



NORMA TÉCNICA DE SEGURIDAD Y CALIDAD DEL SERVICIO

ANEXO TÉCNICO DE METODOLOGÍA PARA EL ESTUDIO DE ANÁLISIS DE ROBUSTEZ DEL SISTEMA ELÉCTRICO NACIONAL

Enero de 2026

Santiago, Chile

ÍNDICE

Título 1 Aspectos generales	2
Artículo 1-1 Objetivo del Anexo.....	2
Artículo 1-2 Alcance.....	2
Artículo 1-3 Abreviaturas y definiciones.....	2
Artículo 1-4 Objetivo y resultados del Estudio	2
Artículo 1-5 Alcance del Estudio	3
Artículo 1-6 Conjunto de medidas que contribuyen a robustecer el SI.....	3
Artículo 1-7 Publicación del Estudio	3
Artículo 1-8 Informe preliminar y final del Estudio	4
Artículo 1-9 Actualización del Estudio anual	4
Título 2 Funciones y obligaciones.....	5
Artículo 2-1 Funciones y obligaciones del Coordinador	5
Artículo 2-2 Obligaciones de los Coordinados.....	5
Título 3 Procedimiento para realizar el Estudio	6
Artículo 3-1 Consideraciones y horizonte de evaluación del Estudio.....	6
Artículo 3-2 Metodología para el desarrollo del Estudio.....	6
Artículo 3-3 Base de datos.....	7
Artículo 3-4 Modelo dinámico del SI proyectado	8
Artículo 3-5 Escenarios de operación	8
Artículo 3-6 Indicadores para identificación de áreas	9
Artículo 3-7 Determinación de áreas de frecuencia y tensión	10
Artículo 3-8 Determinación de contingencias	11
Artículo 3-9 Indicadores de desempeño dinámico.....	13
Artículo 3-10 Cálculo del índice de desempeño dinámico	13
Artículo 3-11 Cálculo de frecuencia mínima y RoCoF.....	14
Artículo 3-12 Medidas que pueden robustecer el SI	14
Artículo 3-13 Análisis de Fortaleza o Robustez de Tensión.....	16
Artículo 3-14 Resultados del análisis de Fortaleza	19
Artículo 3-15 Análisis de la Robustez de Frecuencia	20
Título 4 Disposiciones transitorias	22
Artículo 4-1 Publicación del primer Estudio	22
Artículo 4-2 Publicación del primer listado de indicadores SCL y K.....	22

Título 1 Aspectos generales

Artículo 1-1 Objetivo del Anexo

El presente Anexo Técnico tiene por objetivo establecer la metodología que deberá aplicar el Coordinador para la elaboración del Estudio de Análisis de Robustez del Sistema Eléctrico Nacional (en adelante, el “Estudio”), de acuerdo con lo señalado en el Título 6-8 de la Norma Técnica de Calidad y Seguridad de Servicio (en adelante, “NTSyCS”).

Artículo 1-2 Alcance

El Anexo establece los procedimientos, criterios, escenarios, supuestos e indicadores que deberán ser utilizados por el Coordinador para el desarrollo del Estudio, con el propósito de asegurar consistencia metodológica, transparencia y trazabilidad en los resultados.

A efectos de la aplicación del presente Anexo Técnico, los plazos establecidos sólo consideran días hábiles, salvo en los casos que se indique expresamente lo contrario.

Artículo 1-3 Abreviaturas y definiciones

A efectos de la aplicación del presente Anexo Técnico, se aplican las abreviaturas y definiciones establecidas en el Título 1-2 de la NTSyCS.

Artículo 1-4 Objetivo y resultados del Estudio

El Estudio tiene por objeto evaluar la Robustez del SI en el corto y mediano plazo, con el fin de determinar su evolución, identificar tendencias y áreas débiles, así como proponer un conjunto de medidas que permitirían robustecer dichas áreas cuando ello resulte necesario.

La Robustez se evalúa en función del desempeño dinámico del SI durante contingencias, considerando escenarios de operación creíbles, pero exigentes desde el punto de vista de la Robustez. La evaluación del desempeño dinámico del sistema se deberá realizar mediante los indicadores de desempeño establecidos en el Artículo 3-9 del presente Anexo Técnico. El Estudio deberá contener, al menos:

- a) Áreas débiles del SI, tanto desde la perspectiva de la Robustez de Frecuencia como de la Fortaleza, para cada año del horizonte de evaluación;
- b) Resultados de las simulaciones dinámicas realizadas para el análisis de Robustez de Tensión y Frecuencia, incluyendo el valor de los indicadores de desempeño;
- c) Conjunto de medidas, incluyendo instalaciones, servicios o reforzamientos de red, así como aquellas restricciones operacionales orientadas a robustecer el SI y a garantizar el cumplimiento de los estándares de seguridad establecidos en la NTSyCS y de los requerimientos del presente Anexo Técnico, junto con su correspondiente justificación técnica. Dichas medidas deberán clasificarse según tipo de aporte a la robustez que realizan,

el año a partir del cual la medida podría ser necesaria y el Área de Tensión (“AdT”) o Área de Frecuencia (“AdF”) en la que impactan, según corresponda; y,

- d) Niveles mínimos esperados de cortocircuito (*SCL* de acuerdo con sus siglas en inglés “*Short Circuit Level*”) y factores agregados de interacción IBR (*K* definido en el Artículo 4-8 del Anexo Técnico de Exigencias Mínimas de Instalaciones Basadas en Convertidores que se conecten al Sistema Eléctrico Nacional) en las barras del SI con niveles de tensión iguales o superiores a 66 kV, para cada año considerado dentro del horizonte de evaluación.

Artículo 1-5 Alcance del Estudio

El conjunto de medidas que se deriven de este Estudio no tendrá carácter vinculante y no darán a lugar, por sí mismas, a procesos de licitación de nueva infraestructura ni a la imposición de restricciones operacionales a UGBC. El Estudio podrá ser considerado como un insumo técnico para los procesos de planificación y operación del SI, incluyendo el Estudio de Servicios Complementarios, el Estudio de Restricciones del Sistema de Transmisión, entre otros.

La calificación de un área como “área débil de frecuencia” o “área débil de tensión” tendrá vigencia desde la fecha de publicación del Estudio por parte del Coordinador hasta la publicación del siguiente Estudio.

Artículo 1-6 Conjunto de medidas que contribuyen a robustecer el SI

Para el Estudio el Coordinador deberá considerar un conjunto de medidas orientadas a robustecer el SI cuando ello resulte necesario. Dicho conjunto podrá incluir tres tipos de medidas, clasificadas de la siguiente forma:

- a) Servicios Complementarios con recursos existentes: Servicios Complementarios prestados en base a recursos e infraestructura existentes en el SI.
- b) Servicios Complementarios con nuevos recursos: Servicios Complementarios basados en nuevos recursos e infraestructura.
- c) Ajustes en la lógica de control de IBR: comprenden ajustes o cambios en la lógica de control de estas instalaciones, tales como la modificación de parámetros de control (como ganancias), del modo de operación (de IBR GFL a IBR GFM o viceversa), cambio de prioridad de inyección de corriente ante fallas (nivel de aporte de potencia activa o reactiva), entre otros.

