Procedimiento Interno

Diseño, Implementación y Operación de Automatismos para el Control de Transferencias en el SEN

Versión 01

20 de octubre de 2021

Gerencia de Operación

www.coordinador.cl

1 Contenido

1 Contenido 2

2 Introducción y Objetivo 4

2.1 Alcances 4

2.2 Definiciones y Abreviaturas 5

2.3 Vigencia del documento 6

2.4 Criterios para la evaluación de factibilidad de implementación del automatismo en el SEN 6

2.5 Determinación de la conveniencia económica del Automatismo 7

3 Filosofía de control de los Automatismos 9

3.1 Consideraciones para el armado del Automatismo 10

4 Consideraciones para la implementación del Automatismo [4] 12

4.1 Ciclo de vida del Automatismo 12

4.2 Diseño seguro y confiable del Automatismo 17

4.2.1 Confiabilidad del diseño 17

4.2.2 Conceptos básicos para el diseño de ingeniería de confiabilidad del Automatismo 17

4.2.3 Bloqueo de operaciones innecesarias durante una falla de hardware 19

4.2.4 Componentes en serie 20

4.2.5 Supervisión automática 21

4.2.6 Componentes en paralelo 22

4.2.7 Balance entre seguridad y fiabilidad 23

4.3 Diseño para las pruebas del automatismo en funcionamiento 24

4.3.1 Pruebas en Automatismos multiacción 25

4.3.2 Ejecución de pruebas en simulador de tiempo real 26

4.4 Características mínimas del equipamiento [6] 27

4.4.1 Controladores 27

4.4.2 Sistemas de medición multivariable trifásico 27

4.4.3 Reloj sincronizado por satélite 28

4.4.4 Switches Ethernet 28

4.4.5 Relés de frecuencia 28

4.4.6 Protocolos de comunicaciones 29

4.4.7 Funciones de control 29

4.4.8 Diagnóstico de fallas 30

5 Costos de implementación de automatismos 32

6 Referencias y bibliografía 33

2 Introducción y Objetivo

El objetivo del presente Procedimiento es establecer un conjunto de requerimientos técnicos mínimos, de acuerdo con estándares internacionales, para el diseño, implementación y operación de automatismos en el Sistema Eléctrico Nacional, así como describir los criterios bajo los cuales el Coordinador evaluará la factibilidad de su implementación.

En el presente documento, se describen las pruebas mínimas a las que se deben someter los Automatismos y que el Coordinador deberá tener a la vista a objeto de aprobar o condicionar su puesta en servicio y habilitación.

Es oportuno destacar que, de acuerdo con el Artículo 5-5 de la Norma Técnica de Seguridad y Calidad de Servicio, la planificación para el desarrollo del Sistema Interconectado (SI) deberá ser realizada aplicando el Criterio N-1 y, para efectos de la realización de los estudios para la planificación del Sistema Eléctrico Nacional solo se podrán utilizar recursos EDAC, EDAG o ERAG supervisados por frecuencia o por tensión [2].

Por otra parte, el Artículo 5-7 establece que la aplicación del Criterio N-1 que realice el Coordinador, deberá considerar en todos los estudios de programación de la operación establecidos en la Norma Técnica, que una Contingencia Simple pueda ser controlada sin que sus efectos se propaguen al resto de las instalaciones del SI, mediante el uso de los Recursos Generales de Control de Contingencias, salvo los SSCC de EDAG, ERAG o EDAC [2].

Considerando lo anterior, se debe entender que cuando se requiere la implementación de automatismos para un control de transferencias, sólo será bajo condiciones no consideradas en la planificación del sistema eléctrico, como, por ejemplo, el adelanto en la construcción de instalaciones de generación, o retrasos en la construcción o ampliación de instalaciones del sistema de transmisión. Por otra parte, el tiempo que se espera disponer de estos Automatismos estará dado por el período de tiempo en que se presenten las restricciones para el cual está enfocado este y se mantengan las condiciones operacionales consideradas para su diseño.

El principio básico para tener en cuenta al momento de su diseño es que el Automatismo permita la evacuación de bloques de energía, aprovechando la disponibilidad de generación a bajo costo en una zona determinada, con una consiguiente disminución del costo total de operación, sin degradar la seguridad y calidad de servicio del sistema eléctrico.

2.1 Alcances

Los requerimientos mínimos expuestos en este Procedimiento serán aplicables a los automatismos EDAC, EDAG, ERAG u otros similares que provengan de iniciativas o propuestas particulares de Coordinados y que tengan como objetivo la reducción del costo de operación del sistema eléctrico en su conjunto.

Si bien la evaluación económica no es el objetivo de este Procedimiento, en este se indican las consideraciones generales y mínimas para determinar la conveniencia económica del Automatismo.

En particular, las materias contenidas en este Procedimiento son las siguientes:

- Filosofía de los sistemas de control a implementar,
- Consideraciones para mejorar la confiabilidad del esquema,
- Consideraciones para la realización de las pruebas y puesta en servicio,
- Equipamiento mínimo requerido, y.
- Responsabilidad y obligaciones del Coordinado que implementa el automatismo.

Cabe destacar que el proceso de gestión para la conexión del Automatismo se regirá de acuerdo con los requerimientos, guías y exigencias vigentes para la conexión de proyectos, utilizando la Plataforma de Gestión de Proyectos (PGP) del Coordinador para el ingreso de los documentos requeridos en dicho proceso. En este contexto, el plazo de revisión de cada documentación solicitada será de 20 días hábiles.

En relación con el ámbito de la ciberseguridad, el Automatismo deberá cumplir con el Estándar de Ciberseguridad para el Sector Eléctrico[3] el cual está basado en el estándar NERC CIP o la norma específica que defina el regulador.

2.2 Definiciones y Abreviaturas

Automatismo	En el contexto de este documento, corresponderá a aquellos sistemas automáticos de control y protección que tienen como finalidad evitar la propagación de fallas ocurridas en el Sistema Eléctrico Nacional, permitiendo con ello la reducción del costo de operación del sistema eléctrico en su conjunto
Confiabilidad	Es la combinación entre la fiabilidad y seguridad. La confiabilidad considera la certeza de una correcta operación del automatismo junto con la seguridad que no presentará operaciones incorrectas por causas externas [1]
Coordinado	Todo propietario, arrendatario, usufructuario o quien explote opere o explote a cualquier título instalaciones que se encuentren interconectadas, sean estas: a) centrales generadoras, b) sistemas de transporte, c) instalaciones para la prestación de SSCC, d) sistemas de almacenamiento de energía, e) instalaciones de Distribución, f) instalaciones de Clientes Libres
Coordinador	Coordinador Independiente del Sistema Eléctrico Nacional, definido en el artículo 212-1 de la Ley General de Servicios Eléctricos.
EDAC	Esquema de Desprendimiento Automático de Carga
EDAG	Esquema de Desprendimiento Automático de Generación
ERAG	Esquema de Reducción Automática de Generación
FAT	Ensayos de aceptación en fábrica o ensayos en laboratorios.

Fiabilidad	Atributo de la confiabilidad relacionado con el grado de certeza de que un relé o automatismo operará o actuará de forma correcta en cada oportunidad en que le corresponda hacerlo, de acuerdo con su diseño [1]
HIL	*Hardware in the Loop*. Las pruebas HIL se realizan en un simulador de tiempo real e implican conectar dispositivos de control o protecciones a la red simulada en lazo cerrado.
Horizonte de evaluación	Período en el cual se espera que el Automatismo se encontrará en operación y en el que los supuestos considerados para el diseño y operación de este son válidos.
Ley	Ley Núm. 20.936 que establece un nuevo sistema de transmisión y crea un organismo Coordinador Independiente del Sistema Eléctrico Nacional
NT SyCS	Norma Técnica de Seguridad y Calidad de Servicio
PDCE	Plan de Defensa contra Contingencias Extremas
Redundancia	Existencia de más de una forma para realizar una función determinada [1]
SAT	Ensayos de aceptación en sitio
Seguridad	Atributo de la confiabilidad relacionado con el grado de certeza de que un relé o automatismo no operará cuando no le corresponda hacerlo, de acuerdo con su diseño. Cabe destacar que la ciberseguridad es un tema que se trata por separado, relacionado con el acceso electrónico [1]
SEN	Sistema Eléctrico Nacional

2.3 Vigencia del documento

El presente Procedimiento Interno entrará en vigencia a partir de la fecha de su publicación.

2.4 Criterios para la evaluación de factibilidad de implementación del automatismo en el SEN

El Coordinado proponente deberá contar con la aprobación del Coordinador para la implementación del Automatismo. Para esto, se verificará el impacto que tendrá su implementación en los siguientes aspectos:

- Existencia fehaciente de beneficio económico sistémico: se debe demostrar que el efecto de la implementación del automatismo implica un beneficio económico sistémico neto mayor a la condición sin proyecto.
- Efectos de las acciones de control del automatismo:
    - No interfiere con la efectividad de actuación de otros automatismos habilitados en el sistema eléctrico.
    - No implica el cambio de diseño del PDCE.

- No produce una pérdida de generación que active algún escalón del EDAC por baja frecuencia,
- No produce un desprendimiento de carga igual o superior al utilizado en la determinación de la reserva permanente para el control primario de frecuencia por sobrefrecuencia.

