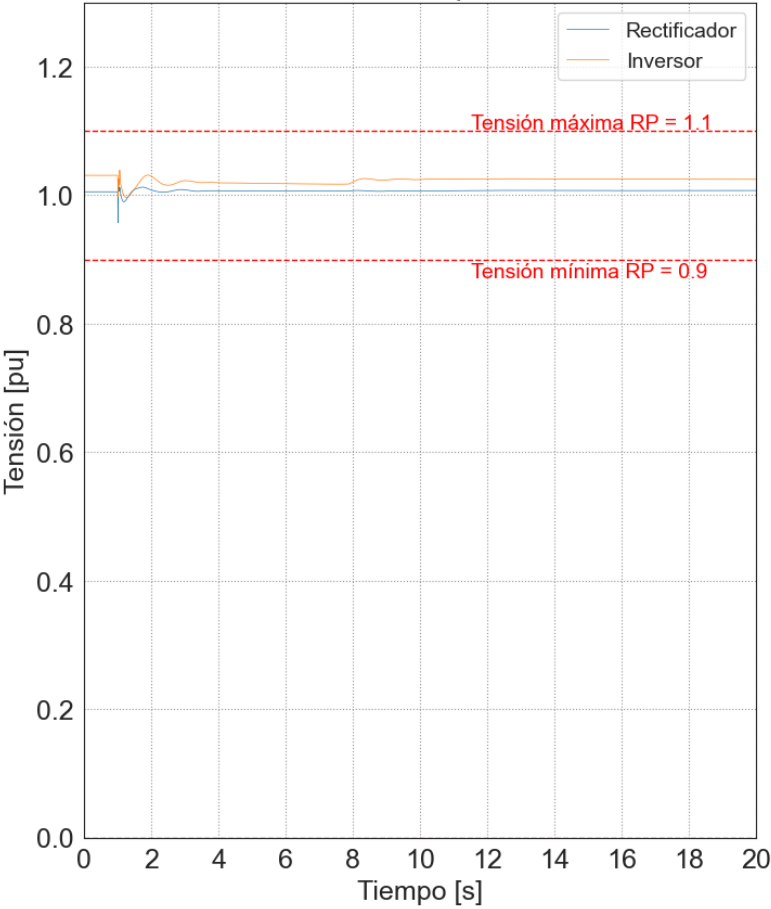




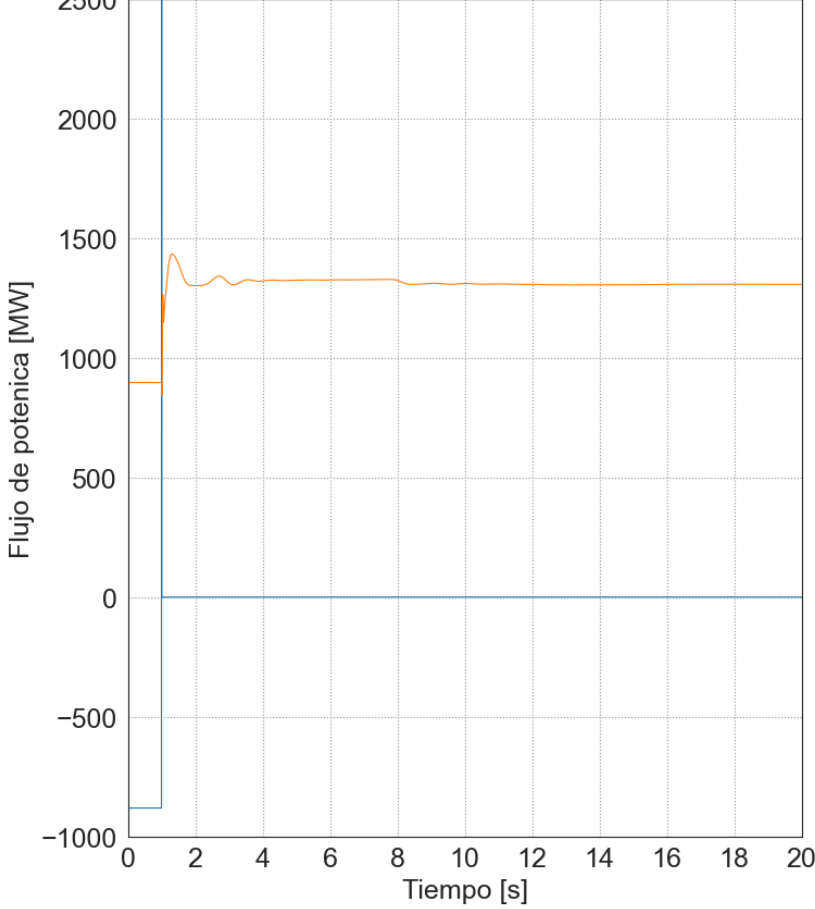




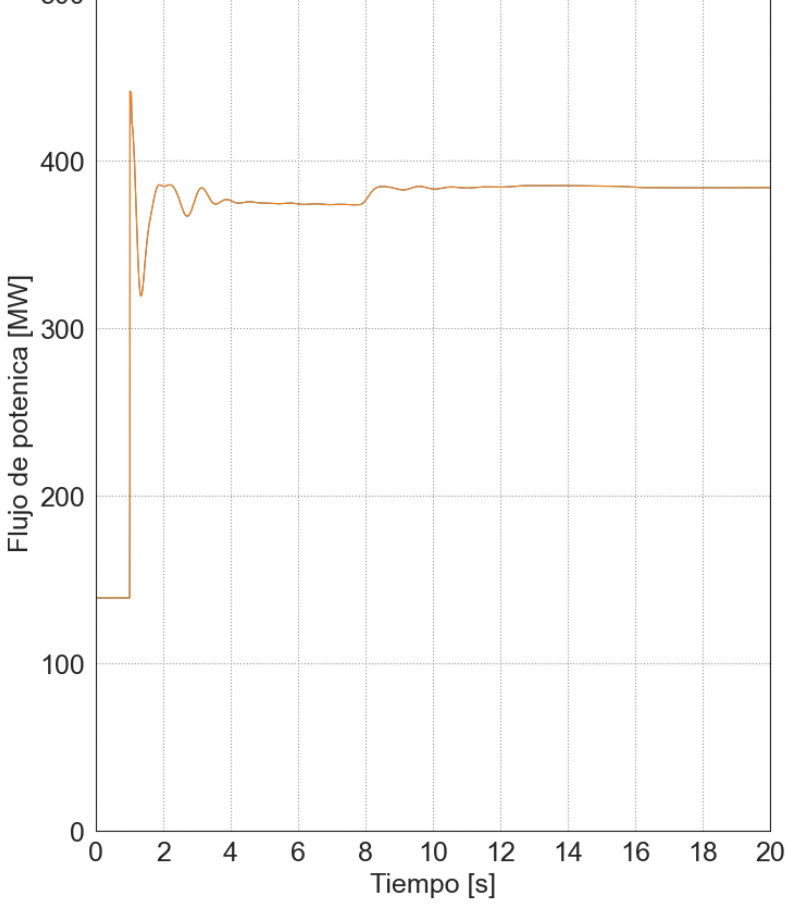
Tensión en barras HVDC