Artículo 1-7 Publicación del Estudio

El Coordinador anualmente elaborará y publicará en su sitio web el Estudio, junto con los antecedentes y bases de datos que sustentan sus resultados, de acuerdo con el calendario señalado en el Artículo 1-9 de la NTSyCS. Con todo, su publicación deberá ser realizada con anterioridad a la emisión del Informe de SSCC.

Artículo 1-8 Informe preliminar y final del Estudio

El Coordinador elaborará una versión preliminar del Estudio el cual será publicado en su sitio web, junto con los antecedentes y bases de datos que sustentan sus resultados, para que los interesados realicen sus observaciones, en el formato y plazo que establezca el Coordinador. El plazo de observaciones deberá ser de, al menos, 15 días. Los formatos para realizar las observaciones que establezca el Coordinador deberán, al menos, asegurar la debida individualización del interesado que formula las observaciones.

Terminado el periodo de observaciones, el Coordinador deberá analizar las observaciones, y luego emitir la versión final del Estudio junto con un informe consolidado de respuestas a las observaciones recibidas.

Artículo 1-9 Actualización del Estudio anual

El Coordinador podrá justificadamente actualizar el Estudio indicado en el Artículo 1-7 del presente Anexo Técnico en caso de que se produzcan interconexiones, modificaciones o retiros relevantes de instalaciones que puedan afectar la seguridad y calidad de servicio del SI y que no hayan sido considerados en el Estudio vigente.

En todo caso, las actualizaciones al Estudio deberán someterse a lo señalado en el Artículo 1-8 del presente Anexo Técnico.

Título 2 Funciones y obligaciones

Artículo 2-1 Funciones y obligaciones del Coordinador

Para efectos del cumplimiento de lo dispuesto en el presente Anexo Técnico, el Coordinador deberá:

- a) Solicitar a los Coordinados la información y antecedentes que se requieran para el desarrollo del Estudio por medio de los formatos que establecerá y publicará en su sitio web; y,
- b) Desarrollar el Estudio conforme a la metodología establecida en el presente Anexo Técnico.

Artículo 2-2 Obligaciones de los Coordinados

Para efectos del cumplimiento de lo dispuesto en el presente Anexo Técnico, los Coordinados deberán:

- a) Proporcionar al Coordinador toda la información técnica y antecedentes que este requiera para la realización del Estudio;
- b) Informar oportunamente sobre cualquier actualización relativa a ajustes, indisponibilidades o limitaciones operacionales de sus instalaciones; y,
- c) Ajustar los parámetros técnicos de sus instalaciones conforme a los requerimientos instruidos por el Coordinador.

Título 3 Procedimiento para realizar el Estudio

Artículo 3-1 Consideraciones y horizonte de evaluación del Estudio

El Estudio deberá contemplar un horizonte de evaluación de, al menos, cinco años, considerando el análisis detallado de la Robustez del sistema proyectado para los años T_1 , T_3 y T_5 . Si T_0 es el año en que se realiza el Estudio, entonces se tiene que $T_1 = 1 + T_0$.

La proyección del SI deberá considerar, al menos, lo siguiente:

- a) Las instalaciones declaradas en construcción, así como aquellas derivadas del plan de expansión o que hayan sido autorizadas en conformidad con el artículo 91°bis o el artículo 102° de la Ley, y que se espera que su fecha de Entrada en Operación se encuentre dentro del horizonte de evaluación considerado en el Estudio;
- b) La nueva infraestructura para la prestación de Servicios Complementarios a que hace referencia el artículo 72°-7 de la Ley, y que se espera que su fecha de Entrada en Operación se encuentre dentro del horizonte de evaluación considerado en el Estudio;
- c) El retiro, modificación relevante, desconexión o cese de operaciones de instalaciones que le hayan sido comunicadas de conformidad con el Artículo 72°-18 de la Ley; y,
- d) Los mantenimientos preventivos mayores aprobados por el Coordinador, en conformidad con el Anexo Técnico “Programa de Mantenimiento Preventivo Mayor” de la NTSyCS.

En caso de que la información técnica disponible de las instalaciones sea insuficiente para su adecuada modelación dinámica, el Coordinador podrá solicitar a los Coordinados los antecedentes técnicos que requiera para dichos fines.

Artículo 3-2 Metodología para el desarrollo del Estudio

La Figura 1 muestra la metodología general para el desarrollo del Estudio, la cual se compone de cuatro etapas principales. Las primeras tres etapas tienen por objetivo establecer las condiciones base y escenarios a considerar en el análisis. La cuarta etapa corresponde al análisis técnico de la Robustez, el cual primero contempla la evaluación de Fortaleza y posteriormente, la evaluación de la Robustez de Frecuencia.

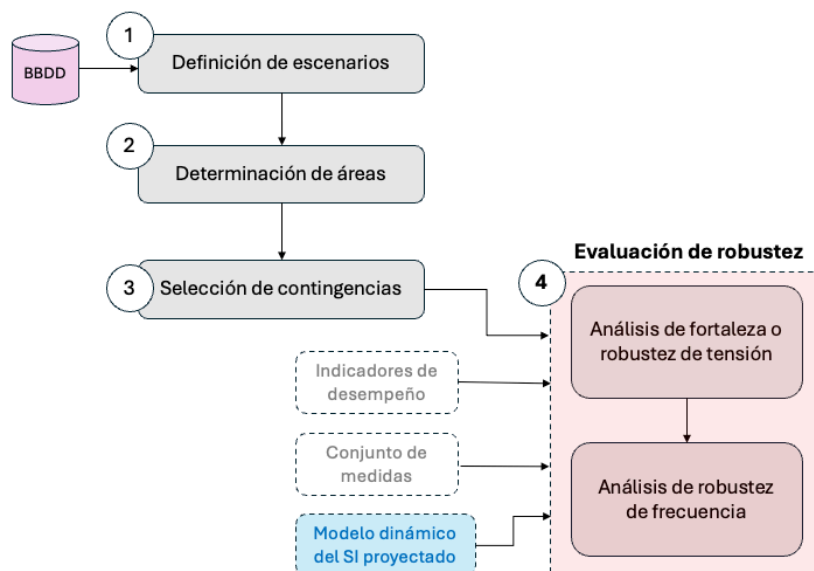


Figura 1: diagrama metodológico para el desarrollo del Estudio

La primera etapa de la metodología consiste en definir, para los años T_1 , T_3 y T_5 , los escenarios de operación a considerar en el análisis. Para ello, el Coordinador deberá seleccionar justificadamente un conjunto acotado de configuraciones de despacho que sean creíbles, pero exigentes desde el punto de vista de la Robustez de Frecuencia y de Tensión.

Luego, para cada año del horizonte de evaluación, se determinan las áreas del SI que comparten características eléctricas y recursos de control similares en términos de Robustez de Frecuencia y de Tensión, definiéndose AdF y AdT, respectivamente. Esta clasificación tiene por finalidad estructurar y focalizar el análisis, facilitar la interpretación de los resultados y orientar la identificación y localización de eventuales medidas correctivas. Posteriormente, se define el conjunto de contingencias a simular en el Estudio.

Una vez completadas estas tres etapas, se procede con el análisis de la Robustez de Frecuencia y de Tensión mediante simulaciones dinámicas en el dominio del tiempo a frecuencia fundamental (simulaciones RMS, “*Root Mean Square*” por sus siglas en inglés).