Además, como antecedente para la aprobación de la implementación de un Automatismo para el control de transferencias, el Coordinado deberá demostrar que estos tendrán un "impacto acotado" sin propagarse al resto del sistema, es decir, ante omisiones o falla de su actuación (por falla en su fiabilidad por omisión de disparos, fallas en sistema de comuniciones u operación de relés) u operaciones indeseadas (disparos indeseados o espurios, por falla en su seguridad), entre otros, se deberán comprobar las siguientes condiciones:

- El monto de carga total que se desconecte, ya sea por actuación del EDAC-BF o por otra causa atribuible al automatismo, no deberá superar el máximo entre la carga del primer escalón de frecuencia absoluta y la carga correspondiente al monto utilizado en la determinación de la reserva permanente para el control primario de frecuencia por sobrefrecuencia del SEN; y
- La respuesta del sistema cumpla con los estándares de seguridad y calidad de servicio en Estado de Alerta.

El Coordinado proponente deberá obtener la autorización del Coordinador para la implementación del Automatismo en forma previa a la realización del diseño de ingeniería y la ingeniería de detalle, no obstante, deberá adjuntar, al menos, una ingeniería básica (con los elementos mínimos que permitan comprender cómo actuará el Automatismo, qué recursos de control de transferencias utilizará, filosofía de actuación básica, criterios de actuación general y elementos del sistema que monitoreará para su operación) como complemento a los estudios de impacto para la evaluación de su factibilidad de implementación. Sin perjuicio de lo anterior, la aprobación y puesta en servicio del automatismo estará condicionada al término exitoso de las pruebas FAT y a la realización satisfactoria de las correcciones requeridas por el Coordinador.

Cabe señalar que el Coordinador participará activamente en todas las etapas del proyecto, indicando entre otros aspectos, los requerimientos a cada etapa del proyecto, en particular, los escenarios a mínimos a evaluar.

2.5 Determinación de la conveniencia económica del Automatismo

Para efectos de determinar la conveniencia económica de la implementación y operación del automatismo se debe considerar, por lo menos, una metodología que tome en cuenta dentro del beneficio esperado los siguientes elementos:

$$E(\text{Beneficio Económico}) = E(\Delta\text{Costo de Operación}) - (\text{INV} + \text{COYM} + E(\text{CENS}))$$

Donde,

$E(X)$: representa al valor esperado de la variable X.

ΔCosto de Operación: Valor presente de la diferencia entre el costo de operación del sistema eléctrico considerando el Automatismo en servicio y el costo de operación del sistema eléctrico sin el Automatismo, durante el período en que se prevé que se encuentre operativo.

INV: Valor presente del Costo total de inversión en el Automatismo.

COYM: Valor presente de los costos de operación y mantenimiento del Automatismo durante el período en que se prevé que se encuentre operativo.

CENS: Valor presente del costo de la energía no suministrada en los escenarios en que la operación del Automatismo, su operación errónea o la omisión de su operación produzca una pérdida de consumos.

La metodología debe considerar el beneficio actualizado durante el periodo de operación del automatismo.

Para efectos de la evaluación económica deberá considerar la tasa de descuento a la que se hace referencia en los artículos 118° y 119° de la Ley General de Servicios Eléctricos (DFL N°4 de 2006, del Ministerio de Economía, Fomento y Reconstrucción).

Finalmente, para efectos de demostrar la conveniencia del Automatismo y evitar su implementación mediante soluciones innecesariamente complejas, el Coordinador podrá solicitar evaluar soluciones factibles para llevar a cabo su proyecto y demostrar que la solución elegida es la que presenta el mayor beneficio neto para el sistema.

3 Filosofía de control de los Automatismos

El objetivo de los Automatismos a los que se refiere este Procedimiento es permitir transitoriamente la operación de instalaciones de transmisión con transferencias de potencia por sobre su capacidad con criterio N – 1, utilizado normalmente para la operación del SEN, de manera de aprovechar parte de la capacidad total (N) en condiciones normales de operación y, ante la contingencia y desconexión de otro elemento del sistema de transmisión o generación, efectuar acciones de control para mantener las transferencias de las instalaciones que continúan en servicio dentro de su capacidad, sin sobrepasar los límites estáticos y dinámicos de los elementos serie que conforman el sistema de transmisión e impedir la actuación de otros sistemas de protección y la desconexión en cascada de otros elementos del sistema. Además, su desempeño debe considerar acciones de control correctas ante contingencias que ocurran fuera de la zona que está bajo su supervisión y control o fuera de su alcance de diseño.

Los Automatismos deben estar concebidos para que:

- Luego de ocurrida una contingencia cuyos efectos impacten a las transferencias en su zona de control, utilicen recursos para el control de transferencias para mantenerlas dentro de límites preestablecidos.
- En lo posible, y en condiciones normales de operación, controlen las transferencias evitando llegar a niveles no permitidos, adaptándose a la capacidad disponible en tiempo real de las instalaciones bajo control.

Dentro de los recursos utilizados para el control de transferencia post contingencia se destacan, entre otros:

- EDAG,
- ERAG,
- EDAC y
- Cambios topológicos.

En relación con la seguridad del sistema, se debe considerar que las acciones de control del Automatismo:

- No interactúen con las acciones de control de otros Automatismos o sistemas de protección y control, y
- No profundicen los efectos de una Contingencia Extrema.

Además, ante una falla o incorrecta operación de algún elemento del Automatismo, o una omisión de su actuación, se debe asegurar que [5]:

a. El Sistema de Potencia debe permanecer estable,
b. No se debe propagar al resto del sistema u ocurrir una operación en cascada de otros elementos fuera del área de control del automatismo o que signifiquen un impacto mayor al establecido en el punto 2.4 de este Procedimiento,
c. No se deben exceder los límites de las instalaciones (de sobrecarga) de elementos fuera del área de control del automatismo o que signifiquen un impacto mayor al establecido en el punto 2.4 de este Procedimiento, y
d. Las tensiones del Sistema de Potencia deben permanecer dentro de los límites post contingencia establecidos en la NT SyCS para Estado de Alerta.
e. Los costos que imponga al sistema eléctrico en su conjunto una operación incorrecta u omisión de la actuación del automatismo serán de cargo del Coordinado proponente, sean estos de generación, transmisión y/o asociados a la demanda, en conformidad con las disposiciones normativas aplicables.

Cabe señalar que, en caso de falla u operaciones indeseadas del automatismo, éste quedará fuera de servicio hasta que no se aclaren las causas de la mala operación y que se hayan implementado las mejoras correspondientes, sin perjuicio del envío del Informe de Falla de acuerdo con las disposiciones contenidas en la NT SyCS.

También, deben considerarse las condiciones de armado del Automatismo, basado en las condiciones operacionales sistémicas, cuyos alcances se indican en el punto 3.1 siguiente.

3.1 Consideraciones para el armado del Automatismo

El armado corresponde al estado en el cual el automatismo se encuentra en condiciones de actuar, dada sus características particulares de diseño. El armado del Automatismo permite llevar a cabo acciones específicas de control en condiciones normales de operación y mitigación ante la ocurrencia de contingencias durante una condición de operación determinada. Se puede requerir una función de armado si no se requieren permanentemente acciones de control y mitigación del Automatismo, o se requieren otras acciones de control para rangos de operación diferentes.

El armado puede ser una regla simple basada en el grado de carga de una determinada instalación, o puede ser el resultado de un cálculo más complejo como, por ejemplo, un nomograma, que combine el grado de carga de una instalación y la disponibilidad o indisponibilidad de otra instalación en una zona determinada. Además, el Automatismo puede requerir ser armado para tomar diferentes acciones en diferentes condiciones de operación.

Los datos requeridos para determinar el estado del armado a menudo se encuentran disponibles para el sistema SCADA y también para el Automatismo, por lo que es común que sistemas SCADA y EMS puedan ser utilizados para realizar los cálculos de armado.

El Automatismo puede ser armado automáticamente como una función interna o mediante un sistema SCADA o EMS. De forma alternativa, el EMS podría entregar información de recomendaciones de armado a los operadores que podrían tomar acciones manuales para el armado del Automatismo. De esta forma, el Automatismo podría permitir hasta su habilitación o inhabilitación manual en ubicaciones específicas.

4 Consideraciones para la implementación del Automatismo [4]

4.1 Ciclo de vida del Automatismo

En la Figura 4.1 se muestra un diagrama de bloques con el ciclo de vida típico de un Automatismo. Es importante destacar que el Coordinado interesado que propone su implementación deberá reportar los resultados de cada etapa al Coordinador con la finalidad de evaluar el desarrollo del proyecto, tanto en forma como en tiempo.

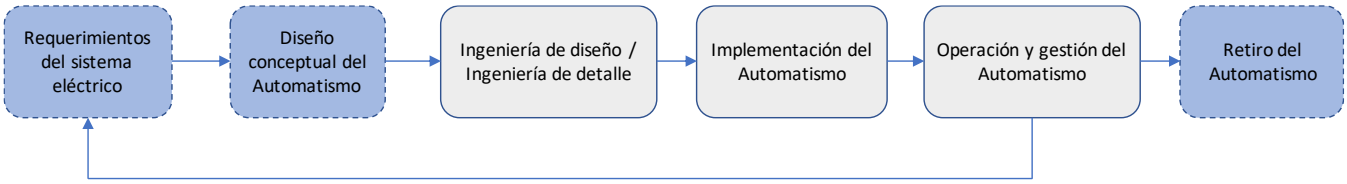

Figura 4.1 Ciclo de vida típico de un Automatismo

Un Automatismo es implementado para cumplir con necesidades específicas, tanto para operar en condiciones normales como ante condiciones de contingencia. Cuando aparecen dichas necesidades, un estudio de diseño debe identificar los problemas a resolver, seleccionar entre múltiples opciones los tipos de acciones de control y mitigación que tomará el Automatismo, y definir cualquier requerimiento funcional o de desempeño, todo lo anterior en el entendido que ha cumplido con los criterios de admisibilidad descritos en el punto 2.4. El estudio de diseño es seguido por el diseño de ingeniería o ingeniería de detalle y pruebas FAT, para finalizar con el proceso de implementación y pruebas SAT. Una vez puesto en servicio y habilitado, se requiere una adecuada operación y mantenimiento hasta que el Automatismo, por necesidades propias del sistema, sea retirado o inhabilitado de forma permanente. Es responsabilidad del Coordinado definir los métodos y procedimientos de manera que permitan asegurar el correcto funcionamiento del Automatismo.

