



Estudio de requerimientos de robustez del SEN

Claudia Rahmann

Chile, 15 de julio de 2025

Agenda

- ☐ Introducción
- ☐ Estudio de requerimientos de robustez
- ☐ Cierre



NORMA TÉCNICA DE SEGURIDAD Y CALIDAD DE SERVICIO

Versión usada: Enero 2025 Santiago de Chile /

Visión general

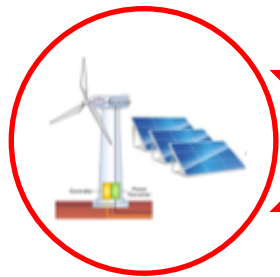
- La propuesta de incorporación de criterios de robustez incluye 3 pilares fundamentales:



Visión general – Requerimientos de conexión a la red

○ Requerimientos de conexión a la red:

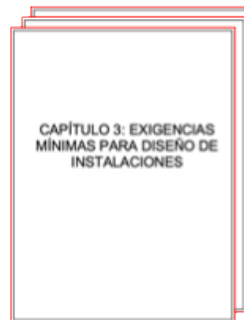
- ◆ Capítulo 3 de la NTSyCS
- ◆ Anexo: “Requisitos Técnicos Mínimos de Instalaciones que se Interconectan al SI”



Requerimientos de conexión a la red

Exigencias de diseño de equipamiento

Estudios de conexión



Requerimientos de diseño para:

- Control de tensión y P/f
- Valor mínimo para de SCR en IBR-GFL
- Capacidad FRT e inyección i_q
- Desconexión frente a desbalances
- Pérdida de sincronismo del PLL
- Sistema de control (I_{max})
- Curvas PQ

Visión general – Requerimientos de corto y mediano plazo

○ Requerimientos de corto y mediano plazo



Requerimientos de seguridad operativa

Requerimientos de robustez de frecuencia y fortaleza en estado normal



Requerimientos de mediano plazo

Conjunto de medidas para garantizar el cumplimiento de los estándares de robustez del SEP

CAPÍTULO 5: EXIGENCIAS PARA ESTÁNDARES DE SEGURIDAD Y CALIDAD DE SERVICIO

TÍTULO 5-15 ESTÁNDARES DE ROBUSTEZ DEL SEN

Artículo 5-72

En Estado Normal, el SI deberá operar cumpliendo con los requerimientos mínimos de fortaleza definidos para cada AIC, conforme a los resultados del último "Estudio de requerimientos de robustez del SEN", cuyos lineamientos se establecen en el Título 6-8 de la presente norma técnica.

Adicionalmente, el SI deberá operar cumpliendo con los requerimientos mínimos de robustez de frecuencia definidos para cada AIC, conforme a los resultados del mismo Estudio.



CAPÍTULO 6: ESTUDIOS PARA PROGRAMACIÓN DE LA SEGURIDAD Y CALIDAD DE SERVICIO

TÍTULO 6-8 ESTUDIO DE REQUERIMIENTOS DE ROBUSTEZ

Artículo 6-46

El Coordinador deberá realizar—con una periodicidad anual—un Estudio de Requerimientos de Robustez del Sistema Eléctrico Nacional (SEN), conforme a lo instruido en el Artículo 1-8 de la presente NTSCS.

El objetivo del Estudio es identificar los requerimientos mínimos de robustez de frecuencia y tensión con los que debe contar el SI para garantizar el cumplimiento de los estándares de seguridad establecidos en la presente NTSCS.

El Estudio deberá contemplar un horizonte de evaluación de tres años, incluyendo el estado actual del sistema (año T_0) y su proyección para los años T_1 , T_2 , T_3 . La proyección deberá incorporar las instalaciones en construcción, aprobadas y planificadas que, conforme a fuentes oficiales, se espera entren en operación dentro del horizonte de evaluación considerado.

El desarrollo del estudio deberá basarse en la metodología establecida en el Anexo Técnico "Metodología para Determinar Requerimientos de Robustez".