En los casos en que sea necesario representar fenómenos rápidos y exista un modelo electromagnético representativo del SEN, el Coordinador podrá efectuar simulaciones electromagnéticas (EMT “*Electromagnetic Transient*”, por sus siglas en inglés) como complemento del análisis RMS, o bien, cuando la naturaleza del fenómeno así lo requiera, realizar el análisis de Robustez exclusivamente en base a simulaciones EMT.

Artículo 3-3 Base de datos

La base de datos para la evaluación de la Robustez deberá contener toda la información necesaria para representar los diferentes escenarios de operación a considerar en el Estudio para los años T_1 , T_3 y T_5 . La proyección del SI incluida en la base de datos se deberá elaborar conforme a lo indicado en el Artículo 3-1 del presente Anexo Técnico.

Artículo 3-4 Modelo dinámico del SI proyectado

El modelo dinámico del SI proyectado para los años T_1 , T_3 y T_5 deberá ser elaborado considerando la información contenida en la base de datos señalada en el Artículo 3-3 del presente Anexo Técnico. El modelo deberá representar la topología proyectada del SI, incorporando instalaciones y nueva infraestructura que se prevea estén operativas dentro del período de análisis.

El modelo dinámico proyectado deberá incluir las unidades generadoras y Sistemas de Almacenamiento de Energía con sus respectivos sistemas de control, así como todo componente relevante para la adecuada representación del comportamiento dinámico del SI. Para la nueva infraestructura proyectada deberán emplearse modelos consistentes con la información técnica disponible de cada instalación. En caso de no existir antecedentes suficientes, se podrán utilizar modelos genéricos desarrollados por organismos internacionales reconocidos en el sector¹.

Artículo 3-5 Escenarios de operación

Para la identificación de los escenarios de operación a considerar en el Estudio, el Coordinador deberá identificar, para los años T_1 , T_3 y T_5 un conjunto acotado de configuraciones de despacho que sean creíbles, pero exigentes desde el punto de vista de la Robustez de Frecuencia y de Tensión. Los escenarios no deberán incluir restricciones operacionales tales como inercia mínima por área o despacho forzado de unidades sincrónicas. Cada año considerado en el Estudio deberá incluir, al menos, los siguientes escenarios:

- a) Alta demanda neta.
- b) Baja demanda neta.
- c) Alto nivel de transferencias entre norte y centro-sur del SI.
- d) Bajo nivel de transferencias entre norte y centro-sur del SI.

Para cada uno de los escenarios de operación considerados en un año T' , el Coordinador deberá calcular el nivel mínimo esperado de potencia de cortocircuito (SCL) en, al menos, las barras del SI con niveles de tensión iguales o superiores a 66 kV. Para fines de estos cálculos no se deberá considerar el aporte de IBR GFL a los niveles de cortocircuito.

El nivel mínimo esperado de potencia de cortocircuito en una barra j del SI ($SCL_j^{T'}$) se define como:

$$SCL_j^{T'} = \min_k \left\{ scl_j^{E_k T'} \right\}_{k=1}^M$$

¹ Western Electricity Coordinating Council (WECC) [wecc.org], International Electrotechnical Commission (IEC) [iec.ch], IEEE Xplore [ieeexplore.ieee.org], entre otros organismos.

Donde $scl_j^{E_k T'}$ corresponde a la potencia de cortocircuito trifásica disponible en la barra j , expresada en MVA², para el escenario E_k del año T' y M corresponde a la cantidad de escenarios considerados para dicho año.

Artículo 3-6 Indicadores para identificación de áreas

El Estudio contempla la determinación de las AdT y AdF, definidas como subsistemas del SI que comparten características eléctricas y recursos de control similares desde la perspectiva de la Robustez de Tensión y de Frecuencia, respectivamente. Para la identificación de las AdT y AdF, el Coordinador deberá utilizar los siguientes indicadores:

- Sensibilidad de la tensión respecto a variaciones en los flujos de potencia reactiva por barra ($\Delta U/\Delta Q$): indicador que cuantifica la variación del módulo de la tensión en una barra ante un cambio en la potencia reactiva inyectada o absorbida en la misma barra. Este indicador deberá utilizarse para la definición de AdT.
- Inercia sincrónica equivalente por barra: indicador que representa la inercia equivalente “vista” desde cada barra del SI, proporcionando información respecto de la distribución espacial de la inercia sincrónica en la red. Este indicador deberá utilizarse para la definición de Adf. La inercia sincrónica equivalente en la barra i se calcula mediante la siguiente expresión:

$$H_i = \sum_{g \in GS}^N D_{ig} H_g$$

Donde, D_{ig} corresponde a un índice de proximidad en por unidad entre la barra i y la barra de inyección del generador g , H_g corresponde a la inercia sincrónica en segundos del generador g y N la cantidad de generadores sincrónicos interconectados al SI. El índice de proximidad eléctrica D_{ig} se calcula según la siguiente fórmula:

$$D_{ig} = \left| \frac{Z_{ig}}{Z_{gg}} \right|$$

Donde Z_{gg} es la impedancia en paralelo de la barra g y Z_{ig} es la impedancia equivalente entre las barras i y g , la que se obtiene al invertir la matriz de admitancia del sistema.

² A efectos del cálculo de cortocircuitos, se deberá utilizar el método completo, el cual se basa en una técnica de superposición. El método completo utiliza un flujo de potencia para representar la condición pre-falla del sistema (para tensiones y ángulos), con el fin de determinar las corrientes operativas de un sistema que no esté en condiciones de vacío.

Artículo 3-7 Determinación de áreas de frecuencia y tensión

Para cada año analizado, el Coordinador deberá identificar las AdF y AdT del SI mediante la aplicación de un método de agrupamiento sobre las barras del SI, considerando los indicadores definidos en el Artículo 3-6 del presente Anexo Técnico:

- a) Sensibilidad de la tensión respecto de las variaciones en el flujo de potencia reactiva por barra para la identificación de las AdT.
- b) Inercia sincrónica equivalente por barra para la identificación de las AdF.

El objetivo del método de agrupamiento es minimizar, sobre todos los escenarios de un año T , el error cuadrático medio entre el valor del indicador en cada barra y el valor representativo de su área (centroide) en el escenario correspondiente. Sea K el número de áreas (por definir), $B = \{1, \dots, M\}$ el conjunto de todas las barras del sistema, $E = \{E_1, \dots, E_N\}$ el conjunto de escenarios del año T , x_{ij} el valor del indicador para identificación de área de la barra i en el escenario E_j . Entonces, el problema de agrupamiento se plantea como:

$$\min \frac{1}{MN} \sum_{k=1}^K \sum_{i \in B} \sum_{E_j \in E} z_{ik} (x_{ij} - \mu_{ij})^2$$