Cada etapa del ciclo de vida del Automatismo tiene múltiples actividades. A continuación, se presenta una visión general de las principales actividades en cada etapa. Las actividades que se realizan en la etapa de diseño conceptual también determinan los requerimientos en la etapa de ingeniería del Automatismo. Así, los requerimientos y productos de cada etapa se muestran en las siguientes figuras como paralelogramos y las actividades como rectángulos.

La Figura 4.2 muestra las principales actividades que se deben contemplar en la etapa de diseño conceptual, los requerimientos (entradas) y sus productos (salidas). El proceso de diseño conceptual implica, previa definición de un horizonte de evaluación, realizar un análisis de contingencias, cortocircuitos, estabilidad dinámica y estudios de coordinación de protecciones para determinar las opciones de mitigación que se usarán, la selección de las acciones que realizará el Automatismo, la estrategia general de control y la identificación de los requerimientos asociados al desempeño del sistema. En este sentido, el Coordinador establecerá los escenarios mínimos y contingencias a evaluar, así también los sistemas de protecciones y automatismos que será necesario considerar para evaluar la coordinación de su actuación.

El horizonte de evaluación deberá considerar fechas de entrada en operación de nuevas obras que liberen la restricción, u otros hitos relevantes que puedan modificar el desempeño del automatismo, como entrada de

nuevos generadores o consumos, u otros hitos que modifiquen los supuestos con que fue diseñado el Automatismo.

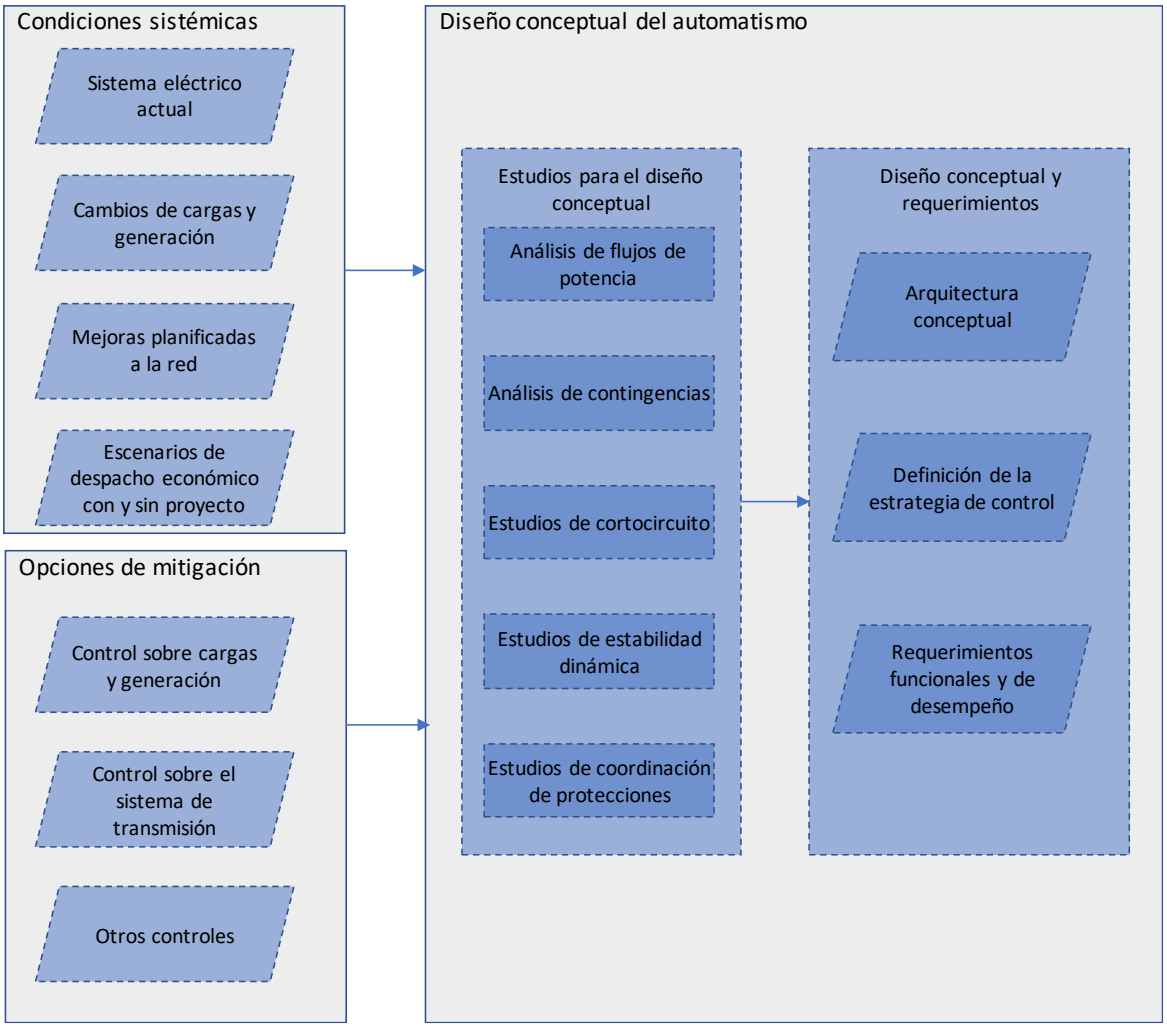

Figura 4.2 Diagrama de procesos para el diseño de la ingeniería y consideraciones para el Automatismo.

Los estudios deben incluir las condiciones actuales del sistema, así como también las condiciones previstas para el horizonte de evaluación (nuevas instalaciones de transmisión, generación y demanda, entre otras) y la consideración de las opciones disponibles de mitigación, como ERAG, EDAG, EDAC, control del sistema de transmisión u otro tipo de acción de control. El diseño conceptual también debe incluir un análisis de la arquitectura del Automatismo, de tal forma que permita intervenir, adaptar, mejorar y mantener el Automatismo sin tener que inhabilitarlo para realizar dichas tareas.

Dentro de las contingencias que, al menos, deben ser analizadas en el proceso de diseño del Automatismo se incluyen aquellas que implican la operación del Automatismo y otras que puedan provocar impactos similares en el sistema eléctrico pero que requieran la acción de control de otros Automatismos o de otras protecciones. Esto con el objetivo de verificar que no se produzcan interacciones o una superposición de actuaciones entre ellos.

Esta etapa debe dar como resultado, al menos, el diseño conceptual y funcional del automatismo, variables y parámetros de entrada, sus lógicas de actuación y los tiempos máximos admisibles de operación.

La Figura 4.3 muestra las principales actividades de la etapa del diseño de ingeniería del Automatismo. Toma las salidas de la etapa del diseño conceptual y se genera la documentación del diseño de ingeniería o ingeniería de detalle como el producto que será usado en la etapa de implementación del Automatismo. Adicionalmente a la salida desde la etapa del diseño conceptual, el diseño de ingeniería debe, además, tomar en consideración ciertas restricciones tales como cumplimientos normativos, disponibilidad de equipamientos, filosofía operacional y plazos de ejecución, junto con el análisis de una arquitectura que permita alcanzar los niveles de confiabilidad requeridos y el levantamiento de la información obtenida en terreno y de los planos originales de las instalaciones donde se ubicarán los componentes del Automatismo. El proceso del diseño de ingeniería o ingeniería de detalle toma el diseño conceptual del Automatismo y lo transforma en el diseño detallado del sistema para su posterior implementación.

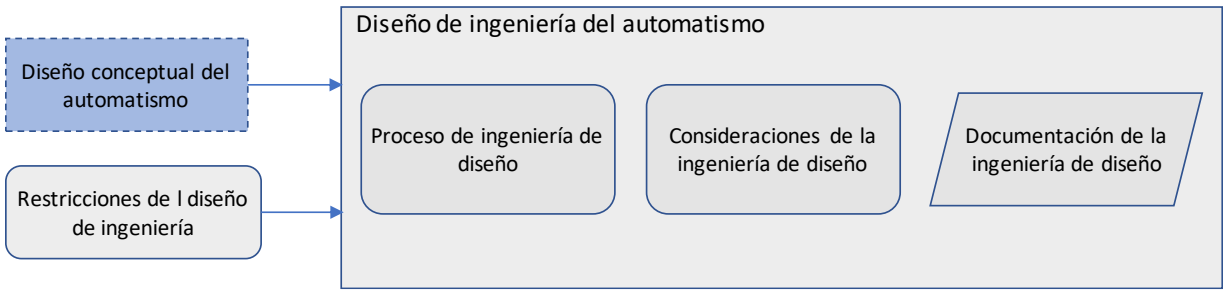

Figura 4.3 Diseño de ingeniería del Automatismo

El proceso involucra una interacción inicial entre los encargados de diseño conceptual y los encargados del diseño de ingeniería que les permita entender a estos últimos los requerimientos del Automatismo, la selección inicial de la ubicación de los principales componentes funcionales y las especificaciones de los canales y redes de comunicaciones.