cortocircuito en polo HVDC



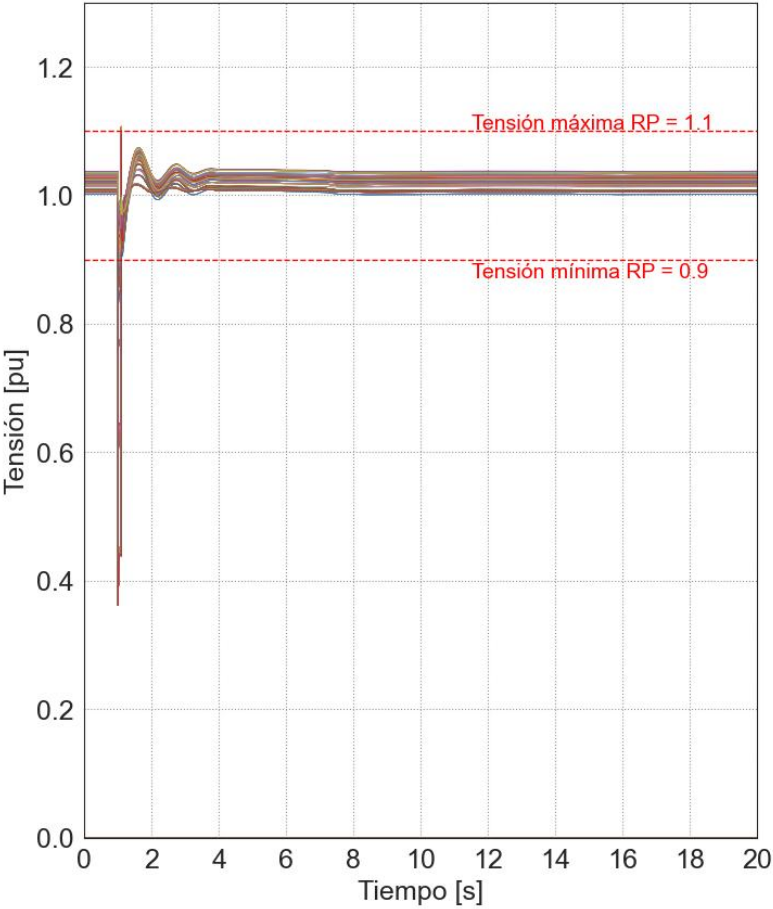
Flujo de potencia en polos HVDC durante
cortocircuito en polo HVDC