Artículo 6-47

Entre los resultados del Estudio de Requerimientos de Robustez se deberá incluir, como mínimo, los siguientes elementos para cada año en el horizonte de evaluación:

- Identificación de los modos de operación representativos del SI utilizados en el análisis.
- Definición de las Áreas de Frecuencia Coherente (AFC) y Áreas de Tensión Coherente (ATC) para cada modo de operación representativo.
- Resultados de las simulaciones dinámicas realizadas para el análisis de robustez de tensión y frecuencia, incluyendo el valor de los indicadores de desempeño.
- Conjunto de medidas requeridas para garantizar el cumplimiento de los estándares de seguridad establecidos en la NTSCS incluyendo su justificación técnica.
- Un listado con las áreas de tensión y frecuencia coherente que, conforme a los resultados del Estudio, cumplen con los criterios establecidos para ser clasificadas como áreas débiles, señalando explícitamente el o los años en que dicha clasificación resulta aplicable.

Artículo 6-48

El Coordinador deberá elaborar un informe técnico anual que documente los resultados del Estudio de Requerimientos de Robustez del SEN. Dicho informe deberá ser publicado en el sitio web institucional del Coordinador a más tardar durante la segunda semana del mes de diciembre del año correspondiente al Estudio.

¿Como se cumplen?



Objetivo del Estudio

- **Objetivo:** identificar conjunto de medidas y/o recursos que permiten garantizar los estándares de robustez de frecuencia y tensión establecidos en la NTSyCS



NORMA TÉCNICA DE SEGURIDAD Y CALIDAD DE SERVICIO

Versión usada: Enero 2025 Santiago de Chile /

Para cumplir con los **estándares de robustez en la operación normal**, se deben **planificar los recursos/medidas** que se requerirán



Requerimientos de conexión a la red

- Exigencias de diseño de equipamiento
- Estudios de conexión

Conexión a la red



Requerimientos de seguridad operativa

- Requerimientos de robustez de frecuencia y fortaleza en estado normal

Planificación de la operación



Requerimientos de mediano plazo

- Conjunto de medidas para garantizar el cumplimiento de los estándares de robustez del SEP

Planificación de mediano plazo



Introducción

Estudio de requerimientos de robustez del SEN

Cierre

Capítulo 6: ESTUDIOS PARA PROGRAMACIÓN DE LA SEGURIDAD Y CALIDAD DE SERVICIO

TÍTULO 6-8 ESTUDIO DE REQUERIMIENTOS DE ROBUSTEZ

Artículo 6-46

El Coordinador deberá realizar —con una periodicidad anual— un Estudio de Requerimientos de Robustez del Sistema Eléctrico Nacional (SEN), conforme a lo instruido en el Artículo 1-9 de la presente NTSyCS.

El objetivo del Estudio es identificar los requerimientos mínimos de robustez de frecuencia y tensión con los que debe contar el SI para garantizar el cumplimiento de los estándares de seguridad establecidos en la presente NTSyCS.

El Estudio deberá contemplar un horizonte de evaluación de tres años, incluyendo el estado actual del sistema (año T_0) y su proyección para los años T_1 , T_2 , T_3 . La proyección deberá incorporar las instalaciones en construcción, aprobadas y planificadas que, conforme a fuentes oficiales, se espera entren en operación dentro del horizonte de evaluación considerado.

El desarrollo del estudio deberá basarse en la metodología establecida en el Anexo Técnico "Metodología para Determinar Requerimientos de Robustez".

Artículo 6-47

Entre los resultados del Estudio de Requerimientos de Robustez se deberá incluir, como mínimo, los siguientes elementos para cada año en el horizonte de evaluación:

- Identificación de los modos de operación representativos del SI utilizados en el análisis.
- Definición de las Áreas de Frecuencia Coherente (AfC) y Áreas de Tensión Coherente (AtC) para cada modo de operación representativo.
- Resultados de las simulaciones dinámicas realizadas para el análisis de robustez de tensión y frecuencia, incluyendo el valor de los indicadores de desempeño.
- Conjunto de medidas requeridas para garantizar el cumplimiento de los estándares de seguridad establecidos en la NTSyCS incluyendo su justificación técnica.
- Un listado con las áreas de tensión y frecuencia coherente que, conforme a los resultados del Estudio, cumplen con los criterios establecidos para ser clasificadas como áreas débiles, señalando explícitamente el o los años en que dicha clasificación resulta aplicable.

Artículo 6-48

El Coordinador deberá elaborar un informe técnico anual que documente los resultados del Estudio de Requerimientos de Robustez del SEN. Dicho informe deberá ser publicado en el sitio web institucional del Coordinador a más tardar durante la segunda semana del mes de diciembre del año correspondiente al Estudio.