Las principales actividades del diseño incluyen, entre otros:

- La selección de la arquitectura de la solución,
- diseño lógico detallado,
- condiciones operacionales de control y armado del automatismo,
- definición de variables y parámetros analógicos y digitales, cómo (de qué forma) y de dónde obtenerlos (su fuente),
- condiciones sistémicas y topológicas para las cuales el Automatismo debe readecuarse o inhabilitarse,
- el diseño de la interfaz hombre máquina (HMI),
- diseño de la red de comunicaciones, y
- diseño de interfaces.

Estos diseños son afectados por consideraciones como: el nivel al cual el Automatismo requerirá interactuar con los operadores, coordinación con otras protecciones y montos de los recursos de control para tamaños determinados de perturbaciones. El diseño completo debe ser evaluado para asegurar los requerimientos de disponibilidad, realización de pruebas y mantenimiento.

La Figura 4.4 muestra las principales actividades de la etapa de implementación del Automatismo. Toma la salida de la etapa de diseño de ingeniería o ingeniería de detalle y se produce la documentación del Automatismo implementado la cual será utilizada en la etapa de operación y mantenimiento.

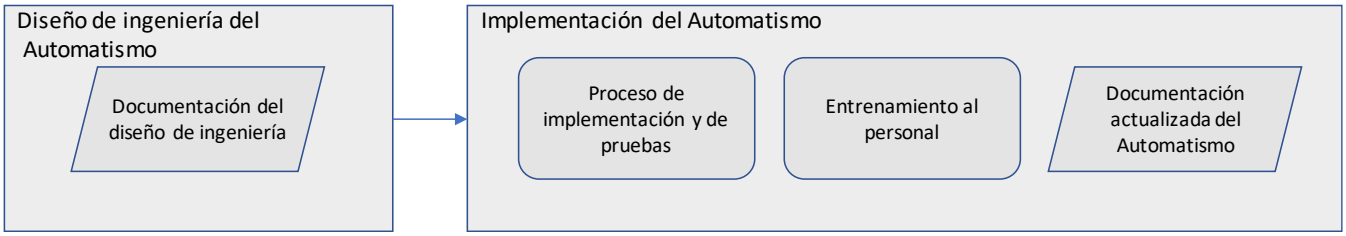

Figura 4.4 Implementación del Automatismo.

Generalmente, la implementación de un Automatismo supone la programación y configuración de unidades de procesamiento, las cuales pueden incluir el desarrollo de programación de software. El Automatismo requerirá de la realización de pruebas de aceptación en fábrica (FAT) antes de su instalación en campo. La realización de pruebas FAT se deberá llevar a cabo mediante plataformas de laboratorios de simulación de tiempo real, tipo RTDS u Opal-RT, que posean las características necesarias para pruebas del tipo HIL que simulen escenarios operacionales en que realizará el control en condiciones normales, las contingencias críticas que el Automatismo está diseñado para mitigar y otras contingencias menos severas que permitan verificar que el Automatismo no actuará en los casos que efectivamente no está diseñado para actuar. Tanto los protocolos de prueba FAT previos a su realización, como el informe de pruebas FAT realizadas, incluyendo las pruebas en un simulador en tiempo real, deberán ser enviados al Coordinador quien deberá aprobarlos previo a la implementación del automatismo en terreno.

Una vez se complete la instalación en campo, se deberán realizar las pruebas de aceptación en sitio (SAT) del sistema. Cabe destacar que los protocolos de prueba SAT previos a su realización, como el informe de pruebas SAT realizadas deberán ser enviados al Coordinador para evaluar su aprobación, previo al inicio de la marcha blanca del Automatismo.

El plazo de revisión de toda documentación asociada a las pruebas FAT y SAT será de 20 días hábiles cada una.

Una vez aprobadas las pruebas SAT por parte del Coordinador, el Automatismo será habilitado para pruebas de disponibilidad y confiabilidad, en primera instancia sin la activación de las órdenes de *trip* o de control, de modo de pasar por un periodo de prueba o marcha blanca de, al menos, 2 semanas, donde se evalúe el correcto monitoreo de variables desde el SEN y el correcto cálculo de las lógicas implementadas. En caso de que se identifiquen problemas durante este periodo, se deberán realizar los cambios y correcciones necesarias y se reiniciará la marcha blanca cada vez que se reajuste el sistema. Una vez finalizadas exitosamente estas pruebas,

el Coordinador podrá autorizar la habilitación final del Automatismo. La aprobación de la marcha blanca será mediante un informe elaborado por el Coordinado donde se demuestre el correcto funcionamiento del algoritmo de control y de la supervisión de las señales SITR.

Antes de la puesta en servicio y habilitación del Automatismo se deberá realizar entrenamientos específicos, adecuados tanto a los usuarios finales que lo operarán como a quienes proveerán el soporte a dicho Automatismo, además de generar y difundir la documentación correspondiente a manuales de usuarios, administradores, operadores, Coordinados, Coordinación con el CDC y cualquier otra que el Coordinado considere necesaria para esta etapa.

La Figura 4.5 muestra las principales actividades de la etapa de operación del Automatismo. En esta etapa se utiliza la documentación final proveniente de la etapa de implementación, la cual debe mantenerse actualizada cuando se realicen cambios al Automatismo. Esta documentación puede incluir una descripción general del esquema, principales requerimientos, diagramas lógicos, ajustes y resultados de las pruebas de implementación. La operación del Automatismo incluye varios aspectos de la filosofía general de operación:

- Operación y gestión del Automatismo,
- Cambio en la gestión del mantenimiento: gestionar cambios de hardware y software y el mantenimiento periódico y pruebas del Automatismo,
- Evaluación operacional en servicio: se deben realizar análisis de las condiciones de operación del sistema de potencia para ayudar a asegurar que la operación del Automatismo en condiciones en que diversos elementos del sistema eléctrico se encuentren fuera de servicio, ya sea por mantenimiento programado como por contingencias, sea adecuada y, además, verificar que el desempeño del Automatismo es el esperado. En este sentido, es responsabilidad del Coordinado evaluar las condiciones de operación especiales donde varios elementos del sistema eléctrico se encuentren fuera de servicio, debiendo alertar y comunicar oportunamente al Coordinador cualquier problema que imponga dicha condición en la correcta actuación del automatismo. Lo anterior, sin perjuicio de los análisis propios que realice el Coordinador para toda condición especial de operación que se presente en el SEN.
- Evaluación de planificación periódica: verificar permanentemente si es que hay cambios en el sistema de potencia que impliquen cambios en el Automatismo, su rediseño o su retiro.
- Procedimientos especiales, como la rehabilitación del Automatismo luego de una contingencia, o inhabilitación para condiciones operacionales especiales.

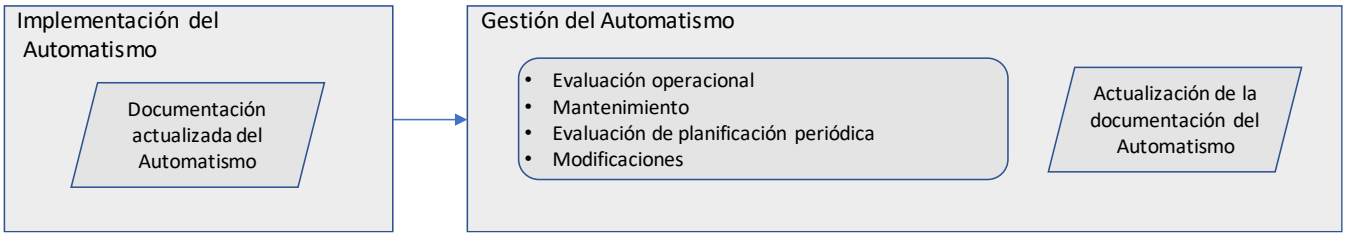

Figura 4.5 Gestión del Automatismo.

4.2 Diseño seguro y confiable del Automatismo

En los próximos puntos se describen las medidas para gestionar la confiabilidad del Automatismo. Cabe destacar que previo a la definición del diseño seguro y confiable de este, se debe verificar que el diseño lógico del Automatismo permite cumplir a cabalidad sus objetivos y, además, se han identificado las condiciones operacionales y contingencias que puedan generar acciones de control del Automatismo en situaciones en las que no se requiera, o, por el contrario, la lógica del Automatismo no permita reconocer condiciones en las que deba actuar.

4.2.1 Confiabilidad del diseño

El propósito del Automatismo es detectar condiciones específicas en el sistema de potencia y tomar acciones de control que mitigarán sobrecargas o la excursión de variables que serían inaceptables, si no son corregidas. Además, en caso de tomar acciones de control incorrectas, el impacto podría ser significativo, sobre todo considerando que estará tomando acciones de control en condiciones para el cual el sistema de transmisión no ha sido planificado ni diseñado, como en los casos que se permita sobrepasar el criterio N-1 estricto en transmisión.