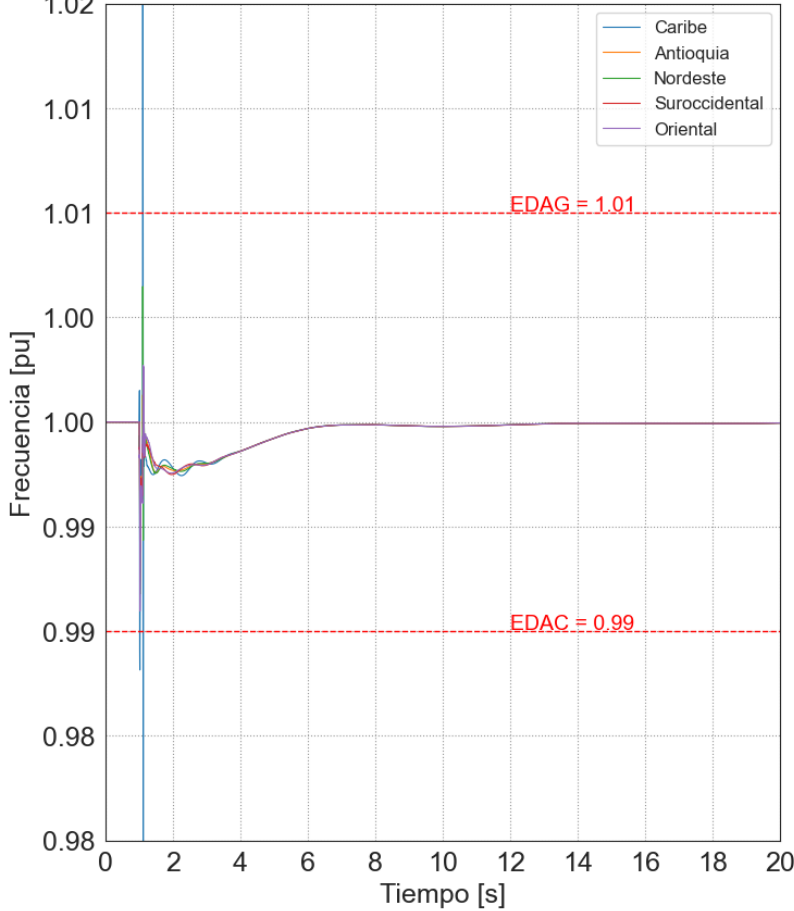
Flujo de potencia en tramo Colec-Cuest 500 kV
durante cortocircuito en polo HVDC



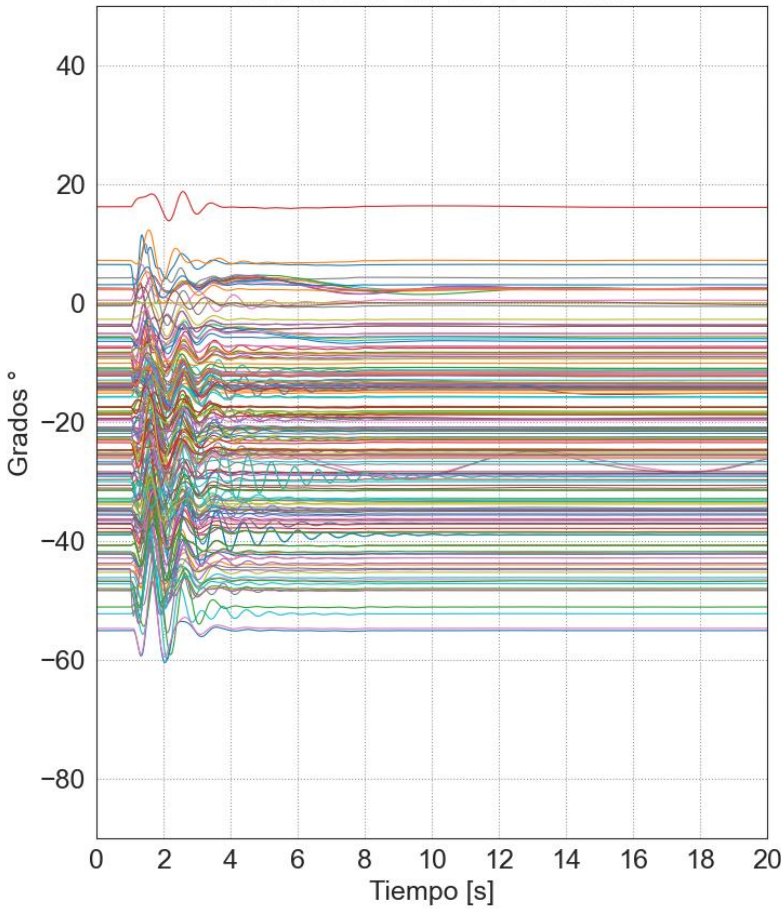
Tensión en barras de 500 kV
cortocircuito en CC rectificador