Agenda

- Introducción
- Estudio de requerimientos de robustez
- Cierre



NORMA TÉCNICA DE SEGURIDAD Y CALIDAD DE SERVICIO

Versión usada: Enero 2025 Santiago de Chile /

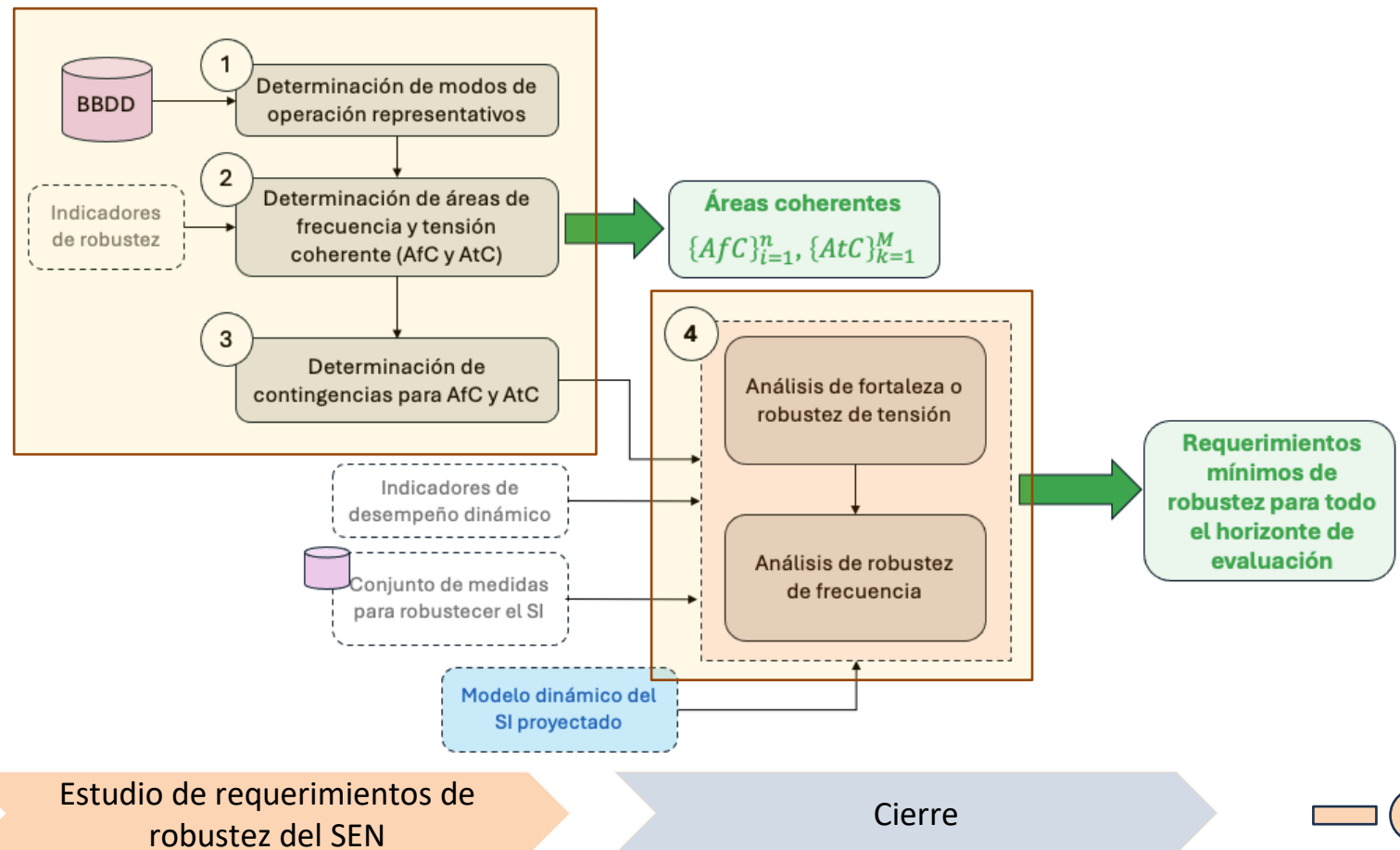
Introducción al Estudio

- “Estudio de requerimientos de robustez del SEN”
 - ◆ Periodicidad anual con un horizonte de evaluación de tres años
- Resultados del Estudio :
 - ◆ Identificación de los modos de operación representativos del SI
 - ◆ Definición de las Áreas de Frecuencia Coherente (AfC) y Áreas de Tensión Coherente (AtC) para cada modo de operación representativo
 - ◆ Resultados de las simulaciones dinámicas realizadas para el análisis de robustez de tensión y frecuencia, incluyendo el valor de los indicadores de desempeño
 - ◆ **Conjunto de medidas y/o recursos requeridos para garantizar el cumplimiento de los estándares** de seguridad establecidos en la NTSyCS incluyendo su justificación técnica
- ◆ **El desarrollo del Estudio deberá basarse en la metodología establecida en el Anexo Técnico “Metodología para Determinar Requerimientos de Robustez”**