La fiabilidad es la componente de la confiabilidad que cuantifica la certeza que tiene un determinado dispositivo de operar adecuadamente cuando se requiera. La seguridad es la componente de la confiabilidad que cuantifica la certeza de que un determinado dispositivo no operará cuando no le corresponda hacerlo, de acuerdo con su diseño (disparo erróneo o espurio). De acuerdo con lo documentado en la experiencia internacional, los diseños que se enfocan en mejorar la fiabilidad a menudo afectarán de forma adversa la seguridad. Por otra parte, los diseños que se enfocan en la seguridad pueden sacrificar la fiabilidad. La confiabilidad es el resultado de la combinación entre la seguridad y la fiabilidad. Así, es necesario equilibrar ambos requerimientos, ponderando los efectos adversos derivados de ambos atributos de modo de satisfacer el nivel deseado de confiabilidad.

La intención específica del Automatismo es que sea posible cumplir con el objetivo global, manteniendo sus funcionalidades, incluso ante la falla de alguno de sus elementos, particularmente en aquellos que son comunes o son parte de funciones en conjunto con otros componentes.

4.2.2 Conceptos básicos para el diseño de ingeniería de confiabilidad del Automatismo

La principal medida utilizada para alcanzar los niveles de fiabilidad adecuados en los Automatismos es disminuir el número de fallas que puedan ocurrir. Un enfoque efectivo es mediante la reducción del número de componentes de hardware utilizando diseños de esquemas simples, y reduciendo el número de fallas iniciales siguiendo técnicas de control de calidad que disminuyan el potencial de fallas de equipamiento debido a problemas de manufactura.

Dentro de las medidas adoptadas para obtener mejoras en la confiabilidad del Automatismo se encuentran, entre otras:

- Bloqueo de operaciones innecesarias en el momento que ocurra una falla,
- Redundancia en serie,
- Inclusión de una función automática de supervisión,
- Redundancia en paralelo, y
- Esquemas de votación.

Por otra parte, entre las medidas para mejorar la fiabilidad del Automatismo están, entre otras:

- Supervisión automática y
- Redundancia en paralelo.

En las medidas para mejorar la seguridad del Automatismo se incluye, entre otras:

- Bloqueo de operación luego de ocurrida una falla y
- Redundancia serie.

Cabe destacar que los esquemas de votación pueden mejorar la fiabilidad y seguridad al mismo tiempo. La confiabilidad general de un Automatismo puede ser mejorada combinando apropiadamente estas medidas, como por ejemplo esquemas serie/paralelo o esquemas de votación.

La Figura 4.6 ilustra el efecto de adoptar estos tipos de medidas con el objetivo de reducir operaciones incorrectas. Aparte de los enfoques mostrados, es necesario y útil realizar un análisis de confiabilidad del Automatismo (incluyendo el sistema de comunicaciones asociado), estableciendo la importancia relativa (análisis de sensibilidad) de cada elemento para documentar el objetivo de la confiabilidad requerida.

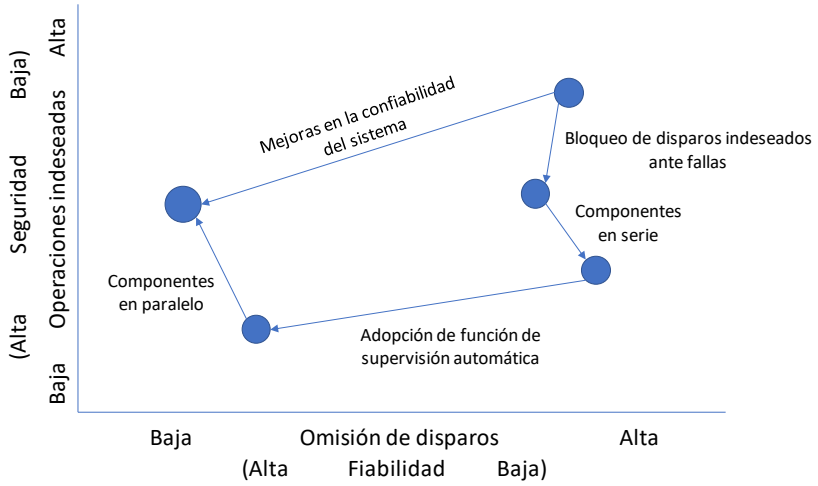

Figura 4.6 Impacto de las medidas tomadas para mejorar la confiabilidad.

4.2.3 Bloqueo de operaciones innecesarias durante una falla de hardware

Cuando la supervisión automática detecte un defecto o falla que pueda causar un mal funcionamiento del sistema, la salida final debe ser bloqueada, como se muestra en la Figura 4.7. Se debe ejecutar un bloqueo de salida mediante software y hardware. El bloqueo mediante software es una medida para prevenir operaciones innecesarias sin bloquear la salida final, por ejemplo, el bloqueo por un error de comunicaciones que pueda ocurrir de forma temporal, cuando la funcionalidad se restablece sin intervención humana. En este caso, el bloqueo automático se cancela cuando ese estado erróneo vuelve a normal.

Un bloqueo mediante hardware puede ser utilizado para controlar la salida final del circuito, como un circuito de salida de *trip* a través de un relé de guardia. Por ejemplo, un bloqueo mediante hardware puede utilizarse cuando la función de supervisión (*watchdog*) detecta una instrucción *halt* en la unidad central de procesamiento (CPU) o una condición anormal del suministro de energía. Los factores que causan un error pueden mantenerse luego de que el estado del error haya vuelto a la normalidad. Por lo tanto, puede ser necesario extender el periodo por el cual el comando de salida del sistema es bloqueado en caso de que el sistema sea restaurado automáticamente, o introducir un mecanismo por el cual se quite el bloqueo mediante una intervención manual autorizada.

Cuando el sistema automático detecte una falla, es difícil para el sistema determinar si el resultado será una operación innecesaria o una omisión de disparo. Para estos casos se selecciona una medida adecuada de acuerdo con la posibilidad de alcanzar las condiciones críticas del sistema que el Automatismo está diseñado para mitigar y del grado de su influencia o impacto ante una operación innecesaria del Automatismo. El impacto máximo producido por una operación innecesaria del Automatismo como de la no operación en aquellos casos que deba operar deberá estar acotado a lo indicado en el punto 2.4 de este Procedimiento.

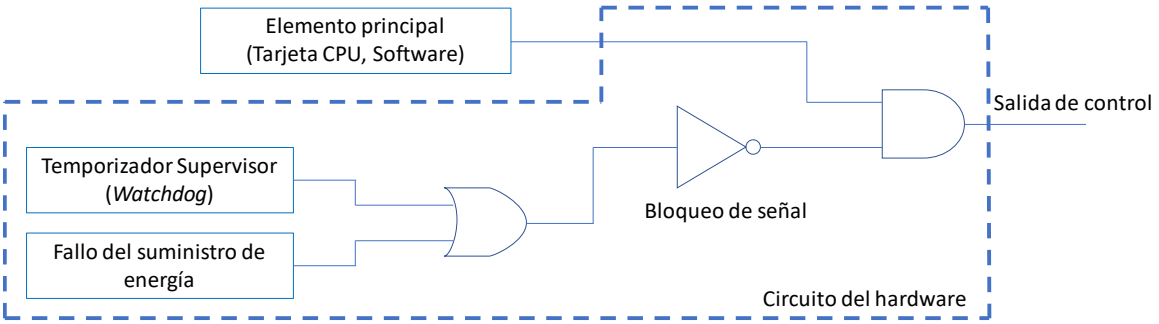

Figura 4.7 Ejemplo de bloqueo de salida final para mejorar la seguridad.

4.2.4 Componentes en serie

Aunque los componentes del Automatismo fuesen altamente confiables, estos, de todas maneras, podrían fallar. El sistema podría operar de forma innecesaria luego de una falla dentro del circuito de un transformador de medida o una entrada digital.

A menudo, los componentes en serie son utilizados para mejorar la seguridad previniendo operaciones innecesarias. Por ejemplo, la detección de una contingencia puede ser controlada por la operación de un elemento principal de detección de la contingencia y un elemento de verificación independiente. El elemento principal detectará una condición objetivo, por ejemplo, el estado de una línea crítica; el elemento de verificación es diferente del elemento principal, en términos de hardware o su estructura funcional, como el uso de una cantidad análoga. El resultado final deberá ser alcanzado por el uso de una combinación física o lógica de ambos elementos de verificación. Esto se muestra en el diagrama de la Figura 4.8.

Los sistemas con componentes series comparados con aquellos con sistemas individuales pueden disminuir la tasa de operaciones innecesarias (mejoran la seguridad), pero incrementan la probabilidad de fallas de operación (reducen la fiabilidad).

Figura 4.8 Ejemplo de uso de elementos principal y de verificación para mejorar la seguridad.

El propósito de usar elementos de verificación es incrementar la seguridad del elemento principal. La verificación ayuda a evitar acciones innecesarias a través de asegurar que no son detectadas falsas contingencias u otros eventos críticos, tales como podría resultar de fallas de interruptores auxiliares u otros dispositivos y, de este modo, incrementar la confiabilidad del Automatismo.

Los elementos de verificación que pueden utilizarse para asegurar la detección de la contingencia son, a menudo, cantidades análogas como:

- Tensiones
- Cambios en las potencias (ΔP),
- Cambios en las tensiones (ΔV),
- Sobre frecuencia, baja frecuencia, sobre corriente, baja corriente
- Tasas de cambio de las variables (dP/dt, df/dt)

Idealmente, se requiere la separación completa del hardware de los elementos de detección principales y de verificación, sin embargo, requiere de un esfuerzo adicional en su diseño. Los elementos de detección de contingencias principal y de verificación frecuentemente son monitoreados en la misma ubicación física y lógica, combinados antes de ser comunicados a un controlador a través de la red de comunicaciones para continuar con el procesamiento lógico. De forma alternativa, la detección y verificación puede realizarse en ubicaciones diferentes y ser combinados lógicamente después de sus respectivas comunicaciones al controlador. Independientemente de si la lógica es combinada localmente o de forma remota, un elemento de verificación asegura la detección de la contingencia que realiza la función crítica para iniciar el control del Automatismo.