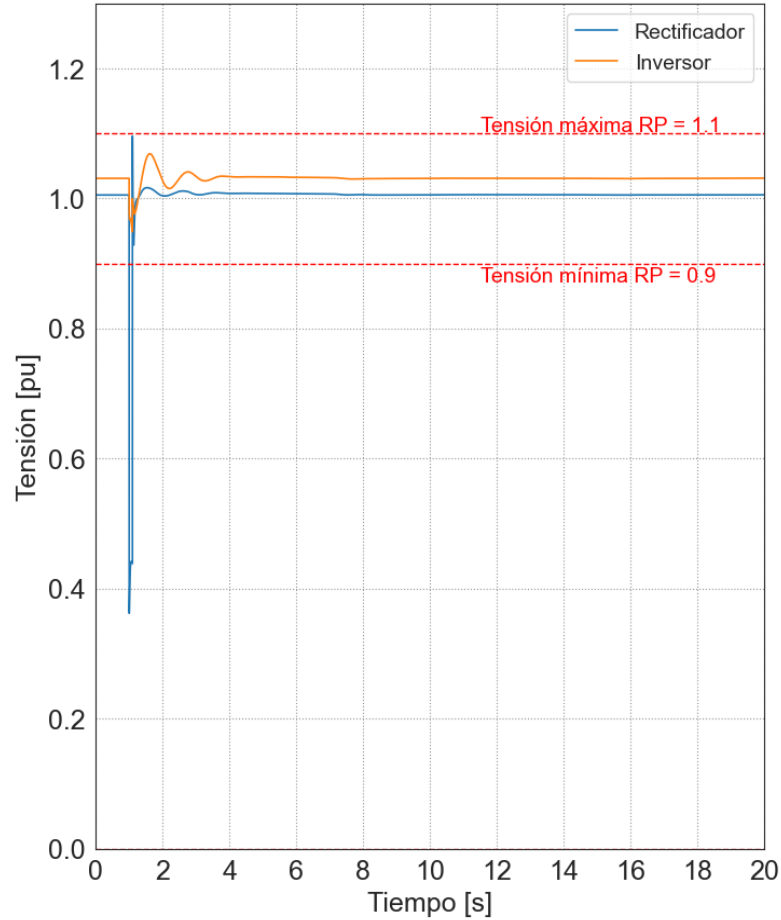
Frecuencia en barras de 500 kV
cortocircuito en CC rectificador



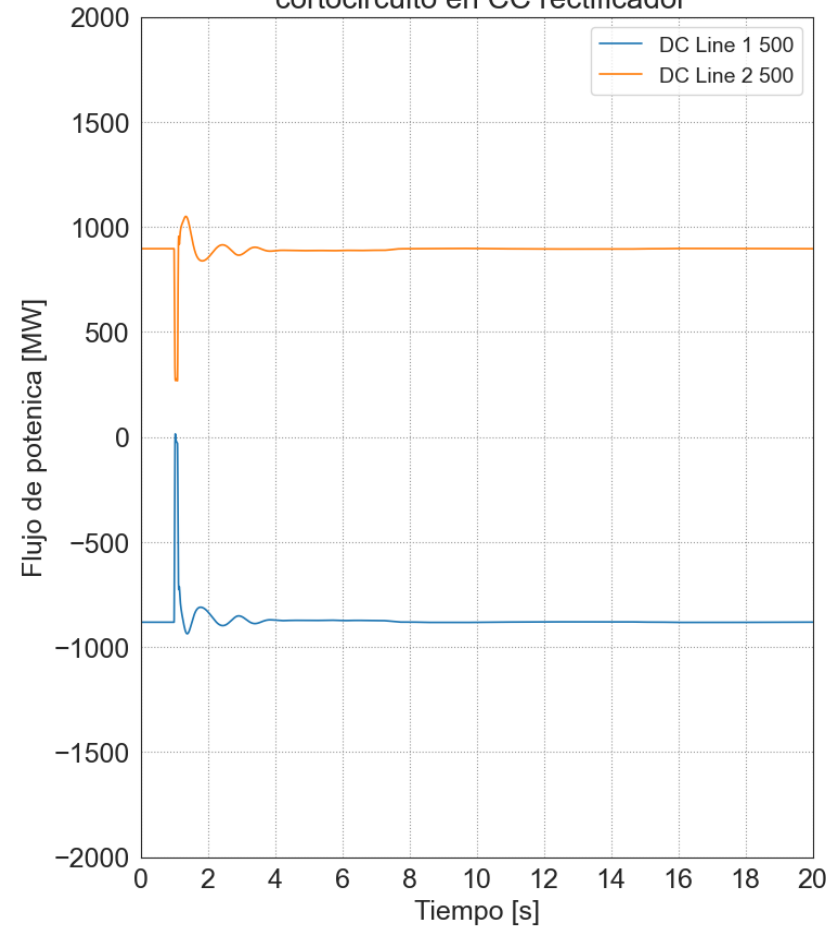
Ángulos de GS
cortocircuito en CC rectificador