Metodología para el desarrollo del Estudio

- La metodología del Estudio involucra 4 etapas según lo mostrado en la figura:
 - ◆ Las primeras tres etapas se ejecutan de manera secuencial al inicio del Estudio, y tienen por objetivo establecer las condiciones base y escenarios a considerar en el análisis
- La cuarta etapa corresponde al análisis técnico de robustez, el cual se realiza en base a simulaciones dinámicas en el dominio del tiempo
- Este análisis se lleva a cabo en dos fases secuenciales
 - ◆ Primero se evalúa la fortaleza del SI proyectado
 - ◆ Luego la robustez de frecuencia



Primeras etapas del Estudio

○ Base de datos y modelos

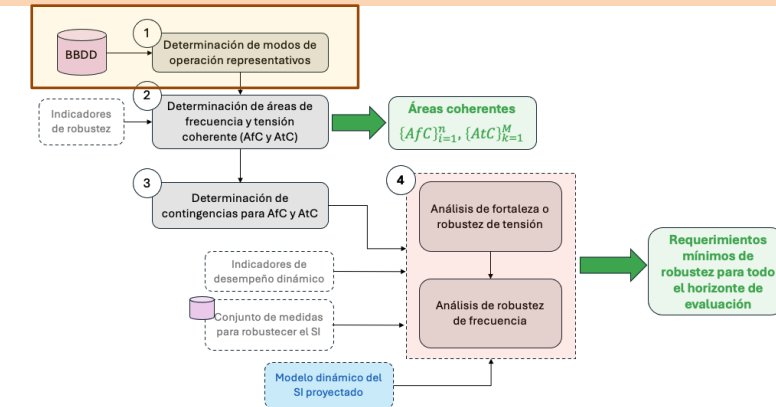
- ◆ La base de datos del Estudio deberá contener toda la información necesaria para representar adecuadamente las diferentes condiciones de operación que podría experimentar el SI proyectado en cada año del horizonte de evaluación

○ Modos de Operación Representativos

- ◆ Para cada año del horizonte de evaluación, el Coordinador deberá identificar, sobre la base de la operación esperada, un conjunto acotado de configuraciones de despacho que represente adecuadamente la operación del SI a lo largo de un año calendario
- ◆ Los modos de operación representativos deberán ser identificados mediante la aplicación de algún método de agrupamiento sobre la base de datos de despachos horarios anuales

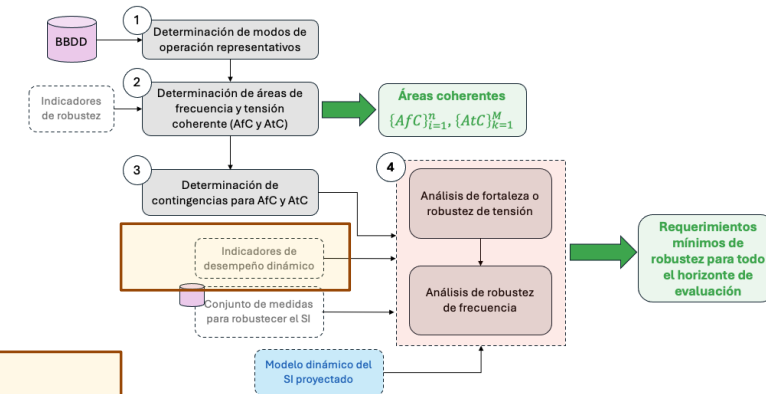
○ Determinación de áreas coherentes

- ◆ Para cada Modo de Operación Representativo, el Coordinador deberá identificar las AfC y AtC del SI
- ◆ La identificación de estas áreas deberá realizarse a partir de un método de agrupamiento aplicado sobre las barras del SI en función de los **indicadores de robustez**
 - Identificación de AtC: sensibilidad de la tensión con respecto a variaciones en el flujo de potencia reactiva por barra $\frac{dV_i}{dQ_i}$
 - Identificación de AfC: inercia sincrónica equivalente por barra $H_i = \sum_{g \in GS} D_{ig} H_g$