4.2.5 Supervisión automática

Si un Automatismo con falla(s) en sus componentes internas se mantiene operativo y en servicio, puede llevar a una falla de operación o una operación incorrecta. Es posible utilizar funciones de supervisión automática para mejorar la confiabilidad y, así, la confiabilidad operacional del Automatismo mediante la detección y determinación de muchos tipos de malfuncionamiento. Esta es la gran ventaja de utilizar tecnología digital.

La supervisión automática puede ser a través del monitoreo continuo o verificación automática. El monitoreo continuo es una función utilizada para detectar la suspensión completa o la operación anormal de la función del Automatismo, o la degradación de alguna de sus funciones, incluyendo su precisión, mientras el automatismo indique que se encuentre en estado normal. Una función de monitoreo continuo verifica cada bloque del hardware que constituye el sistema incluyendo los dispositivos de entrada/salida, entradas análogas provenientes del sistema de potencia, niveles de tensión del suministro de energía y comunicaciones, entre otros. Por lo tanto, es posible detectar muchos fallos que son propensos a ocurrir en el sistema. Por el contrario, la verificación automática es una función usada para verificar elementos para casos en los cuales el monitoreo continuo no lo puede realizar con la suficiente profundidad, por ejemplo, circuitos de entrada y salida análogos. El sistema es capaz de enviar señales de prueba a las entradas o salidas del esquema para confirmar la integridad del circuito. Durante estas pruebas se inhibe la función principal del sistema mediante el bloqueo de la salida final.

Cuando se detecta un defecto por el sistema de supervisión automático, el Automatismo envía una señal de alarma y bloquea la salida final.

4.2.6 Componentes en paralelo

Se utilizarán componentes en paralelo o duplicación de los sistemas para evitar omisiones de disparo, mejorando la fiabilidad. Es una función lógica "O" que produce la instrucción de control cuando cualquiera de los dos sistemas opera, como se muestra en la Figura 4.9. Este concepto es común en la aplicación de relés de protección, donde dos o más relés independientes y de forma separada entregan detección, lógicas y control para aislar equipamiento debido a una falla, también en las señales provenientes de los transformadores de medidas y las bobinas de disparo de los interruptores. Los elementos en paralelo, comparado con componentes individuales, pueden disminuir la tasa de omisiones de disparo, pero incrementan la tasa de operaciones innecesarias, o disparos erróneos. El Coordinado deberá diseñar el Automatismo para el cumplimiento de las tasas de omisiones de disparo y de operaciones innecesarias que serán definidas durante el diseño del Automatismo para dar cumplimiento con los requerimientos de este Procedimiento.

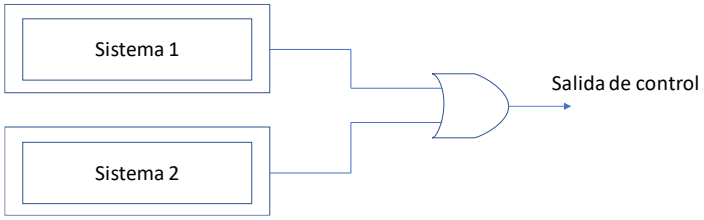

Figura 4.9 Ejemplo de componentes en paralelo (arquitectura de sistemas en paralelo) para mejorar la fiabilidad.

Los componentes paralelos pueden ser utilizados para la duplicación de rutas de entrega (conexiones cableadas u otra forma de comunicaciones) entre dispositivos, como se muestra en la Figura 4.10, como también para la duplicación de sistemas completos. En el Automatismo, la arquitectura requiere que este sea capaz de funcionar normalmente incluso luego de la falla de un componente. Para estos niveles de fiabilidad generalmente se requiere de altos niveles de duplicación y de componentes en paralelo.

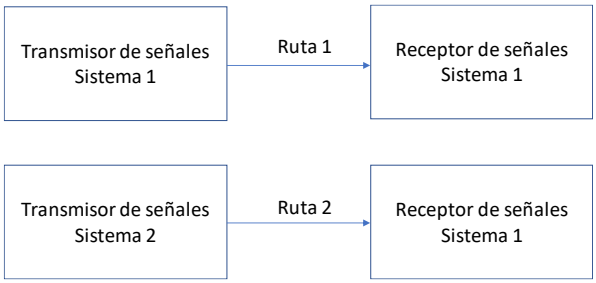

Figura 4.10 Ejemplo de rutas de señal de comunicación de sistemas redundantes en paralelo.

4.2.7 Balance entre seguridad y fiabilidad

Como se ilustra en la Figura 4.6, la aplicación de un tipo de medida para la redundancia puede mejorar un aspecto de la confiabilidad del Automatismo. Mejorar tanto la seguridad como fiabilidad de un Automatismo requerirá el uso de una combinación de medidas de redundancia indicadas anteriormente.

La arquitectura para la redundancia del sistema se seleccionará de acuerdo con la criticidad del Automatismo para los requerimientos de sistema de potencia, consecuencias de sus fallas, costo de los sistemas, el diseño de concepto del sistema, entre otros. Por ejemplo, en el diseño conceptual del sistema, considerar qué principio debería tener prioridad, la operación (tolerancia a operaciones innecesarias) o el bloqueo (tolerancias a omisiones de disparo), de acuerdo con cuál resulte en un desempeño adecuado del sistema de potencia, seguido de una operación innecesaria o de omisión de disparo.

Cuando las consecuencias tanto de una operación innecesaria como una falla de operación no son aceptables, es posible que se requieran bloqueos durante falla (de los componentes del Automatismo), supervisión automática, componentes en serie y paralelos, como se muestra en la Figura 4.11.

Los Automatismos más complejos típicamente incluirán entradas similares a las mostradas a la derecha de la Figura 4.11, a pesar de que cada Automatismo puede tener diferentes requerimientos de datos específicos. La seguridad en la función de detección puede mejorarse mediante el uso de métodos de detección local (es común utilizar el estado de interruptores y corrientes de línea) en configuración serie ("Y" lógico). La seguridad de la detección de la contingencia puede ser verificada posteriormente si los cálculos operacionales del sistema combinan de forma apropiada medidas remotas, como corrientes de línea (o cambios en las corrientes de línea, otras combinaciones serie o "Y" lógicos), desde el otro extremo de la línea.

Para mejorar la fiabilidad es común duplicar la función de cálculo operacional (combinación en paralelo). Los datos desde ubicaciones remotas son llevados a cada uno de los sistemas de cálculo operacional donde se realizan los procedimientos lógicos, uno de los cuales debiera ser la detección de contingencia "Y" la verificación, como se detalla en la Figura 4.11.

También es posible utilizar un esquema de votación 2 de 3 (o similar) para mejorar seguridad y fiabilidad, al menos, al nivel de esquema de cálculo operacional. Existe hardware disponible para proveer el esquema de votación 2 de 3 en un solo dispositivo, el cual, a menudo, se utiliza de forma redundante, como también el sistema de cálculo operacional. Las entradas y salidas del Automatismo permanecen duplicadas, mientras el sistema de cálculo operacional está separado en un esquema de votación 2 de 3. Además, se debe tener en consideración el comportamiento que tendrá el sistema en aquellos casos en que uno de los componentes del esquema de votación 2 de 3 se encuentre indisponible.

Cuando se duplican los sistemas de cálculo operacional, es importante prevenir el exceso de acciones de control causadas por cualquier diferencia de los resultados de ambos controladores. Cuando el sistema de potencia está operando cerca de una condición crítica desde el punto de vista de la lógica del Automatismo, como umbrales para su armado, las diferencias en la detección de niveles análogos, tiempos de muestreo, el hardware de los

dispositivos de medida, y los tiempos de ejecución entre los dos sistemas puede resultar en diferentes salidas de cada controlador. Así, si el *trip* final de dos sistemas de un esquema redundante está conectado de manera simple en paralelo ("O" lógico), pueden generarse acciones de control excesivas después de ocurrida una contingencia crítica. El diseño del Automatismo requerirá comparar la acción esperada (armado) de ambos sistemas de cálculo operacional y, en caso de diferir, determinar qué acción se permitirá o priorizará, como se muestra en la Figura 4.11. De acuerdo con la bibliografía, estos conflictos no son comunes, sin embargo, es preferible tener un exceso de disparos que una omisión de disparo.

En caso de que no resulte crítico tomar acciones de control rápidamente, es posible configurar los Automatismos redundantes en paralelo que produzcan diferentes acciones de control dependiendo de los niveles de las variables análogas, para evitar el exceso de acciones de control sin la complicación de realizar la comparación de los cálculos. En este caso, los sistemas funcionan como sistema principal y sistema de respaldo, y la acción de control se retarda. Una vez que el sistema principal produce una acción de control, la acción del sistema de respaldo se bloquea por un periodo de tiempo. Esto previene que los dos sistemas tomen distintas acciones de control para la misma contingencia, y si el sistema principal falla en su operación, el sistema secundario tomará las acciones apropiadas de acuerdo con la funcionalidad del Automatismo.