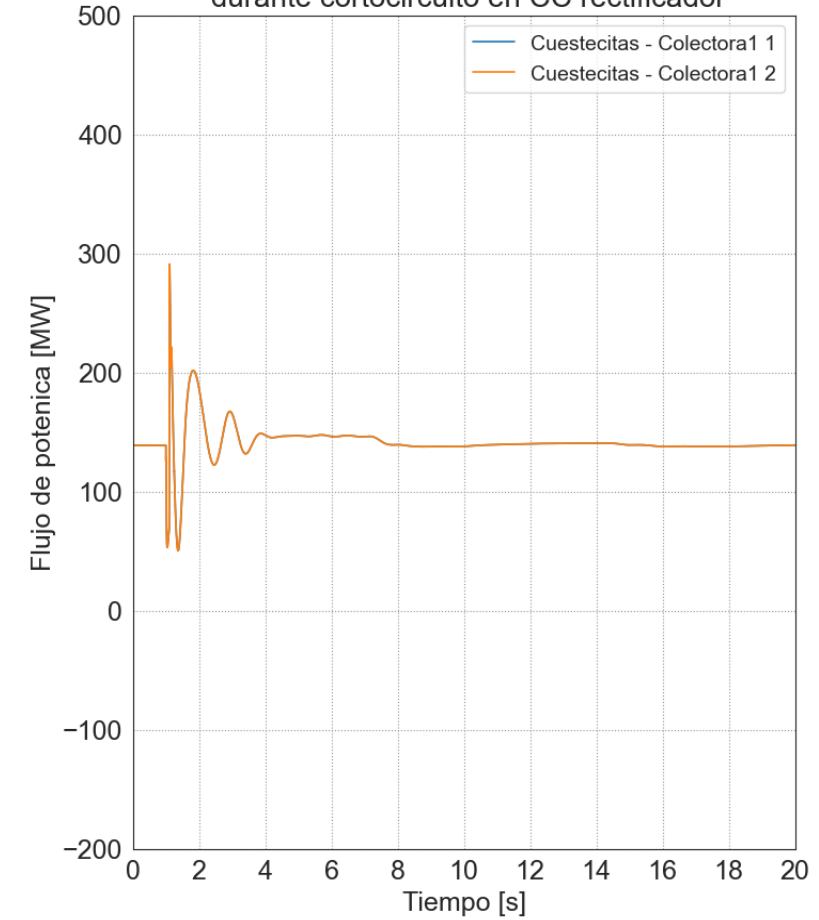
Tensión en barras HVDC
cortocircuito en CC rectificador