Sujeto a:

$$\sum_{k=1}^K z_{ik} = 1, \quad \forall i \in B$$

$$\sum_{i \in B} z_{ik} \geq 1, \quad \forall i \in B, \forall k = 1, \dots, K$$

$$z_{ik} \in \{0,1\}, \quad \forall i \in B, \forall k = 1, \dots, K$$

Donde $z_{ik} \in \{0,1\}$ corresponde a la variable de asignación de la barra i al área k , es decir, $z_{ik} = 1$ si la barra i pertenece al área k , 0 si no, y μ_{ij} corresponde al centroide del grupo k en el escenario E_j , es decir:

$$\mu_{kj} = \frac{\sum_{i \in B} z_{ik} x_{ij}}{\sum_{i \in B} z_{ik}}$$

Adicionalmente, el método de agrupamiento deberá incorporar una restricción de conectividad topológica, con tal de que cada área solo incluya barras conectadas sin atravesar otras áreas. Sea $G = (B, \mathcal{L})$ el grado de la red, donde $\mathcal{L} \subseteq B \times B$ es el conjunto de pares de barras unidas directamente por una línea o un transformador y S_k el conjunto de barras asignadas al área k , es decir, $S_k = \{i \in B: z_{ik} = 1\}$. La restricción de conectividad topológica establece que el subgrafo inducido por S_k sea conexo, es decir, para cualquier par de barras $b_i, b_j \in S_k$ existe un camino contenido completamente en S_k que las conecta:

$$\forall b_i, b_j \in S_k, b_i \neq b_j, \exists b_0, b_1, \dots, b_m \in S_k: b_0 = b_i, b_m = b_j, (b_{l-1}, b_l) \in \mathcal{L}, \forall l = 1, \dots, m$$

La cantidad de áreas deberá determinarse en función del error asociado al proceso de agrupamiento. Cabe señalar que la cantidad de AdF y AdT pueden diferir entre sí, producto de que representan fenómenos de distinta naturaleza.

La Figura 2 ilustra, a modo referencial, un posible resultado para las AdF y AdT en el caso de que el Estudio considere dos escenarios para los años T_1 y T_3 ; y tres escenarios para el año T_5 . En la figura, los conjuntos $\{E_1T_1; E_2T_1\}$, $\{E_1T_3; E_2T_3\}$ y $\{E_1T_5; E_2T_5; E_3T_5\}$ corresponden a los escenarios definidos para los años T_1 , T_3 y T_5 , respectivamente. De la Figura 2 se observa que, si bien cada año T considera distintos escenarios, las AdF y AdT son las mismas dentro de un mismo año.

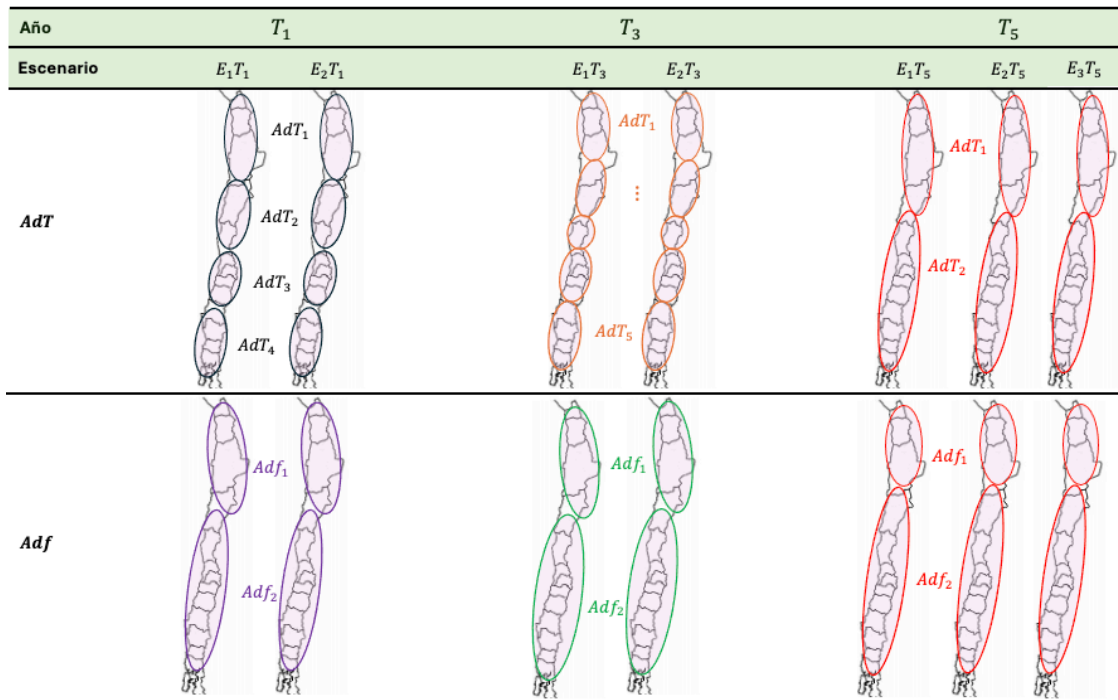


Figura 2: representación esquemática de Adf y AdT para cada año en estudio (ejemplo ilustrativo)

Artículo 3-8 Determinación de contingencias

Para cada una de las AdF y AdT de cada año de evaluación, el Coordinador deberá definir un conjunto de Contingencias Simples a ser consideradas en el análisis de Robustez. Dicho conjunto deberá incluir, al menos:

- Una Contingencia Simple de Severidad 4a para cada AdT. A efectos del presente Anexo Técnico, se entenderá como Severidad 4a un cortocircuito trifásico a tierra con impedancia de falla de hasta 1 Ohm, ocurrido en un circuito de líneas de doble circuito o en una línea de simple circuito con Enmallamiento, seguido de la desconexión del circuito fallado en tiempo normal por acción de su sistema de protección. Para el cálculo de cortocircuito no se deberá considerar el aporte de corriente de IBR GFL, y la impedancia de falla deberá ser tal que, la

corriente cortocircuito sea elevada, aunque ligeramente inferior a la correspondiente a una falla con impedancia cero.

b) Una Contingencia Simple de Severidad 5 para cada AdF.

Adicionalmente, el Coordinador podrá considerar en el análisis otras Contingencias Simples que resulten relevantes para la evaluación de la Robustez en ciertas áreas del SI. En los casos en que una contingencia genere efectos tanto en la Robustez de Tensión como en la de Frecuencia, dicha contingencia deberá considerarse en la evaluación de ambas dimensiones de la Robustez.

La Figura 3 ilustra, de manera referencial, las contingencias asociadas a cada AdF y AdT para el mismo caso presentado en la Figura 2. En la Figura 3, el símbolo “*” corresponde a una Contingencia Simple de Severidad 4a, mientras que el símbolo “*” a una Contingencia Simple de Severidad 5. De la Figura 3 se observa que cada una de las AdF y AdT tiene asociada, en los distintos escenarios analizados, al menos una contingencia simple de Severidad 4a en el caso de las AdT y de Severidad 5 en el caso de las AdF, salvo algunos casos en que se identifican dos contingencias por área. En particular, estas excepciones se presentan en:

- c) En el área de tensión AdT_1 del escenario E_2T_3 ; AdT_2 del escenario E_2T_5 , y AdT_1 del escenario E_3T_5 las cuales incluyen dos contingencias de Severidad 4a; y,
- d) Las áreas de frecuencia Adf_2 del escenario E_2T_1 y Adf_2 del escenario E_2T_5 que incluyen dos contingencias de Severidad 5.