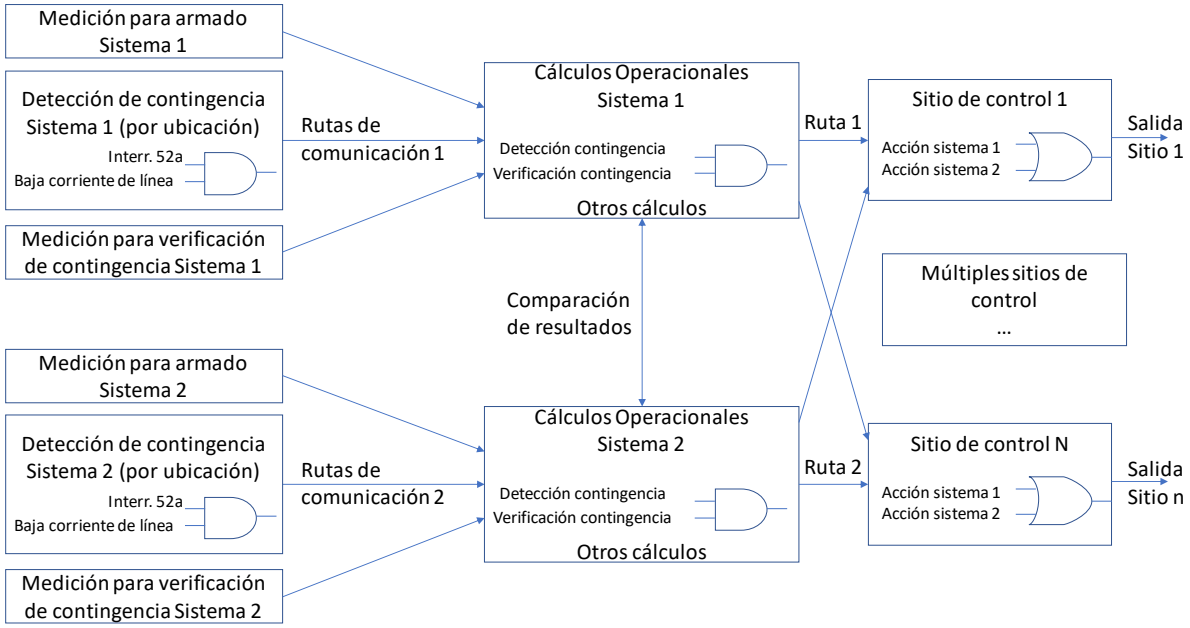

Figura 4.11 Componentes serie y paralelo para mejorar tanto la seguridad como la fiabilidad del Automatismo.

4.3 Diseño para las pruebas del automatismo en funcionamiento

El proceso de pruebas tiene como objetivo demostrar que las funcionalidades del esquema tanto para el hardware como para el software, incluídas las comunicaciones, asociado al Automatismo operan de acuerdo con el diseño

conceptual y de detalle aprobado por el Coordinador, preservando la seguridad de operación del SEN, evitando la propagación de la falla a otras instalaciones y con la confiabilidad requerida. El hardware y el software deben ser diseñados para permitir la realización de pruebas periódicas sin comprometer la confiabilidad del Automatismo.

Cuando un Automatismo incluye una función de armado, el sistema de potencia es frecuentemente operado en niveles o configuraciones que no requerirán acciones del Automatismo, luego de la ocurrencia de una contingencia crítica.

Los Automatismos deben ser diseñados de tal forma que un esquema redundante puede inhabilitarse y aislarse del sistema de potencia sin perturbar el esquema que se encuentra en servicio. Asimismo, los esquemas deben ser diseñados con la suficiente redundancia para que, en caso de que falle un componente, la funcionalidad del Automatismo se mantenga (o bien, se debe asegurar que las condiciones operacionales permitan tolerar contingencias críticas durante el proceso de pruebas). Esta configuración hace posible operar el sistema de potencia sin restricciones de transmisión, mientras parte de un sistema redundante completo es sujeto a pruebas. Todas las entradas y salidas de control de cada esquema deben ser cableadas a través de interruptores de prueba, de tal forma que no se requiera cableado adicional para perturbar el sitio donde está ubicado el esquema o removerlo para ajustarlo en modo de prueba. El acceso a estos interruptores de prueba debe ser fácil y visible con el objetivo de monitorear su estado. Las salidas que correspondan a alarmas o estados de las condiciones del sistema pueden no requerir ser aisladas, siempre y cuando sea de conocimiento de aquellos que estén recibiendo datos, y estén conscientes de que el sistema se encuentra en pruebas. Cuando los datos del Automatismo son provistos a través de redes de comunicación, el software del Automatismo debe ser diseñado con conmutadores por software que permitan aislar y enrutar estos puntos de prueba. El estado de estos conmutadores implementados por software debiese ser controlados por conmutadores físicos o interruptores dentro de una HMI. El estado anormal de estos conmutadores requiere ser indicado y alarmado.

El protocolo de pruebas del Automatismo debe comenzar con su inhabilitación y ajuste en modo de prueba y termina con la puesta en servicio y habilitación. Primero, el modo de pruebas debe inhabilitar las salidas de control y después de esto las entradas. El proceso para volver a poner en servicio el Automatismo debiera considerar habilitar primero las entradas y verificar que su estado sea correcto en la lógica del Automatismo. Algunas lógicas requerirán llenar su memoria con un número mínimo de mediciones de valores análogos para realizar los cálculos. Si este es el caso, el tiempo requerido debe ser documentado y debe existir una señal de estado con la indicación correspondiente. Una vez que el sistema está ejecutando su lógica, se debe verificar el estado de las salidas del Automatismo antes que estas se habiliten.

4.3.1 Pruebas en Automatismos multiacción

Algunos Automatismos son diseñados para tomar diferentes acciones dependiendo de las condiciones del sistema de potencia y el tipo de evento que provoca la contingencia. Estos sistemas son denominados Automatismos multiacción. Muchos de estos Automatismo monitorean varios componentes del sistema eléctrico y tomarán diferentes acciones de control dependiendo de cuál componente falle o del tipo de falla o bien realizarán acciones de control en condiciones normales de operación. Los Automatismos multiacción pueden enviar *trips* o consignas

a más de un generador, líneas o transformadores; conectar o desconectar elementos pasivos tanto serie como paralelo (condensadores o reactores), o deslastrar carga. Estos mismos Automatismos multiacción pueden ser diseñados no solo para operar ante contingencias simples, sino también con contingencias dobles o triples que puedan ocurrir de forma seguida en un periodo corto de tiempo. Todos estos eventos pueden ocurrir antes que el operador del sistema pueda tomar acciones para ajustar y hacer un redespacho en el sistema eléctrico. Incluso si hay suficiente tiempo entre los eventos para el ajuste por parte del operador, el Automatismo debe reaccionar correctamente a cada evento.

Debido a las múltiples opciones para las respuestas y el requerimiento de tomar acciones consecutivas para una serie de eventos en el sistema eléctrico, los Automatismos multiacción son bastante diferentes a los relés de protección típicos. Estos último monitorean una parte del equipamiento: línea, transformador, generador, entre otros, y toma una acción, como el desenganche de interruptores ante la detección de una falla. Una vez que se toma la acción, no se requiere de otras adicionales hasta que el dispositivo monitoreado vuelve a estar en servicio. En caso de haber un cierre automático y se mantiene la falla, entonces se requiere tomar la misma acción nuevamente.

Como resultado de la diferencia entre los Automatismos y los relés de protección, el método para probar estos sistemas es completamente diferente. Para el relé de protección es, en general, un proceso lineal. Se aplican al relé señales de corriente y, tal vez, de tensión, para luego variar los valores de entrada. Luego, el relé tiene dos opciones, o cierra los contactos de desenganche o no. Con un sistema multiacción que monitorea varios componentes del sistema eléctrico y, específicamente, si del Automatismo se requiere una respuesta rápida para estabilidad transitoria, el proceso lineal no será adecuado para probar la funcionalidad de este. Como la acción del Automatismo tiene un efecto significativo en el sistema eléctrico, cuyas variables realimentan al Automatismo, se requiere un sistema de prueba en lazo cerrado. Difícilmente es posible usar el sistema eléctrico mismo para realizar las pruebas, por lo que se requiere una simulación. Mientras más precisa y completa sea la simulación, mejores serán los resultados. Para las pruebas, las entradas y las salidas deben ser desconectadas (primero las salidas y las vías de *trip*, luego las entradas). Posteriormente se debe conectar las entradas y salidas al sistema de prueba simulado. Es importante que en este proceso no se modifique el cableado o el software asociado al Automatismo, de otra forma, se podría comprometer la confiabilidad y no se aprovecharía el beneficio de la realización de las pruebas.

4.3.2 Ejecución de pruebas en simulador de tiempo real

Previo a la implementación en terreno del Automatismo, se deben realizar pruebas que certifiquen el correcto funcionamiento de su lógica de actuación, tanto de sus componentes individuales como en su conjunto, utilizando un simulador de tiempo real que posea las características necesarias para pruebas del tipo HIL. Para ello, en el simulador se debe modelar la zona de influencia del SEN que tiene el automatismo con el detalle suficiente que permita simular y evaluar toda condición, eventos y dinámica a que pueda verse sometido el automatismo una vez que entre en servicio en el SEN. La zona de influencia y la modelación necesaria se determinará caso a caso, considerando la zona de cobertura, impacto de la actuación o no actuación del automatismo y la complejidad del algoritmo y su sensibilidad a las variables que activan su operación. El Coordinado proponente deberá entregar al

Coordinador, para su revisión y aprobación, el informe de pruebas junto a todos los antecedentes para la modelación en el simulador de tiempo real que realice.