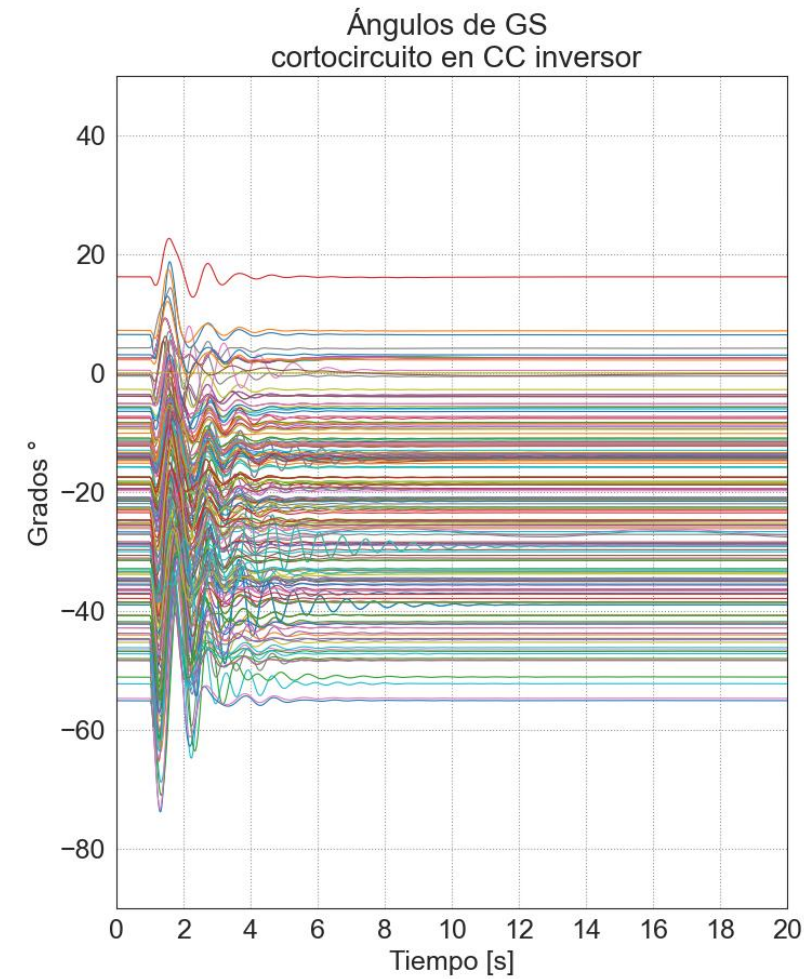
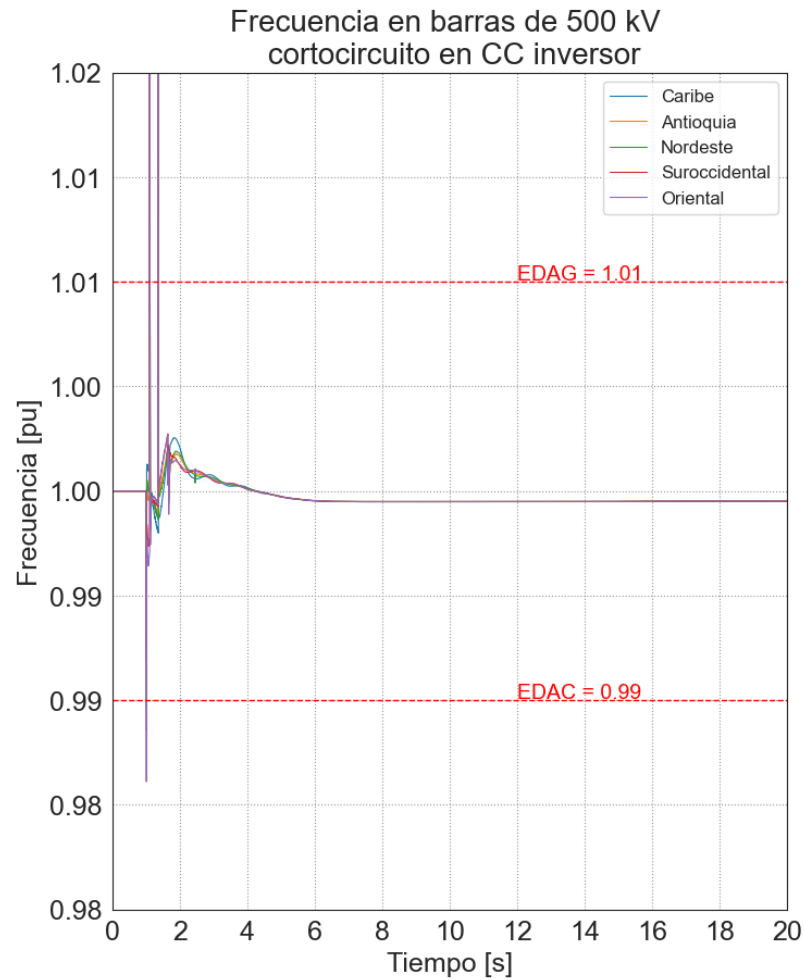
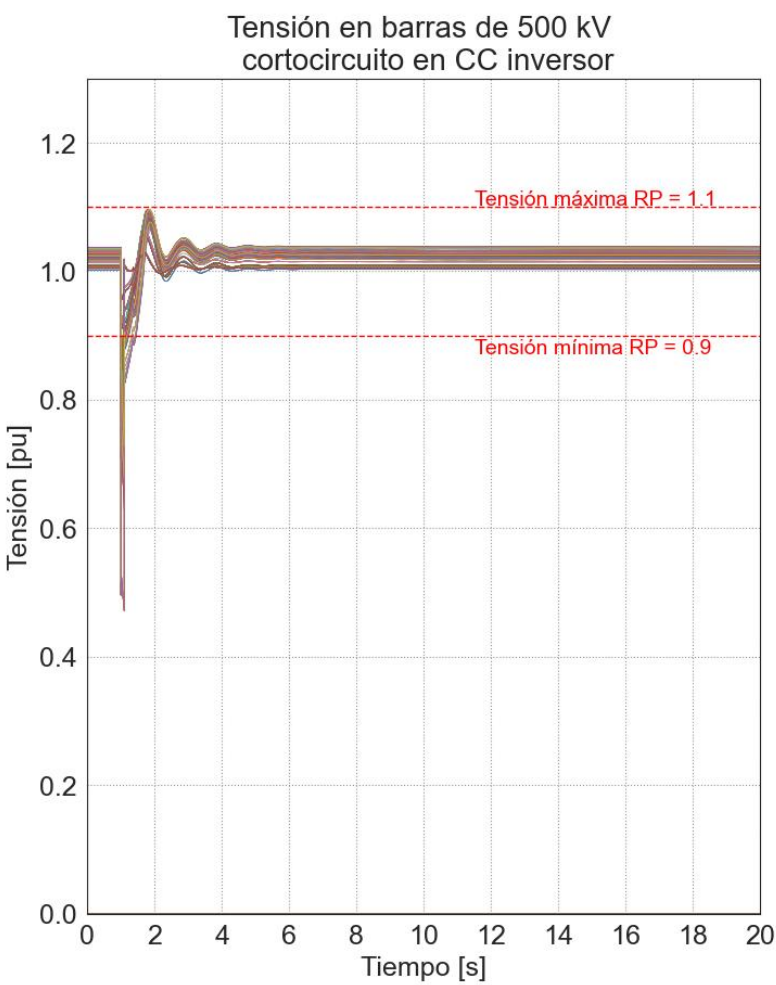