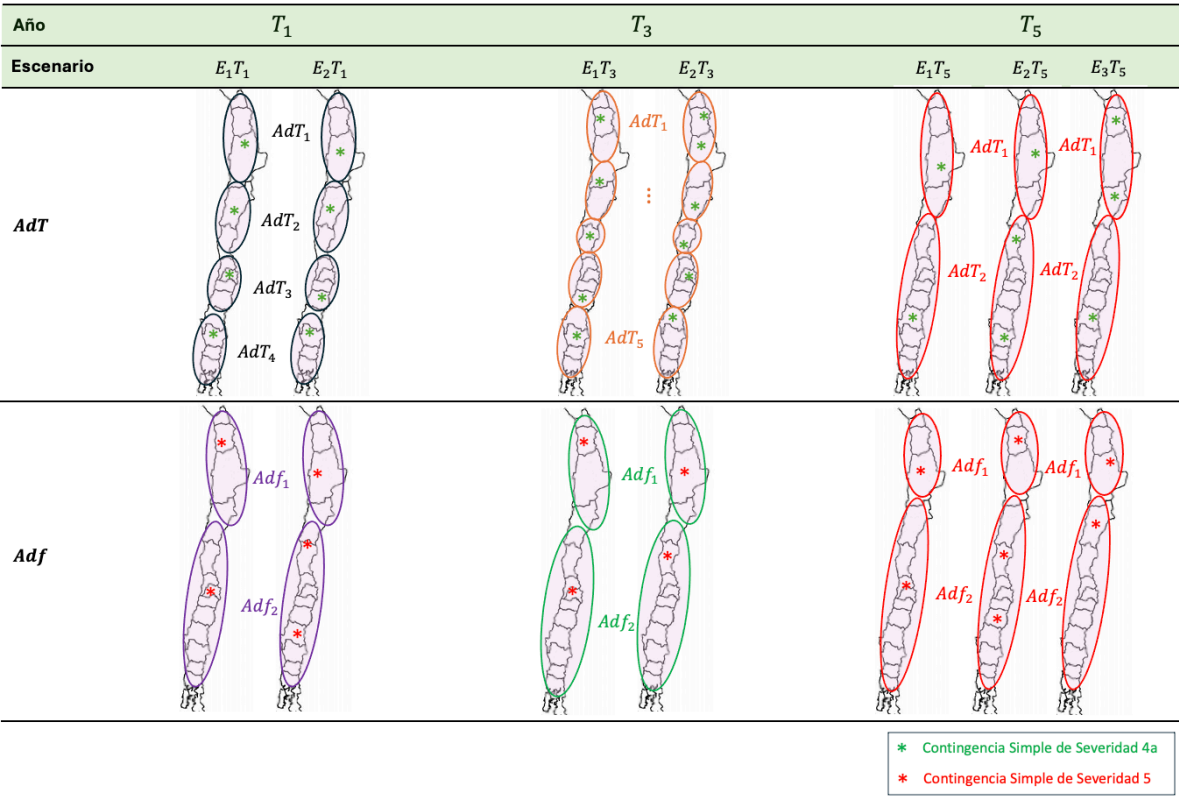


Figura 3: representación de las contingencias asociadas a las AdF y AdT (ejemplo ilustrativo)

Artículo 3-9 Indicadores de desempeño dinámico

Según lo indicado en el Artículo 1-4 del presente Anexo Técnico, la robustez se evalúa en función del desempeño dinámico del SI durante contingencias, utilizando para ello indicadores de desempeño que permitan evaluar la respuesta dinámica del SI proyectado. Los indicadores de desempeño a considerar deberán incluir, al menos, los siguientes:

- a) Índice de desempeño dinámico (IDD) para fallas de Severidad 4a, calculado conforme a lo establecido en el Artículo 3-10 del presente Anexo Técnico.
- b) Frecuencia mínima y RoCoF para contingencias de Severidad 5, calculados conforme a lo establecido en el Artículo 3-11 del presente Anexo Técnico.

Sin perjuicio de lo anterior, el Coordinador podrá incorporar indicadores adicionales cuando estos resulten pertinentes para la evaluación del desempeño dinámico del SI.

Los indicadores de desempeño dinámico deberán ser aplicados en cada una de las fases de análisis descritas en los Artículo 3-13 y Artículo 3-15 del presente Anexo Técnico, según corresponda.

Artículo 3-10 Cálculo del índice de desempeño dinámico

El índice de desempeño dinámico en una barra j (IDD_j), para un cortocircuito de Severidad 4a, se define como el área comprendida entre el valor eficaz de la tensión en dicha barra antes de la falla y su evolución temporal durante el Régimen Transitorio. El IDD_j se calcula mediante la siguiente expresión:

$$IDD_j = \int_{t_f}^{t_{ff}} |v_j(t) - v_{j,0}| dt$$

Donde se tiene que:

IDD_j : índice de desempeño dinámico en la barra j , en por unidad por segundo.

$v_j(t)$: valor eficaz de la tensión en la barra j , en por unidad.

$v_{j,0}$: valor eficaz de la tensión en la barra j antes de la falla, en por unidad.

t_f : instante en el cual ocurre la falla, expresado en segundos.

t_{ff} : instante hasta el cual se desea evaluar el indicador, expresado en segundos.

La Figura 4 ilustra gráficamente el IDD , destacando el área definida entre el valor eficaz de la tensión antes de la falla y su evolución temporal durante el Régimen Transitorio.

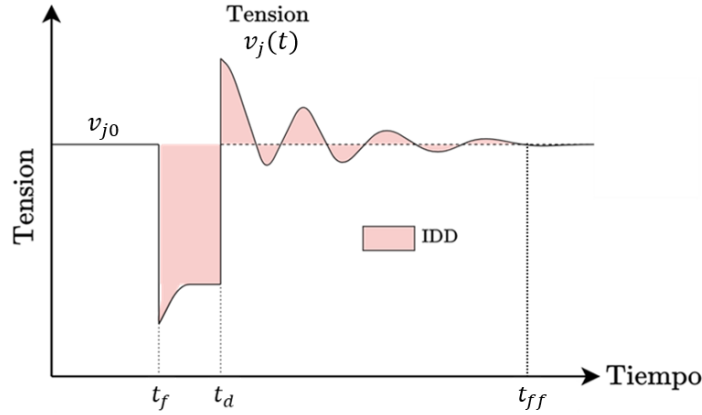


Figura 4: representación del IDD

Artículo 3-11 Cálculo de frecuencia mínima y RoCoF

La Tasa de Cambio de la Frecuencia (RoCoF) en una barra j del SI, evaluada en una ventana de tiempo Δ definida a partir del instante de ocurrencia de una Contingencia Simple de Severidad 5, se calcula conforme a la siguiente expresión:

$$RoCoF_j = \frac{f_j(t_f + \Delta) - f_j(t_f)}{\Delta}$$

Donde,

$RoCoF_j$: corresponde a la Tasa de Cambio de Frecuencia en la barra j , medida en [Hz/s].

t_f : corresponde al instante de tiempo en el cual ocurre la perturbación, en segundos.

Δ : ventana de tiempo en la cual se debe calcular el RoCoF, en segundos. A efectos del presente Estudio se considera una ventana de 500 milisegundos.

$f_j(t)$: corresponde al valor de la frecuencia en la barra j en el instante t , en [Hz].