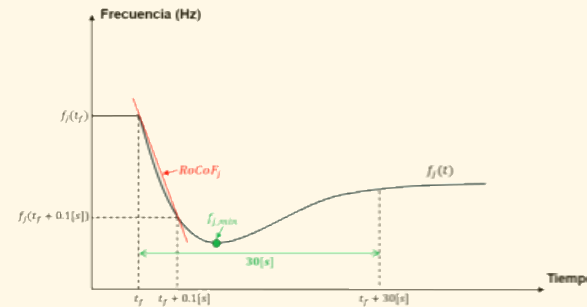
Indicadores de desempeño

- Indicadores de desempeño dinámico
- La **robustez se mide en base al desempeño dinámico del SI** durante contingencias, utilizando los **indicadores de desempeño**
 - ◆ Dichos indicadores deberán ser aplicados en cada una de las fases de análisis según corresponda



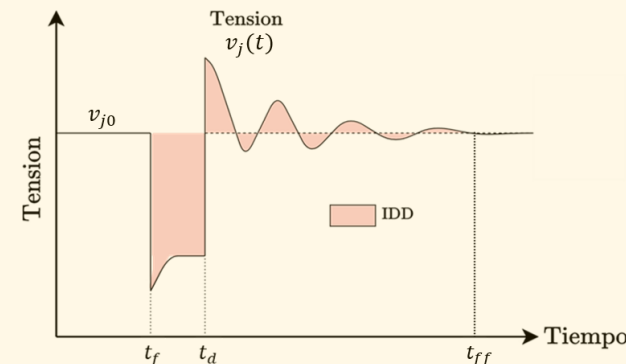
○ Indicadores de robustez de frecuencia:

- ◆ Frecuencia mínima y RoCoF calculadas para cada contingencia de las AfC conforme a lo establecido en el Artículo 76



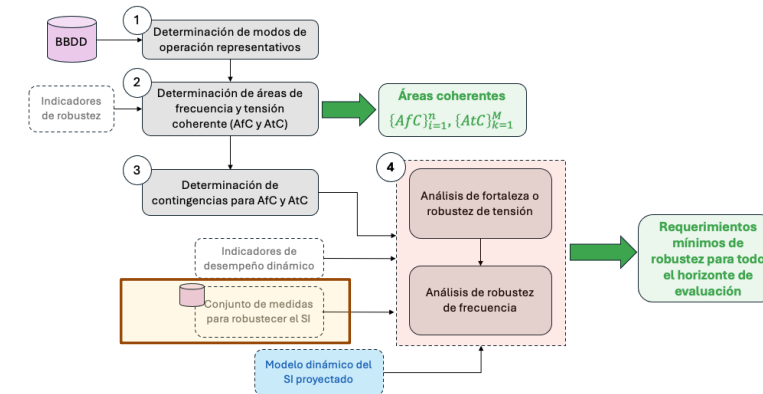
○ Indicador de fortaleza:

- ◆ Índice de Desempeño Dinámico (IDD): calculado para cada contingencia de las AtC conforme a lo establecido en el Artículo 5-75



Conjunto de medidas para robustecer

- **Medidas que pueden robustecer el SI**
- El Coordinador deberá identificar —para cada año dentro del horizonte de evaluación del Estudio—, el conjunto de todas las posibles medidas que puedan contribuir a la fortaleza y/o robustez de frecuencia del SI
- Dicho conjunto deberá incluir, al menos, las siguientes categorías:
 - ◆ Todos aquellos recursos técnicos e infraestructura disponibles en el SI que, —en el marco de los servicios complementarios— estén habilitados para prestar servicios que contribuyan a mejorar la robustez de frecuencia y/o de tensión del SI
 - ◆ Alternativas de nuevas instalaciones e infraestructura con el potencial de robustecer áreas débiles del SI y cuya instalación y puesta en operación sea factible dentro de un plazo máximo de dos años



- Para la selección de alternativas de nuevas instalaciones e infraestructura, el Coordinador deberá adoptar un enfoque de neutralidad tecnológica, considerando todas las opciones y tecnologías disponibles en el mercado que, al momento de la ejecución del Estudio, puedan contribuir a la robustez