Flujo de potencia en polos HVDC durante
cortocircuito en CC rectificador

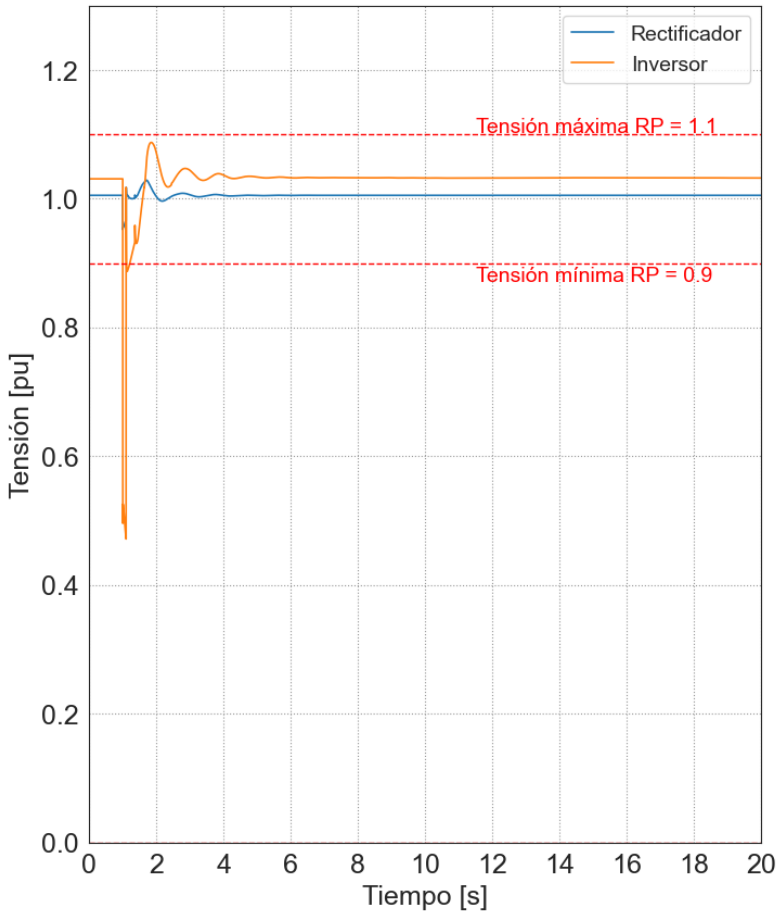


Flujo de potencia en tramo Colec-Cuest 500 kV
durante cortocircuito en CC rectificador