La frecuencia mínima en una barra j del SI, luego de ocurrida una contingencia de Severidad 5, corresponde al menor valor que alcanza la frecuencia en dicha barra desde el instante en que se inicia la perturbación hasta la recuperación del régimen permanente.

Artículo 3-12 Medidas que pueden robustecer el SI

Para el desarrollo del análisis establecido en el Artículo 3-13 y Artículo 3-15 del presente Anexo Técnico, el Coordinador deberá identificar, para cada año dentro del horizonte de evaluación del Estudio, un conjunto de posibles medidas que puedan contribuir a la Robustez de Frecuencia y de Tensión del SI. Dicho conjunto deberá incluir, al menos, las siguientes categorías:

- (M-1) Todos aquellos recursos técnicos e infraestructura disponibles en el SI que, en el marco de los Servicios Complementarios o funcionalidades habilitadas en las distintas

instalaciones, estén en condiciones de prestar servicios que mejoren la Robustez de frecuencia y/o Fortaleza del SI.

(M-2) Alternativas de nuevas instalaciones, adecuaciones de infraestructura/instalaciones existentes o incorporación de nuevas instalaciones con el potencial de robustecer áreas débiles y cuya entrada en operación sea factible dentro del horizonte de evaluación del Estudio.

(M-3) Ajustes en la lógica de control de IBR que contribuyan a la Robustez del SI.

En cuanto a las medidas del tipo (M-3), estas comprenden, entre otras, ajustes en los sistemas de control de las IBR, incluyendo la reconfiguración de su modo de operación (pasando de modo GFL a GFM o viceversa), cuando corresponda, y el cambio de prioridades de inyección de corriente activa/reactiva en IBR GFL durante fallas, siempre que tales ajustes sean técnicamente factibles y mejoren el desempeño dinámico del SI.

Para la selección de potenciales medidas indicadas en el grupo (M-2), el Coordinador deberá adoptar un enfoque de neutralidad tecnológica, considerando diferentes opciones y tecnologías disponibles en el mercado que, al momento de la ejecución del Estudio, puedan contribuir a la Robustez del SI.

La Tabla 1 presenta ejemplos de carácter referencial de recursos que pueden aportar al fortalecimiento de un sistema eléctrico, indicando el tipo de Robustez al cual contribuyen. No obstante, es importante señalar que existen otras alternativas tecnológicas capaces de aportar a la Robustez, muchas de las cuales corresponden a combinaciones de distintas tecnologías.

Tabla 1: ejemplos de recursos para robustecer un sistema eléctrico

Tipo de recurso	¿Contribuye a la robustez de frecuencia?	¿Contribuye a robustez de tensión?	Particularidades técnicas
UGS	Sí <ul style="list-style-type: none"> Inercia rotacional 	Sí <ul style="list-style-type: none"> Control de tensión y capacidad de potencia reactiva 	<ul style="list-style-type: none"> Soporte post-falla
IBR GFM	Sí <ul style="list-style-type: none"> Inercia sintética o virtual 	Sí <ul style="list-style-type: none"> Control de tensión y capacidad de potencia reactiva, similar a una máquina sincrónica 	<ul style="list-style-type: none"> Soporte post-falla
IBR GFL	Parcial <ul style="list-style-type: none"> Aporte limitado en función del sistema de control 	Parcial <ul style="list-style-type: none"> Aporte al control de tensión y capacidad de potencia reactiva en función del sistema de control 	<ul style="list-style-type: none"> Posible aporte post-falla en función del sistema de control Sensibles a bajo SCR
Condensadores síncronos	Sí <ul style="list-style-type: none"> Inercia rotacional 	Sí <ul style="list-style-type: none"> Control de tensión y capacidad de potencia reactiva 	<ul style="list-style-type: none"> Soporte post-falla
SVC	No	Parcial <ul style="list-style-type: none"> Regulación de tensión y capacidad de potencia reactiva 	<ul style="list-style-type: none"> Posible aporte post-falla en función del sistema de control
STATCOM	No	Sí <ul style="list-style-type: none"> Regulación de tensión y capacidad de potencia reactiva 	<ul style="list-style-type: none"> Posible aporte post-falla en función del sistema de control

Artículo 3-13 **Análisis de Fortaleza o Robustez de Tensión**

El análisis de Fortaleza del Estudio tiene por objetivo evaluar la Fortaleza del SI en el corto y mediano plazo, con el fin de determinar su evolución, identificar tendencias y potenciales áreas débiles, así como proponer un conjunto de potenciales medidas que permitirían robustecer dichas áreas cuando ello resulte necesario.

El análisis se desarrolla, para cada año del horizonte de evaluación, mediante simulaciones dinámicas en el dominio del tiempo, utilizando el modelo dinámico del SI proyectado elaborado conforme a lo dispuesto en el Artículo 3-4 del presente Anexo Técnico.

El análisis de Fortaleza se estructura en los pasos que se indican a continuación:

(Paso 1) Para cada año en evaluación, el Coordinador deberá simular las contingencias asociadas a cada una de las AdT, para todos los escenarios de operación definidos conforme al Artículo 3-5 del presente Anexo Técnico.

En esta etapa, las simulaciones deberán efectuarse sin incorporar medidas orientadas a fortalecer el SI ni aplicar restricciones de seguridad, con el objeto de caracterizar el desempeño dinámico intrínseco del sistema y evaluar, de manera objetiva, su nivel de Robustez frente a las contingencias consideradas.

(Paso 2) Para cada contingencia simulada en el (Paso 1), se debe calcular el IDD conforme a lo establecido en el Artículo 3-10 del presente Anexo Técnico; considerando que el despeje de la falla ocurre 120 milisegundos después de iniciada la falla ($t_d - t_f = 120$ milisegundos) y que la evaluación del indicador se realiza hasta el instante $t_{ff} = 1,12$ segundos. En caso de que el Estudio considere indicadores adicionales de desempeño dinámico, estos también deberán ser calculados.

Considerando nuevamente el mismo caso ilustrativo presentado en la Figura 2, la Figura 5 y Tabla 2 resumen las simulaciones requeridas en el (Paso 1). En este ejemplo, el análisis de Fortaleza involucra la simulación de un total de 27 contingencias simples de Severidad 4a, asociándose, en general, una contingencia a cada AdT. Las excepciones se presentan en las siguientes áreas de tensión: AdT_1 del escenario E_2T_3 , AdT_2 del escenario E_2T_5 , y AdT_1 del escenario E_3T_5 , para las cuales se consideran dos contingencias de Severidad 4a.