Estudio de robustez

- **Análisis de robustez**
- Para cada modo de operación representativo, se simulan las contingencias asociadas a cada una de sus AtC y luego se calculan los indicadores de desempeño
- Para cada contingencia, se deberá verificar el cumplimiento de los siguientes **criterios normativos → Capítulo 5 de la NT**

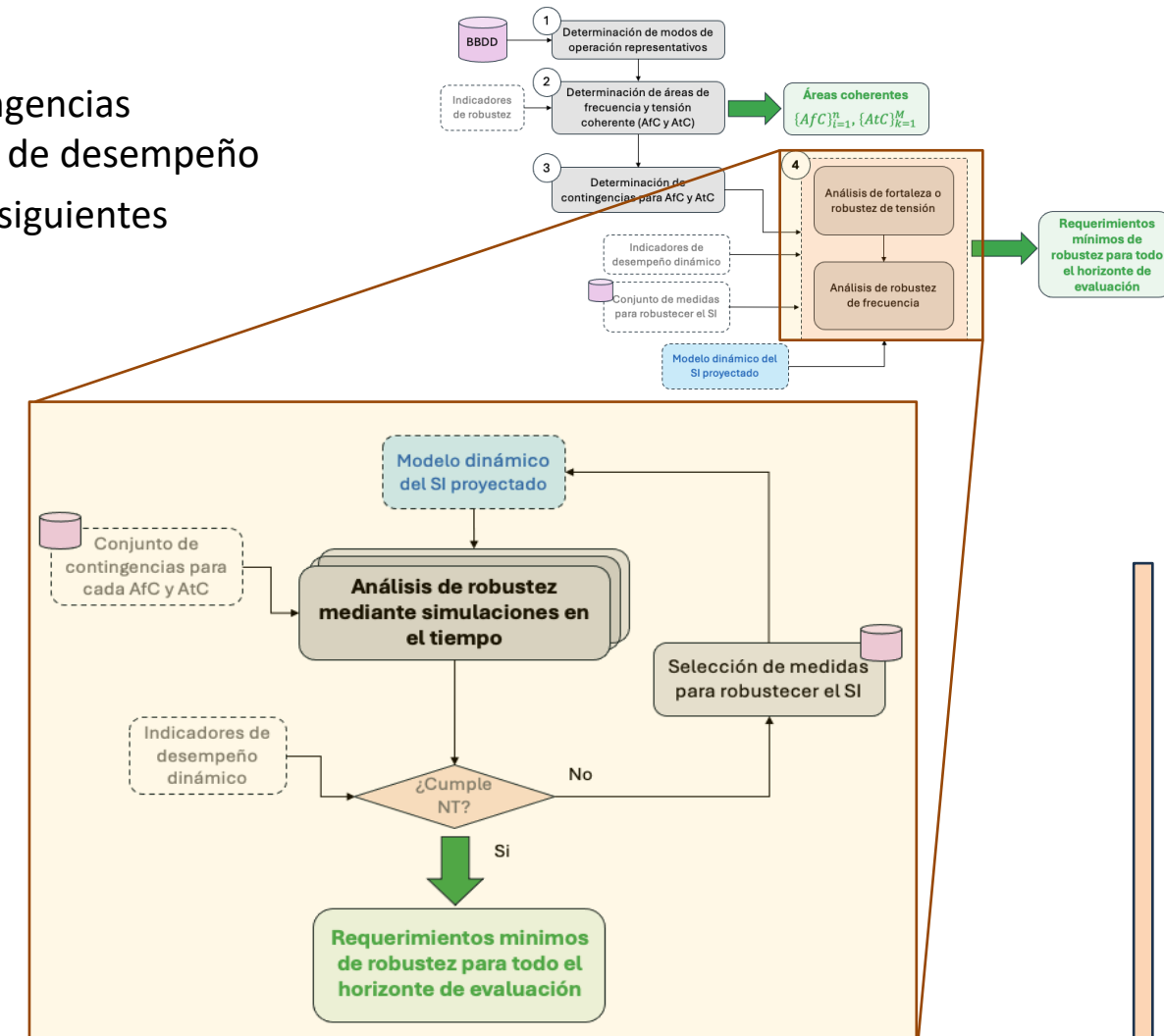
- [I] Que se cumpla lo dispuesto en el Artículo 5-31 de la NTSyCS.
- [II] Que, una vez finalizado el período transitorio de la falla, las tensiones del SI se encuentren dentro de los estándares definidos para el Estado de Alerta, conforme a lo dispuesto en el Artículo 5-23.
- [III] Que el IDD cumpla con lo indicado en el Artículo 5-73 de la NTSyCS.