Durante las pruebas con el sistema simulado, se deberían generar los eventos correspondientes, para luego registrar la respuesta del Automatismo.

Dependiendo del diseño de las pruebas del simulador, se puede aplicar registros reales del sistema eléctrico para verificar su desempeño.

4.4 Características mínimas del equipamiento [6]

Las características del equipamiento exigido para la implementación del Automatismo deben ser definidas de acuerdo con las funciones y confiabilidad esperadas, y de manera específica para cada aplicación. Sin embargo, al menos, deben contar con las especificaciones que se indican en los puntos siguientes.

Además, dentro de las características mínimas del equipamiento se deben considerar aquellas que permitan el cumplimiento de lo establecido en el Anexo Técnico Sistema de Monitoreo.

4.4.1 Controladores

- Apto para uso en Subestaciones Eléctricas, cumpliendo la norma IEC61850-3,
- Fuente de alimentación redundante de rango extendido 90 a 250 Vcc,
- Entradas Digitales optoacopladas, aptas para operación con 125 Vcc con filtro anti-rebote
- Salidas Digitales rápidas con alta capacidad de corriente aptas para 125 Vcc,
- Puertos de comunicación serie RS-232 o RS-485 disponibles: Dos (2) o más,
- Puertos de red Ethernet 100 Mbps disponibles: Dos (2) o más
- Soporte de protocolos de sincronismo de tiempo IRIG-B, NTP, SNTP, PTP (IEEE 1588),
- Puerto para servicios de diagnóstico y configuración,
- Funciones de estampado de eventos (SOE) con resolución de 1 milisegundo.

4.4.2 Sistemas de medición multivariable trifásico

- Aptos para uso en Subestaciones Eléctricas, cumpliendo la norma IEC61850-3.
- Entrada directa para circuitos de medición de tensión desde TT/PP (hasta 120 Vca) y corriente desde TT/CC (1 a 5 A). Los núcleos requeridos (de protección o medida) de estos transformadores deberán determinarse de acuerdo con la aplicación específica.
- Fuente de alimentación de rango extendido 90 a 250 Vcc.
- Puertos de red Ethernet 100 Mbps disponibles: Uno (1) o más.

- Soporte de protocolos de sincronismo de tiempo IRIG-B, NTP, SNTP, PTP (IEEE 1588).
- Funcionalidad de medición y actuación por corriente cero o escalones de corriente en tiempos ≤ a 50 ms.

4.4.3 Reloj sincronizado por satélite

- Recepción de señales GPS.
- Precisión de reloj: ± 100 ns promedio.
- Protocolos de distribución de tiempo: IRIG-B, NTP, SNTP, PTP (IEEE 1588).

4.4.4 Switches Ethernet

- Administrable.
- Apto para uso en Subestaciones Eléctricas, cumpliendo la norma IEC61850-3.
- Fuente de alimentación redundante de rango extendido 90 a 250 Vcc.
- Puertos en cobre RJ45 10/100/1000 Mbps.
- Puertos en fibra óptica multimodo 100Base-FX, 1000Base-SX conector LC, ST o SC, según necesidad.
- Puertos en fibra óptica monomodo 100Base-FX, 1000Base-LX conector LC, ST o SC, según necesidad.
- Puertos SFP para futuras ampliaciones.
- Cumplimiento de las siguientes especificaciones mínimas: RSTP, SNMP, VLANs, NTP.

4.4.5 Relés de frecuencia

- Apto para uso en Subestaciones Eléctricas, cumpliendo la norma IEC61850-3.
- Entrada directa para circuitos de medición de tensión desde TTPP (hasta 120 Vca) y corriente desde TTCC (1 a 5 A).
- Fuente de alimentación de rango extendido 90 a 250 Vcc.
- Puertos de red Ethernet 100 Mbps disponibles: Uno (1) o más.
- Soporte de protocolos de sincronismo de tiempo IRIG-B, NTP, SNTP, PTP (IEEE 1588).
- Funcionalidad de medición y actuación por tasa de variación de frecuencia con habilitación por frecuencia absoluta.
- Funciones de protección 81 (f>, f<, df/dt), con 3 escalones configurables como mínimo

4.4.6 Protocolos de comunicaciones

El set de protocolos (cliente/servidor según necesidad) que deben manejar los controladores y medidores para la comunicación con los distintos equipos de la integración comprende como mínimo el siguiente listado:

- DNP3.0 Serial
- DNP3.0 sobre TCP/IP
- Modbus RTU
- Modbus TCP/IP
- IEC 61850 Goose
- IEC 61850 MMS
- ICCP (envío de señales de monitoreo al SITR del Coordinador)

4.4.7 Funciones de control

Los controladores, considerando las recomendaciones específicas aplicables a ellos, deberán ser capaces de ser programados y configurados conforme lo requiera cada Automatismo, como así también ser capaces de ejecutar las lógicas necesarias según lo especificado en el estudio de diseño de ingeniería, y que permitan realizar, al menos:

- Operaciones matemáticas para la síntesis y modelado de las funciones de falla que resulten de los estudios eléctricos finales.
- Instrucciones para el desarrollo de bloques de funciones que deben ejecutarse ante eventos intempestivos y permitan minimizar el tiempo de ejecución del programa principal, destinando el tiempo de este a la detección de dichos eventos.
- Motor lógico de acuerdo con la norma IEC 61131.
- Administración de usuarios y funciones de seguridad.
- Procesador de comunicaciones de alta velocidad, para las conexiones de bus de campo a los módulos de entrada/salida y puertos de comunicaciones con IED o sistemas SCADA.
- Capacidad de envío de consignas de control.
- Las entradas digitales deberán ser optoacopladas y de alta velocidad que otorgue el margen de tiempo adecuado para el filtrado de señales espurias.
- Las salidas digitales serán también de alta velocidad para reducir el retardo total de la cadena de disparos entre la salida del controlador y la bobina o elemento de actuación final.

- El controlador deberá poseer la capacidad de sincronización con los receptores satelitales para el almacenamiento de eventos con estampa de tiempo universal a los fines de los análisis post actuación entre los registros de los diferentes controladores.
- El controlador deberá tener capacidad de gestión de todas las interfaces de comunicación y protocolos de comunicación mencionadas anteriormente, no siendo admisible el uso de Gateway de conversión de protocolos, evitando así retardos de comunicación.
- El controlador deberá tener la capacidad de almacenamiento de eventos, medidas y registros oscilográficos que permitan realizar análisis correspondientes luego de su operación, tanto para condiciones normales como para condiciones post contingencia. La ventana de tiempo para la cual esta información deberá estar almacenada dentro del controlador será de, al menos, 1 año. Esta información deberá ser accesible de forma remota.
- En caso de utilizar protocolo de comunicación IEC 61850, el equipo debe certificar el cumplimiento de las normas IEC 61850-5, IEC 61850-6 e IEC 61850-7.

Los controladores, además, deberán incluir la capacidad de realizar diagnósticos de forma remota y/o local. Los diagnósticos locales se realizarán a través de un equipo de programación y control. Se deberán poder realizar las siguientes funciones:

- Visualizar el estado general del controlador.
- Simulación de comandos a través de la herramienta de programación o software de monitoreo.
- Ajuste o configuración de valores analógicos mediante la herramienta de programación o software de monitoreo.

4.4.8 Diagnóstico de fallas

El equipamiento deberá poder efectuar un diagnóstico en caso de falla o mal funcionamiento de alguno de sus módulos integrantes. En caso de cualquier falla detectada, deberán activar las alarmas correspondientes. Estas rutinas de diagnóstico deberán detectar mal funcionamiento de, al menos, los siguientes elementos:

- Transductor de Potencia.
- Transductor de Corriente.
- Falla de cualquier equipo que compone el Automatismo.
- Lectura errónea de contactos de entrada.
- Falla de unidad de sincronía satelital.
- Falla en unidad GPS y/o detección de red satelital.

- Falla en enlace del supervisor local.
- Falla en el enlace de comunicaciones del supervisor remoto.
- Falla en el enlace SITR hacia el SCADA del Coordinador, para monitoreo del Automatismo.
- Fallas en equipos de comunicación (switches, routers, etc.).
- Falla en sistema de respaldo de energía.
- Falla en sistema de energía de alimentación.

5 Costos de implementación de automatismos

Todos los costos asociados a los estudios, diseño, implementación, pruebas, operación y mantenimiento de un automatismo serán de cargo del Coordinado proponente.

6 Referencias y bibliografía

[1] IEEE PSRC, WG I 19, Redundancy Considerations for Protective Relaying Systems, IEEE Conference Paper, 2010.

[2] Norma Técnica de Seguridad y Calidad de Servicio, Comisión Nacional de Energía, septiembre 2020.

[3] Estándar de Ciberseguridad para el Sector Eléctrico, disponible en https://www.coordinador.cl/wp-content/uploads/2019/09/Est%C3%A1ndar-de-Ciberseguridad-SEN-Final-07-10-2020.pdf – Coordinador Eléctrico Nacional, octubre 2020

[4] IEEE Guide for Engineering, Implementation, and Management of System Integrity Protection Schemes, IEEE Standards Association, marzo 2020.

[5] Remedial Action Schemes PRC-012-2, North American Electric Reliability Corporation, septiembre 2017.

[6] Estudio para Plan de Defensa contra Contingencias Extremas, disponible en https://www.coordinador.cl/operacion/documentos/interconexion/contingencias-extremas-y-planes-de-defensa-zona-norte-del-sen/ - Coordinador Eléctrico Nacional, abril 2019.