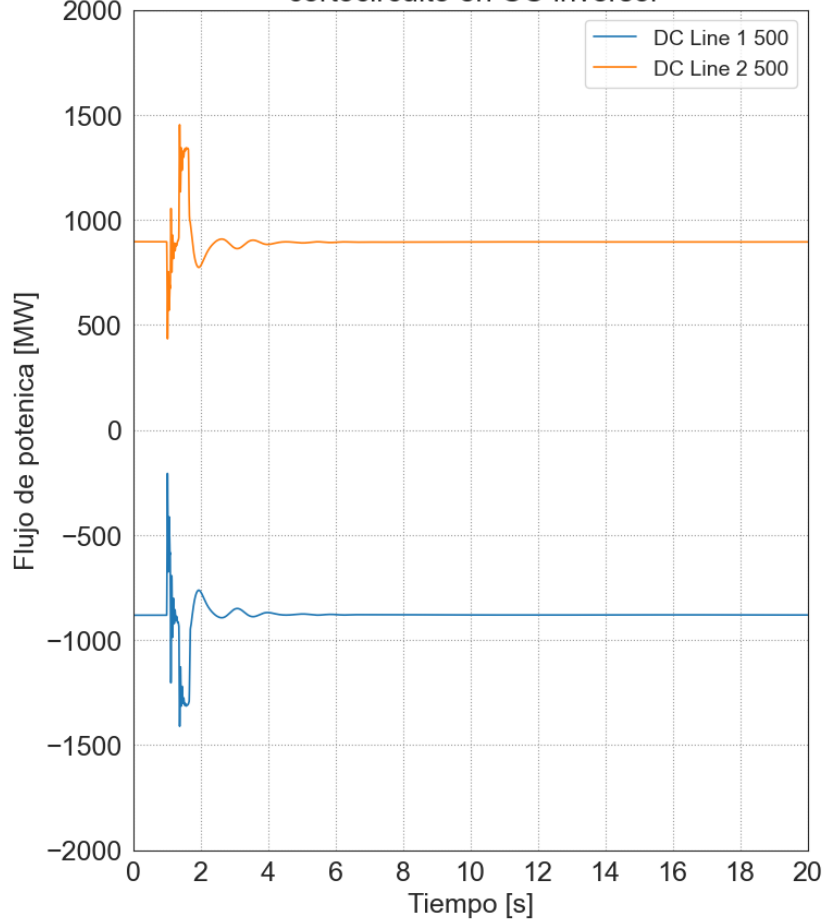




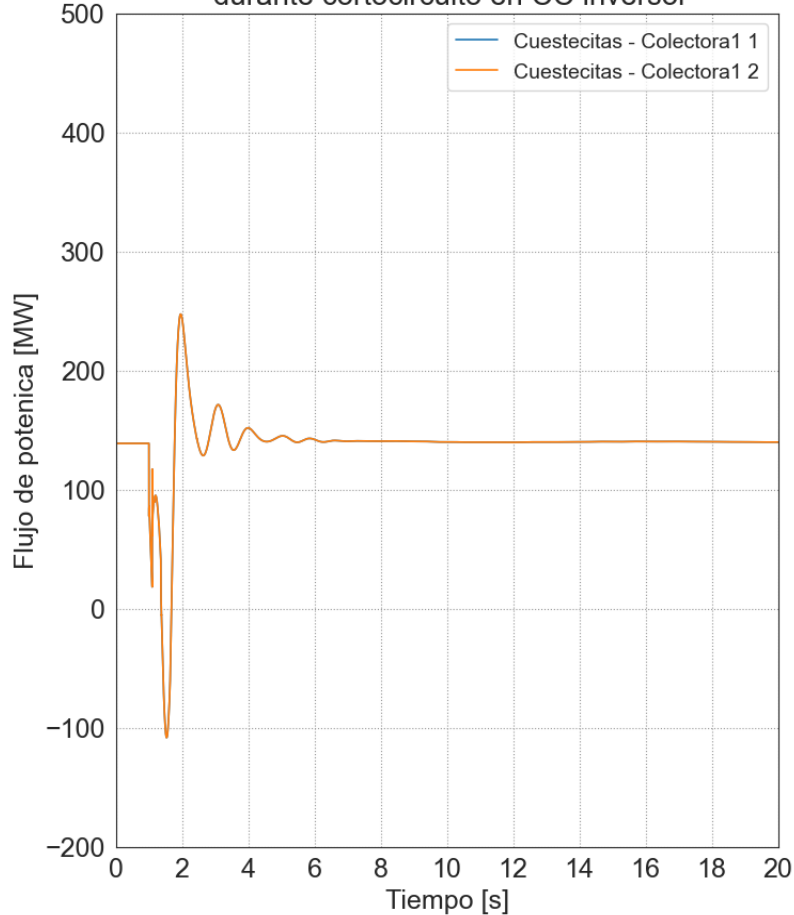
Tensión en barras HVDC
cortocircuito en CC inversor



Flujo de potencia en polos HVDC durante
cortocircuito en CC inversor



Flujo de potencia en tramo Colec-Cuest 500 kV
durante cortocircuito en CC inversor



Muchas gracias

Universidad de los Andes

Dr. Guillermo Jiménez

Dr. Mario Ríos

Ivy

Dr. Ramón Méndez

Ing. Alfonso Blanco

Ing. Ruben Chaer

Ing. Vanina Camacho

Ing. Guillermo Flieller

ISCI - Universidad de Chile

Dr. Rodrigo Moreno

Dra. Claudia Rahmann

Mag. Matías Olivares

Lic. Pamela Acuña