Artículo 5-31

En Estado Normal y frente a la ocurrencia de una Contingencia Simple, el SI deberá mantenerse transitoriamente estable, utilizando los recursos de control y protección que estén disponibles **en el sistema**, sin riesgo de pérdida de sincronismo, **inestabilidad de tensión o frecuencia**, disgregación en islas eléctricas o **inestabilidad desencadenada por convertidores**.

Artículo 5-73

Para efectos del Estudio de requerimientos de robustez indicado en el Artículo 1-9 de la presente NTSyCS, se deberá cumplir que, luego de ocurrida una contingencia simple de severidad 4a, el índice de desempeño dinámico (IDD), calculado en la barra del SI cuya localización sea la más cercana eléctricamente al lugar de ocurrencia de la falla, no exceda el 90% del valor del IDD normativo, calculado según lo indicado en el Artículo 5-75.

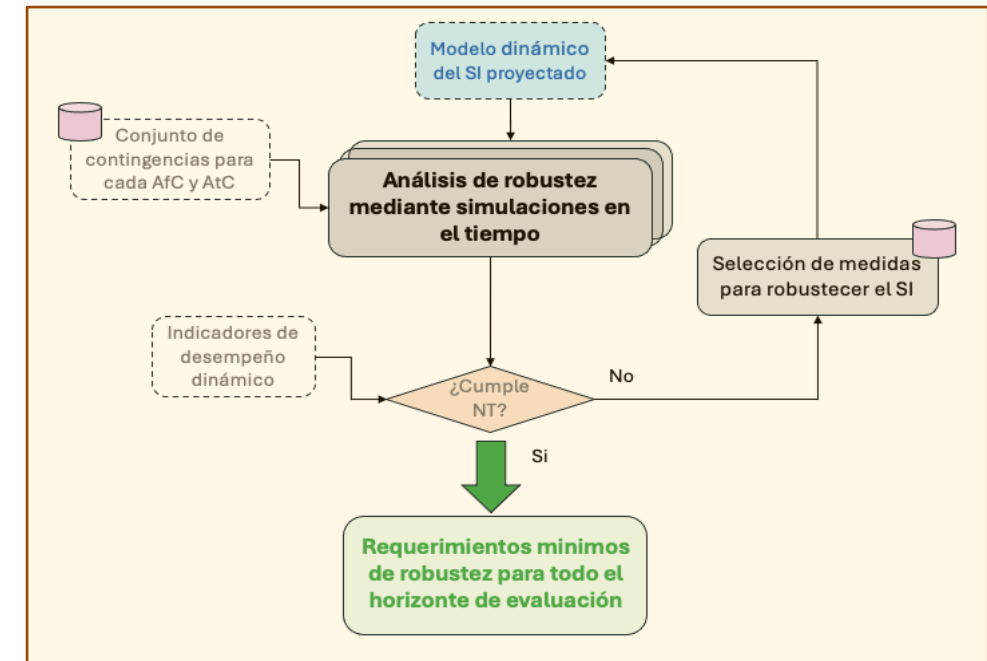


Estudio de robustez – Fortaleza

- Si para una de las contingencias de un AtC, **no se cumple alguna de las exigencias [I], [II] o [III]**, el Coordinador deberá seleccionar una o más medidas que permitan aumentar la fortaleza de dicha AtC
 - ◆ La selección de medidas deberá realizarse siguiendo el orden de priorización establecido en el Artículo 3-12 del Anexo

La selección de medidas indicada en el Artículo 3-11 del presente Anexo deberá efectuarse priorizando aquellas que presenten una mejor relación costo-beneficio, siguiendo el orden de priorización que se detalla a continuación:

- **Grupo 1t – SSCC con recursos existentes:** El análisis deberá comenzar considerando las medidas asociadas a recursos técnicos e infraestructura actualmente disponibles en el SI que estén habilitados para la prestación de servicios complementarios que contribuyan a mejorar la fortaleza del AtC en la que se haya verificado un incumplimiento normativo. Entre estas medidas se podrán incluir, entre otras: la incorporación de capacidad de control de tensión, la participación de unidades formadoras de red y la capacidad de inyección rápida de corrientes reactivas. Adicionalmente, en aquellos casos en que el Coordinador identifique un problema de estabilidad local asociado a una central IBR, se podrá considerar la resintonización de parámetros de sus controladores como medida adicional dentro de este grupo.
- **Grupo 2t – SSCC con nuevos recursos:** Cuando ninguna de las medidas contenidas en el Grupo 1t —ya sea aplicadas de manera individual o conjunta— permita garantizar el cumplimiento de los estándares normativos [I], [II] y [III] del Artículo 18 del presente Anexo, el análisis deberá continuar considerando aquellas medidas basadas en la incorporación de nuevas instalaciones e infraestructura que contribuyan a mejorar la fortaleza del AtC en la que se haya verificado el incumplimiento normativo. No obstante, estas medidas sólo podrán ser consideradas si sus plazos de implementación y puesta en servicio resultan compatibles con el año en que se requiere su aplicación.
- **Grupo 3f – Restricciones operacionales:** De manera excepcional, y sólo en aquellos casos en que se cumpla que:
 - Ninguna de las medidas del Grupo 1t —ya sea aplicadas de manera individual o conjunta— permite garantizar el cumplimiento de los criterios normativos [I], [II] y [III] del Artículo 3-11,
 - Las medidas contenidas en el Grupo 2t no pueden ser aplicadas debido a una incompatibilidad de sus plazos de implementación con el año de análisis,



Estudio de robustez – Fortaleza

- La medida deberá implementarse en el modelo, para luego volver a simular y verificar si la medida permite cumplir con los **criterios normativos [I], [II] y [III]**

- ◆ Si se cumple, el proceso continúa con la simulación de la siguiente contingencia
- ◆ En caso contrario, se debe seleccionar una nueva medida para simular la contingencia

- El procedimiento se cumplirá hasta que se cumplan todos los criterios de las contingencias representativas de la zona

Como resultado del análisis de fortaleza descrito —aplicado a cada año dentro del horizonte de evaluación del Estudio—, se obtendrá:

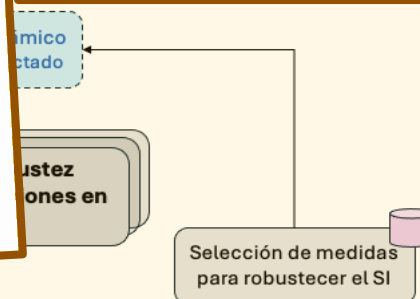
- El conjunto de medidas con las que debe contar el SI a fin de garantizar el cumplimiento de los estándares de fortaleza establecidos en la NTSyCS durante todo el horizonte de evaluación.
- Una lista con las áreas de tensión coherente (AtC) que cumplen con los criterios para ser clasificadas como áreas débiles según el Artículo 3-14 del presente Anexo, incluyendo el o los años en que dicha clasificación resulte aplicable.

El Coordinador podrá considerar la aplicación de restricciones operacionales en el AtC en la que se haya verificado el incumplimiento normativo: exigencia de una cantidad mínima de unidades sincrónicas en operación y/o el vertimiento programado de generación de IBR



Para efectos de este Anexo, se entenderá que una AtC se clasifica como un área débil del SI cuando, habiéndose verificado el incumplimiento de al menos uno de los estándares normativos establecidos en los numerales [I], [II] o [III] del Artículo 3-11, ninguna de las medidas del Grupo 1f —ya sea aplicadas de manera individual o conjunta— permite aumentar la fortaleza del área al punto de garantizar el cumplimiento de dichos estándares.

De manera similar, un AfC se clasificará como un área débil del SI cuando, habiéndose verificado el incumplimiento de al menos uno de los estándares normativos establecidos en los numerales [I] o [II] del Artículo 3-11; o en el numeral [IV] del Artículo 3-13, ninguna de las medidas del Grupo 1f —ya sea aplicadas de manera individual o conjunta— permite aumentar la robustez de frecuencia del área al punto de garantizar el cumplimiento de dichos estándares.



Agenda

- Introducción
- Estudio de requerimientos de robustez
- Cierre



NORMA TÉCNICA DE SEGURIDAD Y CALIDAD DE SERVICIO

Versión usada: Enero 2025 Santiago de Chile /

¿Opiniones?

¿Preguntas?



Introducción

Estudio de requerimientos de
robustez del SEN

Cierre