Año	T_1		T_3		T_5		
Escenario	E_1T_1	E_2T_1	E_1T_3	E_2T_3	E_1T_5	E_2T_5	E_3T_5
AdT							

Contingencia Simple de Severidad 4a

Figura 5: representación de las contingencias asociadas a las AdT (ejemplo ilustrativo)

Tabla 2: contingencias a simular en cada AdT (ejemplo ilustrativo)

Año	T_1		T_3		T_5		
Escenario	E_1T_1	E_2T_1	E_1T_3	E_2T_3	E_1T_5	E_2T_5	E_3T_5
AdT_1	*	*	*	**	*	*	**
AdT_2	*	*	*	*	*	**	*
AdT_3	*	*	*	*			
AdT_4	*	*	*	*			
AdT_5			*	*			
Total de contingencias de Severidad 4a * por escenario	4	4	5	6	2	3	3

(Paso 3) Para cada una de las contingencias simuladas según el (Paso 1), se deberán cumplir todos los estándares aplicables establecidos en la NTSyCS. Sin perjuicio de lo anterior, se deberá verificar, al menos, que:

- Se cumpla lo dispuesto en el Artículo 5-31 de la NTSyCS respecto a la estabilidad del SI frente a la ocurrencia de una contingencia simple de hasta severidad 7, sin admitir la utilización de Recursos Generales o Adicionales de Control de Contingencias que impliquen desprendimientos de carga por frecuencia o por tensión.
- Las tensiones del SI cumplan con el límite inferior de recuperación de tensión definido en el Artículo 5-34 de la NTSyCS frente a la ocurrencia de una contingencia simple de hasta severidad 7, sin admitir la utilización de Recursos Generales o Adicionales de Control de Contingencias que impliquen desprendimientos de carga por frecuencia o por tensión.

Adicionalmente, se deberá verificar que:

- El IDD calculado en la barra j más cercana al lugar de ocurrencia de la falla cumpla la condición $IDD_j < 0,16$.

Donde el valor 0,16 corresponde al peor valor admisible que puede adquirir el IDD para efectos del Estudio³.

(Paso 4) Si para un año T' determinado existe al menos una contingencia en la cual no se cumple alguno de los requerimientos señalados en el (Paso 3), el AdT asociada a dicha contingencia deberá ser catalogada como débil, aun cuando el incumplimiento se verifique en un único escenario del año T' . En tal caso, deberán aplicarse los pasos (4.a), (4.b), (4.c) y (4.d) descritos a continuación:

- (4.a)** Para el área débil AdT_k , el Coordinador deberá analizar y proponer un conjunto de soluciones orientadas a aumentar la fortaleza de dicha área, de manera de garantizar el cumplimiento de los requerimientos establecidos en el (Paso 3). Las soluciones deberán considerar medidas del tipo (M-1), (M-2) y (M-3), conforme a la tipificación establecida en el Artículo 1-6 del presente Anexo Técnico. Las medidas del tipo (M-2) sólo podrán

³ Este valor se obtiene tomando como referencia basal la envolvente normativa de recuperación de tensión establecida en el Artículo 5-34 de la NTSyCS, pero incorporando exigencias adicionales asociadas a la rapidez y calidad de la recuperación de la tensión, es decir, exigiendo una respuesta más robusta.

considerarse si sus plazos de implementación y entrada en operación son compatibles con el año en que se requiere su aplicación.

Cada solución s_i deberá constituir, por sí sola, una alternativa técnicamente viable que permita fortalecer el área débil AdT_k y asegurar el cumplimiento de los requerimientos del (Paso 3). Una solución podrá consistir en una medida individual o en una combinación de medidas de los tipos (M-1), (M-2) y/o (M-3).

El Coordinador deberá identificar y evaluar múltiples soluciones independientes entre sí, sin limitarse a proponer una única alternativa, con el objeto de conformar un conjunto de soluciones técnicamente factibles de implementar. El resultado de esta etapa es un conjunto de potenciales soluciones $\mathbb{S}_{AdT_k}^{T'}$, definido como:

$$\mathbb{S}_{AdT_k}^{T'} = \{s_1, s_2, \dots, s_m\}.$$

Donde cada elemento s_i corresponde a una solución técnicamente factible que, por sí sola, permite que el área AdT_k cumpla con los requerimientos establecidos en el (Paso 3).

- (4.b)** En aquellos casos en que no se identifique ninguna solución factible, esto es, cuando ninguna medida del tipo (M-1), (M-2) o (M-3), ya sea aplicada de forma individual o combinada, permita garantizar el cumplimiento de los estándares exigidos en el (Paso 3), el Coordinador deberá identificar restricciones operacionales aplicables al área débil AdT_k correspondiente, para evitar el incumplimiento.

Dichas restricciones podrán incluir, entre otras, la exigencia de una cantidad mínima de UGS o IBR GFM en operación, o la limitación de la generación de UGBC. Para efectos del Estudio, estas restricciones deberán aplicarse exclusivamente en el área débil AdT_k en la que se haya verificado el incumplimiento.

- (4.c)** Para cada solución s_i identificada, el Coordinador deberá evaluar y cuantificar la mejora en los indicadores de desempeño establecidos en el Artículo 3-9 del presente Anexo Técnico, respecto de la condición base, es decir, sin la aplicación de dicha solución (valores obtenidos en la (Etapa 2)).

Considerando que, para efectos del Estudio, la Robustez se evalúa en función del desempeño dinámico del SI durante contingencias, la mejora en los indicadores de desempeño constituye un indicador del aumento de Fortaleza aportado por cada solución. Sin embargo, dicha mejora no constituye, por sí misma, un criterio de priorización de soluciones. Para una adecuada priorización, deben considerarse de manera conjunta aspectos técnicos, incluyendo el aumento de Fortaleza reflejado en los indicadores de desempeño, y económicos, así como otros criterios que resulten aplicables conforme a la normativa vigente.

- (4.d)** Una vez obtenido un conjunto de soluciones factibles para fortalecer una determinada área débil AdT_k , el Coordinador deberá seleccionar una solución s_* , de entre todas las soluciones contenidas en el conjunto $\mathbb{S}_{AdT_k}^{T'}$ e identificadas en el paso (4a), para ser considerada en las siguientes simulaciones que se realicen para el mismo año T' . Concretamente, la solución seleccionada deberá incorporarse en las simulaciones asociadas a las demás áreas de tensión AdT_j del mismo año, con $j \neq k$. La finalidad de esta selección es fijar un grupo de

medidas que garantice que el área débil AdT_k cumpla con los requerimientos establecidos en el (Punto 3) en las simulaciones que se realicen para el resto de las AdT del mismo año.

(Paso 5) Una vez concluido el análisis de un año T' determinado, para la evaluación de los años siguientes, las medidas del tipo (M-2) incluidas en la solución s_* de una determinada área débil deberán considerarse como infraestructura existente para los años siguientes, es decir, como medidas del tipo (M-1).

Artículo 3-14 Resultados del análisis de Fortaleza

Como resultado del análisis de Fortaleza descrito en el Artículo 3-13 del presente Anexo Técnico, aplicado a cada año dentro del horizonte de evaluación del Estudio, se obtendrá:

- a) Conjunto de AdT débiles del SI, para cada año del horizonte de evaluación;
- b) Resultados de las simulaciones dinámicas realizadas, incluyendo el valor de los indicadores de desempeño correspondientes;
- c) Conjunto de soluciones técnicamente factibles de implementar para robustecer las AdT débiles y garantizar el cumplimiento de los requerimientos establecidos en el Artículo 3-13 del presente Anexo Técnico; y,
- d) Niveles mínimos esperados de potencia de cortocircuito (SCL) y factores agregados de interacción IBR (K_i) en las barras del SI con niveles de tensión iguales o superiores a 66 kV, para cada año del horizonte de evaluación T_1 , T_3 y T_5 .

Con respecto al conjunto de soluciones indicadas en el literal c), estas deberán clasificarse según:

- i. Tipo de aporte a la Robustez que realizan;
- ii. Año a partir del cual la solución podría ser necesaria;
- iii. AdT en la cual la medida impacta; y,
- iv. Mejora en los indicadores de desempeño en que se traducen las soluciones.

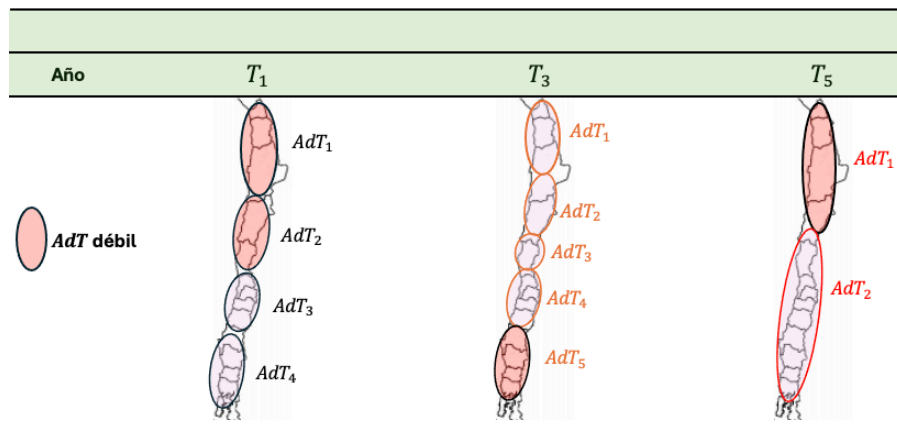
Considérese nuevamente el caso ilustrativo de la Figura 5. La Tabla 3 a continuación resume las contingencias simuladas en cada AdT en el (Paso 1), destacando aquellas AdT en las que al menos una contingencia no cumplió los requerimientos establecidos en el (Paso 3) del Artículo 3-13 del presente Anexo Técnico. De la Tabla 3 se observa que, en todos los años evaluados, hay un total de cuatro AdT en las cuales al menos una contingencia no cumple con los requerimientos del Artículo 3-13 del presente Anexo Técnico. En consecuencia, para este ejemplo ilustrativo, las áreas débiles del SI identificadas para cada año del Estudio son las siguientes:

- Para el año T_1 : áreas de tensión AdT_1 y AdT_2 .
- Para el año T_3 : áreas de tensión AdT_5 .
- Para el año T_5 : áreas de tensión AdT_1 .

Tabla 3: contingencias simuladas en cada AdT, destacando los casos en que no se cumplieron los requerimientos (ejemplo ilustrativo)

Año	T_1		T_3		T_5		
Escenario	E_1T_1	E_2T_1	E_1T_3	E_2T_3	E_1T_5	E_2T_5	E_3T_5
AdT_1	*	*	*	**	*	*	**
AdT_2	*	*	*	*	*	**	*
AdT_3	*	*	*	*			
AdT_4	*	*	*	*			
AdT_5			*	*			
Total de contingencias de Severidad 4a * por escenario	4	4	5	6	2	3	3

La Figura 6 a continuación muestra el resultado de las AdT débiles para el ejemplo considerado. De la Figura 6 se observa que, para el primer año en estudio (T_1), se identifican dos AdT débiles, mientras que para los años T_3 y T_5 se identifica una única AdT débil en cada caso. Este resultado se explica por el criterio de clasificación establecido en el Artículo 3-13 del presente Anexo Técnico, conforme el cual, para un año T , una determinada AdT se deberá catalogar como débil cuando, para al menos una contingencia, no se cumpla alguno de los requerimientos señalados en el (Paso 3), aun cuando dicho incumplimiento se verifique en un único escenario E de dicho año. Por esta razón, para el año T_1 , las áreas de tensión AdT_1 y AdT_2 son catalogadas como débiles, aun cuando los incumplimientos se verificaron únicamente en el escenario E_1T_1 (ver Tabla 3).

**Figura 6: resultado de las AdT débiles (ejemplo ilustrativo)**

Artículo 3-15 Análisis de la Robustez de Frecuencia

El análisis de Robustez de Frecuencia se desarrolla de manera análoga al análisis de Fortaleza descrito en el Artículo 3-13 del presente Anexo Técnico, salvo por las siguientes diferencias:

- En lugar de considerar las AdT, se utilizan las AdF;
- En las simulaciones, en lugar de considerar fallas de Severidad 4a, se consideran contingencias de Severidad 5;

- c) Respecto de los indicadores de desempeño dinámico, definidos en el Artículo 3-9 del presente Anexo Técnico, se emplean la frecuencia mínima y RoCoF, calculados conforme a lo establecido en el Artículo 3-11 del presente Anexo Técnico; y,
- d) Respecto de los requerimientos establecidos en el (Paso 3), para cada una de las contingencias simuladas, se deberán cumplir todos los estándares aplicables establecidos en la NTSyCS. Sin perjuicio de lo anterior, se deberá verificar, al menos, que:
 - i. Se cumpla con lo dispuesto en el Artículo 5-31 de la NTSyCS respecto de la estabilidad del SI frente a la ocurrencia de una contingencia simple de hasta severidad 7, sin admitir la utilización de Recursos Generales o Adicionales de Control de Contingencias que impliquen desprendimientos de carga por frecuencia o por tensión.
 - ii. Que los valores de frecuencia mínima y de RoCoF alcanzados por el sistema, medidos en la barra eléctricamente más cercana al punto de ocurrencia de la perturbación y calculados conforme al Artículo 3-11 del presente Anexo Técnico, no provoquen la activación de Recursos Generales o Adicionales de Control de Contingencias que impliquen desprendimientos de carga por frecuencia o por tensión.

Título 4 Disposiciones transitorias

Artículo 4-1 Publicación del primer Estudio

El Coordinador deberá publicar el primer Estudio en un plazo no superior a 12 meses contados desde la publicación en el Diario Oficial de la resolución exenta que aprueba el presente Anexo Técnico.

Artículo 4-2 Publicación del primer listado de indicadores SCL y K

El Coordinador deberá publicar, en un plazo no superior a 15 días hábiles contados desde la publicación en el Diario Oficial de la resolución exenta que aprueba el presente Anexo Técnico, un listado con los valores de los niveles de cortocircuito (SCL, del inglés "*Short Circuit Level*") mínimos esperados y factores agregados de interacción IBR (K definido en el Artículo 4-8 del Anexo Técnico de Exigencias Mínimas de Instalaciones Basadas en Convertidores que se conecten al Sistema Eléctrico Nacional). La vigencia del referido listado se extenderá desde la fecha de su publicación en el sitio web del Coordinador hasta la publicación del primer Estudio a la cual se refiere el Artículo 4-1 del presente Anexo Técnico.

Para efectos de lo anterior, el Coordinador podrá utilizar escenarios simplificados con el fin de evaluar un conjunto acotado de configuraciones de despacho que sean creíbles, pero exigentes desde el punto de vista de la Robustez de Frecuencia y de Tensión. En estos escenarios se deberá calcular el nivel mínimo esperado de SCL y su respectivo resultado de K en, al menos, las barras del SI con niveles de tensión iguales o superiores a 66 kV. Estos indicadores deberán ser calculados considerando el período anual 2026.